

Edgar Serna M. (Editor)



DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Vol. I, Edición 6



Medellín - Antioquia
2021

Edgar Serna M. (Editor)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Vol. I, Edición 6

ISBN: 978-958-53278-5-6

Desarrollo e innovación en ingeniería. [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 6a ed. -- Medellín:
Instituto Antioqueño de Investigación, 2021.
2 v. Archivo en formato digital (pdf) – (Ingeniería y ciencia)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-53278-5-6 (vol. I) 978-958-53278-6-3 (vol. II)

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones 2. Investigación industrial I. Serna M.,
Edgar, ed.

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1080788

Investigación Científica

ISBN: 978-958-53278-5-6

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5513899>

Hecho el Depósito Legal Digital

Desarrollo e Innovación en Ingeniería Vol. I

Serie: Ingeniería y Ciencia

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Edición 6: septiembre 2021

Publicación electrónica gratuita

©2021 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido de esta publicación está autorizado bajo Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas mencionadas en el texto pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI; no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este texto.

Ni los autores, ni la Editorial, ni el IAI serán responsables de los daños causados, o presuntamente causados, directa o indirectamente por el contenido en este libro.

Maquetación: Instituto Antioqueño de Investigación IAI

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Compilador: Alexei Serna A.

Financiado de la publicación: Instituto Antioqueño de Investigación

Instituto Antioqueño de Investigación IAI

<http://fundacioniai.org>

contacto@fundacioniai.org

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

<http://fundacioniai.org/index.php/editorial.html>

editorial@fundacioniai.org

Medellín, Antioquia



Prólogo

¿Conocemos realmente el alcance del impacto que tiene la ingeniería en la sociedad en su conjunto? De hecho, los ingenieros han cambiado por completo el mundo en el que vivimos, desde casas modernas, puentes, viajes espaciales y automóviles hasta la última tecnología móvil. Las ideas innovadoras están en el corazón de lo que hacen los ingenieros, y utilizan su conocimiento para crear perspectivas nuevas y emocionantes y para resolver cualquier problema que pueda surgir.

La cuestión es que en este siglo la ingeniería es, más que nunca, una profesión global. El contexto en el que deben enmarcarse los problemas que resuelve la ingeniería es cada vez más global, y la sostenibilidad global debe tomarse como un criterio ingenieril importante. Pero la ingeniería todavía está lejos de ser culturalmente inclusiva. Ha habido una tendencia preocupante a que el alcance global y el impacto de la ingeniería se basen esencialmente en perspectivas de países desarrollados. Por eso es que se debe recuperar el término globalización como algo que implica la celebración de una rica diversidad, no como una receta para una dominación esencialmente neocolonial, desde una perspectiva extraída de una o dos regiones, por poderosas que sean.

La medida en que las cuestiones multiculturales e internacionales deben tenerse en cuenta en la práctica de la ingeniería plantea interrogantes sobre la disposición en que los asuntos culturales impregnan la educación ingenieril. Sin embargo, no es claro que los avances en la educación superior en general apoyen necesariamente una variedad de perspectivas. De hecho, un grupo de fuerzas e ideas que promueven un mercado educativo global parece tener una influencia cada vez mayor en los debates nacionales e internacionales. Las universidades tradicionales, incluso cuando extienden su alcance internacional, pueden mantenerse cada vez más solo para los grupos de élite, mientras que surge un tipo de formación en el sótano de la negociación para las masas a nivel de cada país, incluso en regiones enteras. El asunto es que esta especie de arreglo será desastroso tanto socialmente como profesionalmente para los ingenieros.

En todas las latitudes estos profesionales ofrecen contribuciones útiles al desarrollo de una perspectiva más amplia de la ingeniería. El contexto ingenieril en el que trabajan los estudiantes y académicos ha permitido, en una amplia gama de enfoques innovadores, experimentar y dar voz a esa diversidad cultural. Esta variedad incluye algunos enfoques que las universidades han adoptado para incorporar temas internacionales y conciencia transdisciplinar en los programas. De ahí la necesidad de capacitar a los estudiantes de ingeniería para que reflexionen sobre cuestiones globales, de modo que, como individuos, sean culturalmente sensibles e inclusivos y puedan enorgullecerse justificadamente del papel internacional de su profesión.

Mirando primero a la profesión en sí, la academia debe defender firmemente que los ingenieros reclamen la idea de la globalización como un término culturalmente inclusivo, y a la ingeniería global como una actividad culturalmente inclusiva. Esto es necesario, porque gran parte del contexto político para la práctica global de la ingeniería en el siglo XXI está siendo establecido por tres construcciones esencialmente ideológicas, y que son centrales en la retórica del capitalismo moderno: 1) globalización, 2) racionalismo económico (neoliberalismo), y 3) gerencialismo corporativo. Realmente, estos conceptos solo pertenecen al sector empresarial, donde definen cada vez más el entorno de trabajo para muchos profesionales de la ingeniería. Sin embargo, se están introduciendo en todas las esferas de la vida social y política, incluidas las universidades.

Por otro lado, la sustentabilidad quizás demuestra más claramente la dimensión global de los desafíos que enfrentan los ingenieros. Avanzar hacia la sostenibilidad es una preocupación fundamental para las sociedades de todo el mundo. Lo que significa exactamente la sostenibilidad es todavía un tema de discusión, pero algunos de los recursos centrales y otros temas están comenzando a surgir con cierta claridad. Ayudar a las personas a satisfacer sus necesidades, sin comprometer los recursos disponibles para las generaciones futuras, es parte de la historia. Existe un acuerdo menos generalizado sobre la medida en que es necesario mantener la biodiversidad y conservar los entornos naturales y construidos. La adopción de la sostenibilidad, como un principio rector para la práctica profesional de la ingeniería, requerirá

ciertamente un replanteamiento exhaustivo de los enfoques actuales, lo mismo que una exploración mucho más seria de los problemas futuros.

La sostenibilidad no es simplemente un concepto técnico, aunque los ingenieros deben desempeñar un papel clave para lograr sus demandas técnicas. Si buscáramos que todos en la tierra logren la calidad de vida promedio de los millones de ciudadanos de los países industrializados, tendríamos que aumentar la eficiencia de los recursos y utilizarlos muy sustancialmente. Los estudios indican que, mediante un uso más eficaz de las tecnologías existentes, en muchas áreas se podría lograr un aumento de hasta cuatro veces en la eficiencia del uso de recursos. Sin embargo, el pensamiento reciente sugiere que se necesita un factor más cercano a 10, pero, de hecho, esto requerirá un cambio radical y planteará grandes desafíos para los sistemas de ingeniería.

Otra área en la que la ingeniería global tiene un papel positivo que desempeñar es en el desarrollo y la transferencia de tecnología. Durante décadas, gran parte de la práctica de la ingeniería ha sido el desarrollo de nuevas tecnologías en un contexto industrial, lo mismo que su transferencia, adaptación y adopción en otros lugares y culturas. Una de las dificultades para analizar el desarrollo y la transferencia de tecnología es la enorme variedad de sistemas socio-técnicos de producción y uso involucrados. En un extremo de la gama se encuentran las actividades a pequeña escala, a menudo en áreas remotas, y problemas como las comunicaciones, la purificación de agua potable o la producción artesanal y agrícola para grupos pequeños. En el otro extremo están las actividades industriales a gran escala, con las que, generalmente, los ingenieros están más familiarizados (y quizás más cómodos). Todo el espectro de la transferencia de tecnología es importante, pero los enfoques requeridos en cada extremo del mismo son muy diferentes, y es esencial tener claro dónde está el foco en todo momento.

La transferencia de tecnología tiene aspectos tanto culturales como técnicos y de recursos. Incluso en los traslados a países relativamente desarrollados, estos problemas culturales pueden presentar serias dificultades. Al considerar los aspectos culturales de la transferencia de tecnología, se puede distinguir entre contextos micro, por ejemplo, dentro de una empresa individual, y contextos macro, que pueden incluir una sociedad regional o nacional completa, o incluso el mundo entero. Se sugiere entonces que, para desarrollar una comprensión adecuada de las causas y consecuencias de desarrollos tecnológicos específicos, debe tenerse en cuenta a las dimensiones culturales.

Para resumir este análisis de los constructos actuales y posibles de la ingeniería global, en esta coyuntura parece obvio que el término tiene connotaciones y potencialidades tanto positivas como negativas. La profesión del ingeniero tiene una responsabilidad ética fundamental para ayudar en los movimientos locales, nacionales, regionales y globales hacia una sociedad más social y ecológicamente sostenible. Los criterios de diseño en todos los niveles deben cambiar para tener en cuenta la sostenibilidad como un criterio de diseño fundamental, y esto requiere un cambio fundamental de enfoque, tanto educativo como técnico.

De esto es que trata el contenido de este libro, de una ingeniería global y sostenible que guie a la sociedad en su tránsito por el Nuevo Orden Mundial. Los autores de cada capítulo plasman sus pensamientos acerca de muchas de estas cuestiones, tan necesarias en la actual situación del Planeta, ofreciendo una perspectiva global de la ingeniería para el mundo, y no para atender al neoliberalismo imperial. Las investigaciones desde las que se generan los capítulos aquí incluidos son de carácter transdisciplinar, ya que esta deberá la manera en que se desarrolle la ingeniería en la Nueva Era que estamos viviendo.

Contenido

Prólogo	5
<i>Análisis del comportamiento del flujo de agua sobre un vertedero tipo WES mediante un modelo computacional</i>	11
Hugo Daniel Manzano Celedón y Miguel Fernando Montoya Vallejo	
<i>Caracterización de una turbina eólica de eje vertical tipo híbrida utilizando dinámica de fluidos computacional</i>	21
Eric Felipe Muñoz García, Miguel Fernando Montoya Vallejo y Nicolás Cuevas Carvajal	
<i>Sistema remoto de monitoreo de la conductividad eléctrica en un cultivo aeropónico</i>	37
Jorge Mario Garzón González, Marisol Osorio Cárdenas y Juan Camilo Acevedo Bedoya	
<i>Controlador PID con autoajuste difuso para un regulador de voltaje DC-DC boost aplicado a generadores fotovoltaico</i>	45
Rafael Augusto Núñez Rodríguez, Carlos Lizardo Corzo Ruíz y Jeison Marín Alfonso	
<i>Control de movimiento de un dron mediante señales bioeléctricas de electroencefalografía</i>	55
Iván Daniel Villegas, Julián Rolando Camargo López y Cesar Andrey Perdomo Charry	
<i>Diagnóstico y desempeño de la energía solar fotovoltaica en el departamento del Valle del Cauca, Colombia</i>	62
Alejandra María Restrepo Franco, Francy Nelly Jiménez García y Yuri Uliánov López Castrillón	
<i>Retos regulatorios y de gestión del espectro en relación con la implementación de la tecnología 5G. Caso de estudio: Colombia</i>	75
Dilan Steve Vargas Pérez	
<i>Diseño de un convertidor boost cuadrático controlado mediante el algoritmo de perturbar y observar</i>	90
Jairo Alberto Cuéllar-Guarnizo, Carlos Andrés Torres-Pinzón y Edwin Francisco Forero-García	
<i>Análisis a la fiabilidad y el rendimiento de la transmisión de datos digitales sobre una red eléctrica</i>	101
Lizeth Dayane Cortés Hernández, Verena de Jesús Mercado Polo y Alonso de Jesús Retamoso Llamas	
<i>Determinación del efecto de un sistema micro controlado de riego por goteo en la fertilización y cultivo del ají</i>	112
Jorge Luis González, Delvis Mejía Álvarez, Jairit Garavit Garavit y María Inés Mantilla Pastrana	
<i>Creación de una herramienta de software libre para aplicación en el campo de los sistemas eléctricos de potencia</i>	127
Alonso de Jesús Retamoso Llamas, Verena de Jesús Mercado Polo y Lizeth Dayane Cortés Hernández	
<i>Análisis de las recomendaciones UIT-R P.1546 y UIT-R P.526-13 para un estudio del espectro de la banda de 3.5 GHz en Colombia</i>	143
Guillermo Fernando Valencia Plata y Félix Roberto Gómez Devia	
<i>Simulación de cobertura de modelos de canal en la frecuencia de 26 GHz para una red móvil 5G</i>	156
Javier Enrique Arévalo Peña	
<i>Disposición final de paneles solares fotovoltaicos: Una revisión de la literatura</i>	170
Diego Andrés Mora P., Fabián David Barreto S., Luis Miguel Gutiérrez P. y Jorge Enrique Patarroyo F.	
<i>Diseño de protecciones y puesta a tierra para árbol con sistema solar fotovoltaico</i>	182
Juan Fernando Saldarriaga G., Karen Lemmel-Vélez, Carlos Alberto Ocampo Q. y Carlos Andrés Rodríguez T.	
<i>Uso de redes neuronales para simular el flujo del tránsito en cruces de alta densidad vehicular</i>	191
Ricardo Alirio González B., Yeisson Steven León I., Leidy Johanna Alfonso D. y Edgard Edmundo Vargas T.	
<i>Análisis al uso potencial de compuestos híbridos con base en polímeros y materiales nanoestructurados de carbono en supercondensadores flexibles</i>	203
Diego A. Cuartas M., Cristina I. Castro H., Esteban García T., Sara N. Herrera P. y Zulamita Zapata Benabithe	

<i>Desarrollo de un sistema portátil para lombricultura con control de humedad por goteo y monitoreo de temperatura</i>	222
Edgar Andrey Parrado Carpintero y Alben Melo Vega	
<i>Diseño e implementación de un prototipo de vehículo con capacidades de navegación autónoma y de exploración cognitiva de su entorno</i>	233
José Efrén Barbosa C., Christian Hernández, Daniel Paredes, Rene Patricio Játiva E. y Kevin Villareal	
<i>Propuesta matemática para calcular los parámetros aerodinámicos y trayectoria de una cápsula espacial en la atmósfera terrestre</i>	253
Arnold Daniel Andrade Torres	
<i>Evolución de la operación de aeropuertos y desafíos post Covid-19</i>	261
Oscar Díaz Olariaga	
<i>Utilización de algoritmos de redes neuronales artificiales en el pronóstico de la demanda de pasajeros aéreos</i>	277
Juan Gerardo Muros Anguita y Oscar Díaz Olariaga	
<i>Confort térmico en vehículos convencionales MClA y eléctricos VE: Métodos de evaluación</i>	295
Bernardo José Mirones Gómez	
<i>Caracterización de las emisiones de los Ground Support Equipment GSE en aeropuertos. Caso de estudio: Aeropuerto de San Andrés, Colombia</i>	304
Lucas Sznajderman, Oscar Díaz Olariaga, Juan Ignacio D'lorio y Alejandro Di Bernardi	
<i>Caracterización de las demoras de vuelos comerciales. Caso de estudio: Aeropuerto Internacional El Dorado, Colombia</i>	319
Luis Manuel Pulido Moreno y Oscar Díaz Olariaga	
<i>Propiedades estructurales y conducción térmica en nanohilos de CuO por medio de simulación molecular. Resultados previos</i>	331
José Darío Agudelo Giraldo, Diego Arias Mateus y Henry Reyes Pineda	
<i>Diseño de productos funcionales derivados del fruto y la hoja del sauco</i>	337
Laura López Salgado, Santiago Torres Pacheco y María Hernández Carrión	
<i>Caracterización físico-química y obtención de emulsiones a partir del aceite de semilla de sacha inchi</i>	351
Aureliano Rodríguez Cortina y María Hernández Carrión	
<i>Efecto de los iones en solución sobre la viscosidad de soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizadas de bajo peso molecular</i>	365
Tulio Andrés Prada S., Adán Yovani León B., Samuel Fernando Muñoz N. y Rodrigo Gonzalo Torres S.	
<i>Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido en pastas de cemento portland con adición de mucílago de cacao Theobroma cacao L como aditivo orgánico</i>	376
Brayan León García-S., Mónica Andrea Bedoya-G., Oscar Aurelio Mendoza-R. y Jorge Iván Tobón	
<i>Estimación del consumo y costo energético del proceso de reducción de tamaño de una gilsonita para su uso en la modificación de asfaltos</i>	384
Denier Yela Jaramillo, Francisco Daniel Granda A. y Gloria Restrepo	
<i>Determinación del riesgo disergonómico en actividades de apicultura: Un estudio de caso</i>	395
Montserrat Villanueva Uribe, Stefany Puentes Cantor, Yolanda Torres P. y Edwin Yesid Gómez-P.	
<i>Modulo electrónico para la adquisición, procesamiento digital y transmisión de señales mioeléctricas en tiempo real usando microcontroladores dsPic</i>	413
Néider Fabián Walteros Pinto y Daniel Humberto Albarracín Sepúlveda	
<i>Biodegradación de láminas de polietileno de baja densidad LDPE pretratadas por radiación UV, en humus de lombriz y Aspergillus brasiliensis</i>	425
Leidy Alejandra Calcetero Moreno y Diana Milena Morales-Fonseca	

<i>Uso de lodos aceitosos en la estabilización de suelos</i>	434
José Rodrigo Alarcón Dallos, Richard Andrés Benítez Galindo y Manuel Antonio Jiménez Caro	
<i>Estudio del comportamiento a flexión de la guadua angustifolia kunth utilizando el método de elementos finitos</i>	446
Germán Camilo Leguizamó Guzmán, Juan Camilo Morales Castañeda y Miguel Fernando Montoya Vallejo	
<i>Evolución del modelo airport-city. Caso de estudio Bogotá, Colombia</i>	462
Oscar Díaz Olariaga	
<i>Tecnologías y enfoques para el aprovechamiento de la energía regenerativa en el transporte ferroviario: Una revisión sistemática</i>	475
Jesús Arauz Sarmiento, Félix Henríquez, Juan de Dios Sanz Bobi y Aránzazu Berbey-Álvarez	
<i>Determinación de la resistencia al fuego de pórticos de concreto reforzado considerando daños previos por sismo en el contexto normativo colombiano</i>	501
Lina Marcela Guzmán Flórez y Carlos Alberto Riveros Jerez	
<i>Análisis comparativo de requisitos y procesos de diseño para apoyos elastómeros reforzados de puentes</i>	514
Carolina Castaño Agudelo y Carlos Alberto Riveros Jerez	
<i>Fundamentos conceptuales y métodos para determinar la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos</i>	528
Ray Andrés Ardila Cubillos y Guillermo Mejía Aguilar	
<i>Hidrochars derivados de papa residual como subproducto del proceso de carbonización hidrotermal: Caracterización y aplicación en el tratamiento de aguas residuales de minería</i>	545
Yeimy Fernanda Hernández L., Juliana Maritza Zarate J., Luis Fernando Lozano G. y María Del Pilar Triviño R.	
<i>Modelo cíclico para la simulación del comportamiento histerético de las mallas electrosoldadas</i>	561
Michael Miranda Giraldo, Camilo A. González Olier, Habib Zambrano Rodríguez y Carlos A. Arteta Torrens	
<i>Estudio y modelado matemático de la interacción entre la forma del fondo y el líquido en reservorios para almacenamiento de agua</i>	569
Yasmani Teófilo Vitulas Quille	
<i>Comparación de las características de respuesta ante un sismo entre un sistema de concreto armado y uno de estructuras metálicas</i>	584
Daniel Jesús Mitac Rivera, José Darío Gonzáles Zarpán y Carlos Jordy Pérez Garavito	
<i>Análisis comparativo de agregados buscando mejorar la resistencia y durabilidad del concreto</i>	590
Verónica Hillary Figueroa C., Jean Carlos Meza P., Raúl Andrés Terrazas R. y Alba Cristina Vides B.	
<i>Desarrollo de una herramienta computacional para la estimación de caudales máximos mediante modelación lluvia escorrentía, en escenarios de riesgo por eventos extremos de precipitación en cuencas de alta montaña</i>	600
Yeison Mosquera Valencia, Deison Cárdenas Espinal y Adolfo Enrique Arévalo Henao	
<i>Estudio de las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas de la hematita α-Fe₂O₃</i>	618
Luisa Fernanda Vargas Restrepo, Harrison Osfrey Salazar Tamayo y César Augusto Barrero Meneses	
<i>Caracterización de cargas vehiculares en un puente con monitoreo estructural</i>	627
Mauricio Marín, Diana Millán Yusti, Sebastián Castellanos T., Johannie Marulanda C. y Peter Thomson	
<i>Modelo predictivo del potencial energético del gas de síntesis producido de la gasificación de biomasa</i>	641
Andrés Fabián Solano-Pérez y Yesid Rueda-Ordóñez	
<i>Comparación cualitativa de estimaciones de la fracción volumétrica de aceite en flujo anular aceite-agua Core-Flow</i>	654
Adriana Bonilla Riaño, Hugo Fernando Velasco e Iván Darío Ruiz	

<i>Diseño de un recipiente de alta presión con accesos ópticos para la caracterización de chorros de inyección en estado no reactivo</i>	665
Javier Andrés Urbano Tole y Oscar Hernando Venegas Pereira	
<i>Análisis de generación de grietas superficiales mediante el monitoreo de emisiones infrarrojas en aceros al carbono</i>	683
Juan Pablo Higueta Gutiérrez y Nelson Antonio Vanegas Molina	
<i>Diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis monoplace serie kart</i>	691
Daniel Alejandro Portilla E., Nelson Antonio Vanegas M., Germán Leonardo García M., Luis Fernando Gil B., Andrea Lucia Zapata A., Andrés Felipe Castro G., Mauricio Arango C. y Juan Pablo Jiménez R.	
<i>Proceso de trefilado de alambres de Acero: Una revisión de la literatura y caracterización del proceso en Colombia</i>	705
Nicolás D. Navarro L., Daniel S. Cely F., Javier A. Urbano T., David L. Blanco E., Miguel F. Montoya V. y Camilo Hernández A.	
<i>Diseño y modelado computacional de un sistema de ventilación para disminuir el riesgo de contagio de Covid-19 en aulas universitarias</i>	723
Sofía Holguín-Briceño, Jorge Andrés León, Andrés Eduardo Penagos-C., Brian David Zapata-H., Camilo Jesús Marín-J., Carlos Mario Morales-R., Cristian Alejandro Castrillón-A., Cristian Alejandro Hernández-L., Juan Felipe Rodríguez-N., Juan Pablo Ariza-H., Julián Ricardo Rodríguez-S., Julián Santiago Serrano-R., Nicolás David Ávila-R., Sara Valentina García-M., Sebastián Cardona-P., Sergio D. Cardozo-F. y Aldo Germán Benavides-M.	
<i>Obtención y caracterización de grafeno multicapas depositado sobre alambres de cobre a altas temperaturas bajo el método CVD a partir de metano</i>	744
Hermann E. Alcázar, Andrés R. Rodríguez, Hilda M. Quispe, Tiffany L. Trujillo, Briam R. Velásquez, José A. Coaquira y Leopoldo O. Alcázar	
<i>Efecto de los parámetros de soldadura en la disminución de porosidad en uniones disímiles entre aleaciones de aluminio mediante el proceso de soldadura GMAW-CMT</i>	758
Enrique González Aparicio, Rocío Saldaña G., Gladys Yerania Pérez M. y José Jorge Ruiz M.	
<i>Estudio de la cinemática del gesto deportivo de remate en jugadores de voleibol mediante el uso de videometría digital</i>	768
Johan Sebastián Becerra Fuentes y Yolanda Torres Pérez	
<i>Estudio de la influencia de las condiciones climáticas en la integridad de los materiales utilizados para la construcción de colmenas de abejas Apis mellifera</i>	780
Andrés Felipe Rubiano Navarrete, Camilo Lesmes Fabián, Yolanda Torres Pérez y Edwin Yesid Gómez-P.	

Análisis del comportamiento del flujo de agua sobre un vertedero tipo WES mediante un modelo computacional

Hugo Daniel Manzano Celedón¹

Miguel Fernando Montoya Vallejo²

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

Un vertedero tipo WES es una estructura hidráulica que permite seguir la forma del flujo generando una disipación considerable de su energía. Este tipo de vertedero generalmente cumple la función de descargar el exceso de agua en un embalse. El comportamiento del flujo sobre el vertedero es función de parámetros como la pendiente del canal o el flujo descargado, estos parámetros describen la trayectoria de las líneas de corriente o los perfiles de flujo que son el principal interés de este trabajo.

¹ Ingeniero Civil.

Contacto: hugo.manzano@mail.escuelaing.edu.co

² Doctor en Ingeniería Mecánica.

Contacto: miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Un vertedero hidráulico es una estructura que permite el paso o descarga de agua sobre éste, permitiendo que se cumplan funciones específicas que van desde el aforo de caudales hasta proveer seguridad a otro tipo de estructuras hidráulicas (como presas), al prever la ocurrencia de eventos que hagan que el nivel de agua sobrepase al máximo soportado por la estructura de emplazamiento.

Con el fin de buscar la forma de vertedero óptima que permita una descarga adecuada se han hecho numerosas investigaciones. La U.S. Bureau of Reclamation USBR, usando métodos experimentales, determinó las coordenadas de lámina inferior de la descarga de agua sobre un vertedero de pared delgada permitiendo al U.S. Army Corp of Engineers la obtención de formas estándar para vertederos, mejor conocidos como Waterways Experimental Station WES.

Este tipo de vertedero logra ajustarse adecuadamente a la forma que adquiere la descarga, agrega una segunda curvatura al final que genera flujo turbulento causado por la pendiente del vertedero (efecto de aceleración) una vez se ha iniciado la descarga. Para generar la desaceleración del fluido, se hace necesario una forma complementaria que disipe la energía.

Todas estas características generan efectos en el fluido produciendo cambios en su comportamiento dependiendo del caudal descargado. Las condiciones de análisis van desde la formación de perfiles de flujo hasta los cambios que se generan en el régimen del flujo durante toda la descarga, siendo necesario implementar ecuaciones matemáticas (Navier-Stokes) y herramientas computacionales (ANSYS FLUENT).

2. MARCO CONCEPTUAL

Algunos conceptos en el campo de la mecánica de fluidos y en el diseño de estructuras hidráulicas son tenidos en cuenta para el diseño y validación del vertedero. El flujo laminar es aquel en el que las partículas del fluido se mueven de forma suave en láminas paralelas siguiendo la línea de corriente del flujo y por lo tanto el flujo turbulento es aquel que se da de forma caótica o entrópica formando pequeñas turbulencias dentro del flujo [1].

El parámetro utilizado para estimar el tipo de flujo es el número de Reynolds, el cual matemáticamente se escribe como se indica en la ecuación (1).

$$R_e = \frac{\rho V R_h}{\mu} = \frac{V R_h}{\nu} \quad (1)$$

Donde V es la velocidad del fluido, R_h es el radio hidráulico y ν la viscosidad cinemática. Usando resultados experimentales [3, 9], los rangos de valores para catalogar el flujo de acuerdo con el número de Reynolds se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del flujo a superficie libre de acuerdo con el número de Reynolds [1]

Clasificación	R_e
Turbulento	>2500
Transición	2500-500
Laminar	<500

El número de Froude es adimensional y relaciona las fuerzas inerciales con las gravitacionales que actúan en el flujo permitiendo una caracterización del tipo de flujo que ocurre en canales [1]. La expresión del número de Froude es la mostrada en la ecuación (2).

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (2)$$

Donde v es la velocidad media del canal, g la aceleración de la gravedad e y la profundidad de la lámina de agua. De acuerdo con los valores del número de Froude se puede clasificar el flujo como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del flujo a superficie libre de acuerdo con el número de Froude [1]

Clasificación	F_r
Turbulento	>1
Transición	1
Laminar	>1

Para el análisis del comportamiento del flujo en su recorrido por las estructuras hidráulicas, es decir, la formación de perfiles de flujo y cambio de régimen, son importantes las condiciones aguas arriba o aguas abajo que lo gobiernan, por lo tanto, un flujo subcrítico estará gobernado por las condiciones de control aguas abajo y un flujo supercrítico estará gobernado por las condiciones de control aguas arriba [3].

En los puntos donde exista un control (obstáculo, cresta de un vertedero, etc.) ocurrirá un cambio de régimen del flujo, esto quiere decir que el flujo puede pasar de subcrítico a supercrítico o viceversa, pasando por la condición crítica durante el proceso indicando así un cambio en la energía del flujo [9].

La continuidad en el flujo a superficie libre expresa que el caudal en una sección de control 1 será el mismo en una sección de control 2. Esto se expresa con las equivalencias observadas en las ecuaciones (3) y (4).

$$Q_1 = Q_2 \quad (3)$$

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (4)$$

La energía en cualquier punto del flujo será igual a la ecuación (5).

$$H = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Donde z corresponde a la elevación del canal respecto a un nivel de referencia, y la elevación de la lámina de agua y la tercera expresión es la energía cinética del flujo. Se debe cumplir la igualdad de la ecuación (6).

$$H_1 = H_2 \quad (6)$$

Una variación rápida del flujo ocurre si hay un cambio brusco y evidente de la profundidad de la lámina de agua dentro de un tramo corto del canal. Esto ocurre cuando existe un cambio de las condiciones de control del canal o simplemente cuando existen estructuras de control como compuertas semi-abiertas, vertederos de pared delgada, vertederos de pared gruesa, obstáculos y otras estructuras de aforo.

Los flujos rápidamente variados son complejos de analizar y estudiar, por lo tanto, estos problemas suelen atacarse de forma numérica o experimental [5, 6, 8, 9]. El cambio de energía en secciones o puntos de control (zonas antes y después de la formación del resalto) deben ser iguales; las profundidades de lámina de agua de dichas secciones estarán dadas por la ecuación (7).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8NF_1^2} - 1 \right) \quad (7)$$

Las expresiones matemáticas que gobiernan el problema en estudio son las ecuaciones de *Navier-Stokes*. Son ecuaciones diferenciales parciales no lineales a las cuales no se les ha encontrado una solución exacta, por lo tanto, es necesario tener en cuenta ciertas suposiciones respecto a los fluidos cuando se implementan para modelar un problema físico [4, 7], estas suposiciones permiten tener un análisis más simple llegando a una solución numérica aproximada.

Existen diferentes modelos de turbulencia que pueden ser implementados para entender la iteración del fluido con el sólido que se interpone en su movimiento [6]. El modelo de turbulencia conocido como $K - \epsilon$, es un modelo de carácter semi-empírico que emplea ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (K) y su disipación (ϵ). A continuación, se presentan las ecuaciones del modelo [4]. La viscosidad turbulenta se calcula con la ecuación (8).

$$\mu_t = \rho C_\mu * \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Donde μ_t es la viscosidad turbulenta, C_μ es la constante del modelo, k es la energía cinética turbulenta y ε es la tasa de disipación de energía cinética turbulenta por unidad de tiempo calculada según [4] (ecuación (9)).

$$\varepsilon = \frac{\mu_t}{\rho} * \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 ; i, j = 1, 2, 3 \quad (9)$$

Los Esfuerzos de Reynolds [4] se determinan con la ecuación (10).

$$\tau_{i,j} = -\rho * u'_i u'_j \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho * k * \delta_{i,j} \quad (10)$$

Y las ecuaciones de transporte (11) y (12) para $K - \varepsilon$.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial(k)}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t S_{ij} * S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} * \frac{\varepsilon}{K} 2\mu_t S_{ij} * S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho * \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

Para las constantes en cada una de las ecuaciones, se usaron los valores obtenidos de [4] que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Constantes del modelo K-ε

C_μ	0.09
σ_k	1.00
σ_ε	1.30
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92

2.1 Consideraciones de Diseño del vertedero tipo WES

Este tipo de estructura hidráulica fue el resultado de los estudios realizados por la USBR y la US Army Corp of Engineers, con el primero obteniendo resultados experimentales y el segundo estandarizándolos [2]. Se puede encontrar 4 casos típicos de estos vertederos que simplemente varían en cuanto a la inclinación del muro o espalda del vertedero (Figura 1).

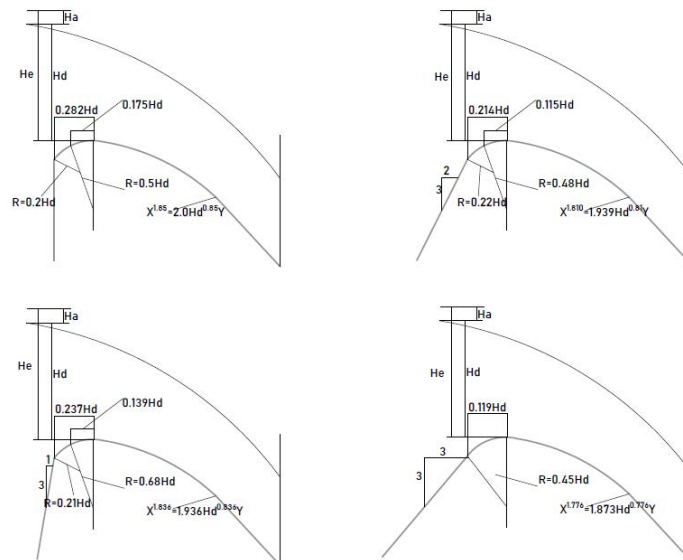


Figura 1. Formas estándar para el vertedero tipo WES [2]

El perfil de la cresta con origen en el punto más alto del vertedero está dado por la ecuación (13).

$$X^n = KH_d^{n-1}Y \quad (13)$$

Donde H_d es la altura de carga sobre la cresta del vertedero (excluyendo la altura de velocidad), K y n son parámetros que dependen de la pendiente del muro de la estructura. Estos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Valores de los coeficientes K y n de acuerdo con la pendiente del muro del vertedero [2]

Z	K	n
Vertical	2	1.85
3 a 1	1.936	1.836
3 a 2	1.939	1.81
3 a 3	1.873	1.773

El caudal descargado está dado por la ecuación (14).

$$Q = CLH_e^{1.5} \quad (14)$$

Donde H_e es la altura de energía total. Para el cálculo de la curvatura a la salida del vertedero se emplea la ecuación (19).

$$R = 10 \frac{V+6.4H+16}{3.6H+64} \quad (19)$$

3. MÉTODO

Para la evaluación del modelo propuesto de vertedero, se implementó el método de los elementos finitos. El software utilizado fue ANSYS-FLUENT. La estructura hidráulica sobre la cual se analizarán las características del flujo cuenta con una cresta conformada por arcos, para este tipo de geometría se debe emplear en el mallado un elemento que permita describir las curvas, por esto se utilizó un mallado con elementos triangulares que se ajusta mejor a las curvas dadas por el diseño. Las zonas de contacto entre la estructura y el flujo deben presentar una discretización más fina para que el cálculo numérico sea más aproximado al comportamiento real del flujo en esas zonas, el resultado se ilustra en la Figura 2.

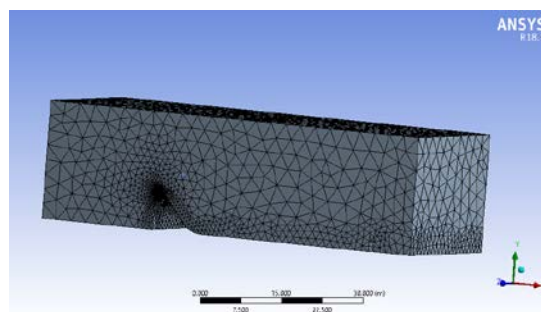


Figura 2. Mallado de la estructura

En la cresta del vertedero se presenta el primer cambio del régimen del flujo pasando de condición crítica y acelerándose para ser supercrítica. El segundo cambio ocurre un poco después de la “rápida” del vertedero con la presentación de un resalto hidráulico.

El volumen de control fue subdividido en 7 regiones: entrada, muro izquierdo y muro derecho, salida, fondo, superficie y muro de restricción del flujo, que definen las condiciones de frontera. Las condiciones de frontera en la entrada describen la entrada del flujo al modelo a través del flujo másico. En los muros, se establece la condición de no deslizamiento del flujo con respecto a los sólidos con los que entra en contacto, asemejando a lo que sucede con el cauce natural del agua que recorre el vertedero. En este tipo de condición hacen parte los muros, fondo y el muro de restricción de flujo. A la salida del vertedero, la condición de frontera establecida fue presión atmosférica la cual es común para un flujo a superficie libre que no es gobernado por la energía potencial.

3.1 Parámetros hidrológicos

Inicialmente, se debe realizar un análisis hidrológico para cuantificar el caudal de diseño que debe ser el caudal máximo mensual para un periodo de retorno definido por la normativa RAS2017 de acuerdo con las características de la bocatoma, en este caso se ha definido un periodo de retorno $T_r = 40$ años siendo este el mínimo. El periodo de retorno indica la probabilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo determinado y con él se proyecta series de caudales obtenidos históricamente con equipos de medición.

En este caso se emplearon las series de caudales mínimo, medio y máximo de la estación limnigráfica Puente Salguero sobre el río Cesar, en Valledupar, Colombia. Para el diseño solo se tuvo en cuenta la serie de caudales máximos con la cual se hizo la proyección de un caudal con el periodo de retorno ya mencionado con la función de probabilidad Gumbel (ecuación (20)), que es la que mejor proyecta las series extremas de caudal.

$$Q_D = 431.19 \frac{m^3}{s} \quad (20)$$

El vertedero para diseñar de los estándares presentados es el que no presenta inclinación en su talud. Con base en los parámetros ilustrados en la Figura 2, se muestra un resumen de sus dimensiones geométricas en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensionamiento del vertedero WES

Q_d [m ³ /s]	431.19
h [m]	7.50
a [m]	30.00
H_d [m]	3.38
H_e [m]	3.47
H_v [m]	0.09
r_1 [m]	1.69
r_2 [m]	0.68
R [m]	4.81
h -obs [m]	1.82
X [m]	35.0

Para los parámetros expuestos en la Tabla 5, se muestra en la Figura 5 una vista frontal del modelo final del vertedero, es importante resaltar que la variable "R" corresponde al radio de la curva al final de la rápida, "X" la longitud hasta el cuenco disipador, " r_1 " y " r_2 " los radios de los arcos en la cresta y " h -obs" la altura del cuenco disipador. En la Figura 4 se muestra el modelo realizado en el software Ansys-Fluent.

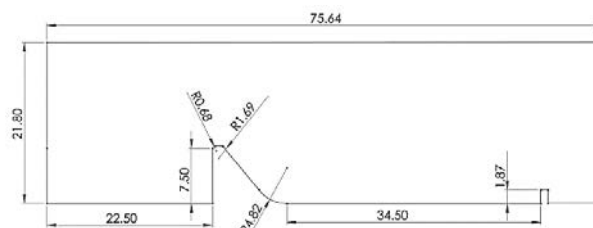


Figura 3. Dimensionamiento del vertedero (unidades en metros)

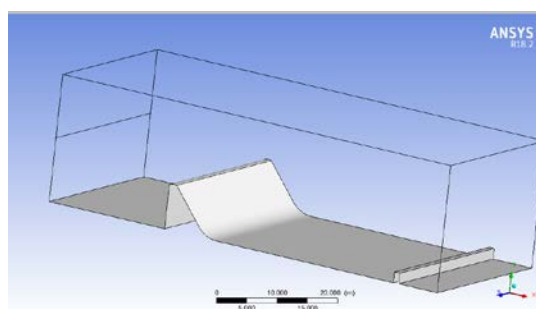


Figura 4. Modelo 3D del Vertedero

3.2 Parámetros hidráulicos

Para el caudal de diseño (Q_d) se espera que se presenten los parámetros que se muestran a continuación y que estos no sean excedidos mientras que no se presente un caudal correspondiente a un periodo de retorno mayor al de diseño. El resumen de magnitudes de los parámetros esperados en el análisis se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros hidráulicos esperados

Q_d [m ³ /s]	431.19
Y_c [m]	2.76
V_c [m/s]	5.41
Y_1 [m]	1.04
V_1 [m/s]	14.30
Y_2 [m]	6.00
V_2 [m/s]	2.49
Y_3 [m]	3.56
V_3 [m/s]	4.19

Donde:

Y_1 corresponde a la profundidad de la lámina de agua justo después de la rápida del vertedero.

Y_2 corresponde a la profundidad de la lámina de agua una vez formado el resalto hidráulico.

Y_3 corresponde a la profundidad de la lámina de agua sobre el cuenco disipador.

Teniendo en cuenta que Y_c es la profundidad crítica de flujo que se presenta cuando la energía de este es mínima e indica un próximo cambio en el régimen del flujo, por lo tanto, V_c es la velocidad crítica para esta condición. Siempre que esto se presente el número de Froude será igual a 1. El flujo másico \dot{m} [kg/s] ingresado en la condición de frontera fué 429.898 kg/s. La curva teórica de flujo sobre el vertedero se muestra en la Figura 5.

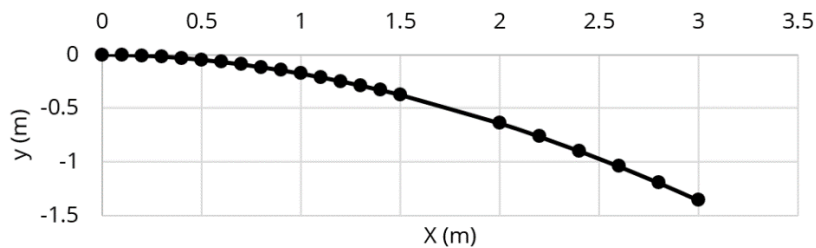


Figura 5. Trayectoria teórica del flujo sobre el vertedero

3.3 Espacio computacional

Es necesario proveer al programa un espacio suficiente para que el modelo disipe los efectos de turbulencia en el flujo y evite divergencias generadas por valores numéricos ilógicos que pueden generarse por el choque del flujo con las paredes. Para calcular adecuadamente este espacio se tuvo en cuenta:

1. Brindar espacio suficiente para que la disipación de la energía turbulenta se dé adecuadamente dado que se trabajó con una tasa baja para evitar divergencias (1%).
2. Proveer una altura suficiente para que nunca se llene totalmente el volumen del espacio computacional en caso de contar con errores que generen un volumen excesivo en el modelo.
3. Tener longitudes adecuadas para que el flujo se desarrolle.

Las dimensiones del dominio de control o del espacio computacional son presentadas en la Tabla 7. H_{comp} corresponde a la altura del espacio computacional y se calcula con un factor de seguridad de 2 a partir de la altura de la estructura y la lámina de agua máxima esperada sobre la cresta del vertedero. L_{in-out} corresponde a la longitud de entrada calculado a partir de los mismos parámetros con un factor de seguridad de 3.

Tabla 7. Cálculo del espacio computacional

H_d [m]	3.38
H [m]	7.50
H_t [m]	10.88
FS	2.00
Hcomp [m]	21.76
FS In-Out	3.00
L in-Out [m]	22.50

4. RESULTADOS

La modelación numérica tomó un tiempo de 17 días en los cuales se alcanzó a llenar al volumen que se encuentra antes del vertedero, se simuló una descarga de caudal y se generó un llenado medio del espacio antes del cuenco disipador, no se logró una generación considerable de la lámina de agua sobre el cuenco disipador, sin embargo, se alcanza a observar un inicio en el cambio del régimen del flujo en la zona de influencia antes del cuenco. Para este tiempo real, el tiempo que arrojó el programa en el cual los eventos descritos anteriormente se presentan es de 32.96 s, para este tiempo se tiene el modelo mostrado en las Figuras 6 y 7.

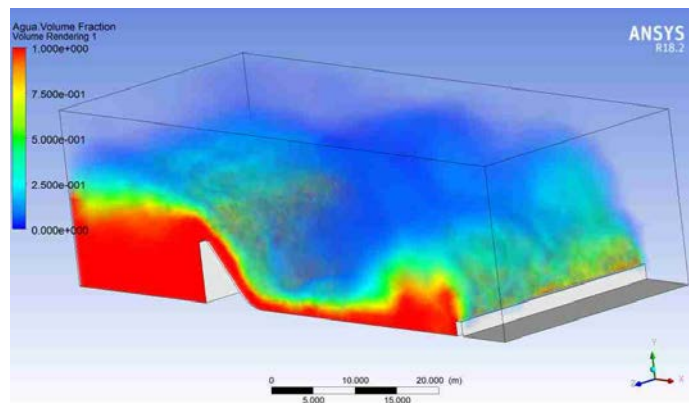


Figura 6. Flujo modelado en el vertedero 3D

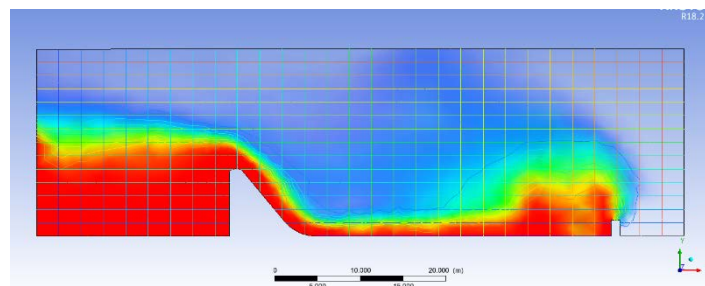


Figura 7. Perfil del flujo generado

Los colores en el modelo representan la densidad del flujo dado que el modelo considera el flujo mixto que se genera en la superficie libre donde hay una interfaz aire-agua. El color rojo representa 100% agua y el azul 100% aire (o 0% agua), mostrando la fuerza de arrastre que tiene el movimiento de la superficie libre del flujo que genera que el aire se mueva junto con este. La lámina de agua obtenida a lo largo de la estructura se presenta en la Figura 8.

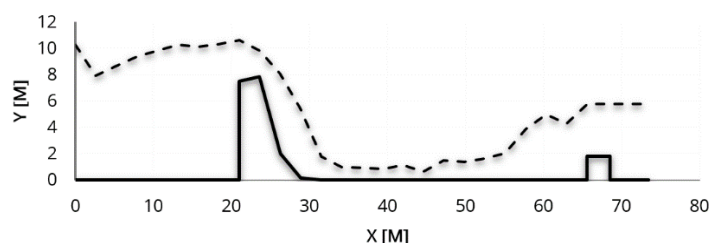


Figura 8. Lámina de agua a lo largo de la estructura

Las láminas de agua obtenidas en los puntos de control (zonas antes y después de la formación del resalto) se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros hidráulicos obtenidos

Q_d [m ³ /s]	431.19
Y_c [m]	2.32
V_c [m/s]	6.20
Y_1 [m]	1.01
V_1 [m/s]	14.23
Y_2 [m]	2.03
V_2 [m/s]	7.08
Y_3 [m]	3.97
V_3 [m/s]	3.62
H_d [m]	3.10

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos usando las ecuaciones matemáticas y simulaciones de elementos finitos son mostrados y comparados en la Tabla 9. Adicionalmente se evaluó el régimen y el comportamiento del flujo para ambos casos usando los números adimensionales de Reynolds (R_e) y Froude (F_r), presentados en las ecuaciones (1) y (2).

Tabla 9. Comparación de resultados

	Teoría			Modelo			Error (%)		
	Parámetros	F_r	R_e	Parámetros	F_r	R_e	Parámetros	F_r	R_e
Q_d [m ³ /s]	431.19	-	-	431.19	-	-	0	-	-
Y_c [m]	2.76	1.0	12527042.55	2.50	1.2	12233797.23	9.5	11.7	2.3
V_c [m/s]	5.41			5.75			6.2		
Y_1 [m]	1.04	4.5	13812080.58	1.01	4.5	13372946.75	3.1	1.1	3.2
V_1 [m/s]	14.30			14.23			0.5		
Y_2 [m]	6.00	0.3	10603835.65	2.03	1.6	12571616.54	66.2	79.5	18.6
V_2 [m/s]	2.49			7.08			64.8		
Y_3 [m]	3.56	0.7	11984005.17	3.97	0.6	11289086.23	11.4	18.2	5.8
V_3 [m/s]	4.19			3.62			13.7		
H_d [m]	3.38	-	-	3.10	-	-	8.3	-	-

Teóricamente se estima una lámina de agua sobre la cresta del vertedero para la condición máxima de diseño de 3.38m. Con el modelo de elementos finitos se obtuvo una lámina de agua de 3.1m, generando un error relativo de 8.3%.

El cambio en el régimen del flujo indicado por el punto de menor energía en este flujo crítico se presentó en el modelo un poco antes de la descarga por la rápida del vertedero como se espera, fue de 2.5m; teóricamente se espera que la lámina crítica sea de 2.76m para el caudal de diseño, con esto se obtuvo un error de 9.5%. Para un caudal solo existe una única condición crítica, evidentemente al hacer el cálculo del F_r para el resultado numérico se mostrará una condición supercrítica ($F_r > 1$) esto pudo haberse dado debido a que aguas abajo no se generó el fenómeno de resalto hidráulico, sin embargo, que la lámina de agua numérica sea menor a la crítica teórica solo indica que la condición crítica se presentó en un punto anterior al correspondiente.

Y_1 corresponde a la altura de lámina de agua que se produce, generalmente, justo después de la rápida del vertedero, aunque también corresponde a la altura de lámina de agua antes del resalto hidráulico. Teóricamente se esperaba una elevación de 1.04m, el resultado numérico fue de 1.01m con un error de 3.1%. Para ambas elevaciones se cumple la condición supercrítica y turbulenta con errores de 1.1% y 3.2% respectivamente.

Y_2 corresponde a la altura secuente de Y_1 que sería la lámina de agua que tiene igual energía en la condición subcrítica luego del resalto hidráulico. Como no se presentó el fenómeno no se obtuvo un resultado satisfactorio para esta condición.

Y_3 corresponde a la elevación de lámina de agua esperada sobre el cuenco disipador, es decir, es la lámina de agua con una energía tal que no se genera ningún daño al cauce natural al cual se le entrega el flujo. Para esta lamina el resultado numérico supera al teórico gracias al impacto del flujo con el cuenco generando una elevación brusca y el intento de formar un tipo de resalto inestable junto al cuenco que evidentemente será barrido una vez se eleve el flujo y pase por encima del cuenco. Numéricamente se obtuvo una lámina de 3.97m que comparada con la experimental (3.56m) se tiene un error del 11.4%, un valor que ya no es aceptable.

La generación de un resalto hidráulico requiere de varias condiciones de control como las que tiene el diseño, la ausencia de este indica que aún se requiere que el modelo continúe su ejecución durante mucho más tiempo, pero los resultados obtenidos hasta el momento son un indicativo de que se pueden obtener los resultados esperados teóricos, corroborando la efectividad del diseño.

6. CONCLUSIONES

En el caso de un modelo hidráulico es fundamental tener en cuenta toda la caracterización del flujo y del fluido para obtener resultados lo más exactos posibles a los que se obtendrían en la realidad, pero dada la complejidad de estos modelos siempre será necesario hacer simplificaciones que permitan acelerar el proceso de cálculo y disminuir el costo computacional sin perder demasiada precisión en los resultados, esto puede observarse en el tipo de ecuaciones que deben emplearse para describir el flujo y su condición turbulenta, que sin duda alguna es la que presenta el mayor reto a la hora de modelar un flujo sobre estructuras hidráulicas.

Los resultados obtenidos en el modelo se asemejan a los teóricos mostrando que el diseño desarrollado para este tipo de estructuras es adecuado y aproximado a los valores que uno esperaría observar en la realidad. A pesar de que no se llegó a obtener un resalto hidráulico, el comportamiento del flujo sobre la estructura y las láminas de agua obtenidas en los puntos de análisis demuestran que las condiciones en el modelo son adecuadas y se asemejan a las condiciones reales de flujo del mismo modo que las ecuaciones de diseño.

Para un análisis más profundo, influyendo energía de flujo y fuerza específica, es necesario permitir que el modelo se ejecute por mucho más tiempo, un estimativo podría ser dos semanas más de modelación puesto que la turbulencia generada en los resaltos no es fácil de describir.

La mayoría de los resultados obtenidos con el modelo son satisfactorios al presentar flujo turbulento en todo el recorrido como se espera, cambios en el régimen del flujo en los puntos de interés, láminas de agua con errores poco significativos como se muestra en la Tabla 9 en su mayoría y la presencia inicial de un resalto hidráulico con la llegada del flujo al cuenco disipador.

REFERENCIAS

- [1] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, 2006.
- [2] V. T. Chow. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill, 1994.
- [3] V. A. Guamán Sánchez, "Modelación numérica y experimental de un canal rectangular abierto con diferentes tipos de vertederos". Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [4] A. H. Otálora Carmona, "Modelación Numérica 3D con ANSYS-FLUENT del vertedero laberinto de la central Hidroeléctrica "La Naveta", en Apulo - Cundinamarca, a partir de un modelo Físico a Escala", Trabajo de grado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2016.
- [5] J. Chatila and M. Tabbara, "Computational modeling of flow over an ogee spillway", *Computers and Structures*, 82(22), 1805-1812, 2004.
- [6] H. Rahimzadeh, R. Maghsoodi, H. Sarkardeh and S. Tavakol. "Simulating flow over circular spillway by using different turbulence models", *Engineering applications of comput. fluid mechanics*, Vol 6, No.1, pp. 100-109, 2012.
- [7] J. P. Tullis, N. Amanian and D. Waldron, *Design of labyrinth spillways*, Press.
- [8] J. González y J. Flores, "Claves para la modelización 3-D de flujo sobre vertederos ortogonales. Contraste con resultados experimentales". Universidad de Castilla-La Mancha, 2011.
- [9] H. A. Rodríguez, *Hidráulica experimental*. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2001.

Caracterización de una turbina eólica de eje vertical tipo híbrida utilizando dinámica de fluidos computacional

Eric Felipe Muñoz García¹

Miguel Fernando Montoya Vallejo²

Nicolás Cuevas Carvajal³

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

En las últimas décadas la energía eólica ha generado mucho interés en la comunidad científica y, debido al calentamiento global y el cambio climático, se muestra como una alternativa limpia, renovable y con un impacto ambiental mínimo para la futura demanda energética mundial. Además, por su versatilidad y rendimiento suele tenerse en cuenta a la hora de evaluar métodos más económicos y sustentables, para suplir el déficit energético presente en zonas aisladas del planeta. En este estudio se realiza un análisis de la eficiencia que puede llegar a tener una turbina eólica de eje vertical tipo híbrida con resultados satisfactorios, que se podría estudiar la posibilidad de ser utilizada para contribuir a enfrentar los problemas energéticos futuros.

¹ Ingeniero Civil.

Contacto: eric.munoz@mail.escuelaing.edu.co

² Doctor en Ingeniería Mecánica.

Contacto: miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

³ Ingeniero Mecánico.

Contacto: nicolas.cuevas@mail.escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La constante evolución tecnológica de la humanidad desde la primera revolución industrial ha provocado que cada vez se requiera una mayor explotación de recursos naturales con el objetivo de lograr satisfacer la demanda global, no solo enfocada a la transformación de materias primas en bienes tecnológicos o de consumo que facilitan nuestras actividades cotidianas y le proporcionan calidad de vida a las personas, sino también a la generación eléctrica como servicio indispensable para el sostenimiento del nivel de vida actual.

Ahora bien, resulta un poco contradictorio el pensar que cada que aumenta la calidad de vida actual, se esta disminuyendo la calidad de vida que pueda tener la humanidad en el futuro. El posible agotamiento de los recursos y el calentamiento global, producto de la sobrepoblación y los métodos actuales de obtención de energía, es una realidad que pone en riesgo la existencia de la raza humana.

A pesar de que resulte inaudito pensar que en pleno siglo XXI aun existan millones de personas que no tienen acceso de ninguna manera a la energía eléctrica; ya que incluso diversos tratados internacionales lo consideran como un derecho fundamental para todas las personas, la realidad es que en muchos países es un privilegio el poder tener acceso al recurso.

Por este motivo, la comunidad científica junto con los gobiernos internacionales, se han puesto a la tarea de desarrollar diversas alternativas que además de lograr cumplir con la demanda energética global (tanto la actual como la futura), contribuyan con la disminución del acelerado aumento del calentamiento global. Las energías renovables, entre las que se destacan la energía eólica y la solar, son los principales candidatos para llevar a cabo el proyecto de renovación y ampliación de la red eléctrica mundial, la cual busca evitar la crisis energética global.

Actualmente, la energía eólica es la que mayor futuro y potencial posee debido a la relativamente alta eficiencia de las turbinas actuales. Lo anterior se puede evidenciar en diversos estudios que se encuentran en desarrollo que evalúan, diseñan y modifican los distintos tipos de turbinas, no solo con el objetivo de aumentar cada vez más su eficiencia, sino también el de crear modelos compactos que puedan suplir las necesidades energéticas de las comunidades aisladas.

Turbinas como las de eje vertical resultan ser prometedoras para entregar energía en lugares que se encuentren fuera del alcance de los sistemas interconectados de cada país, por sus dimensiones, versatilidad y bajo nivel de ruido.

2. MARCO CONCEPTUAL

La energía eléctrica ha sido uno de los descubrimientos más sobresalientes en toda la historia de la humanidad. Gracias a su implementación para consumo de forma masiva se ha logrado, en relativamente corto periodo de tiempo, impulsar el desarrollo de nuestra civilización hasta niveles que hasta hace unas décadas estaban fuera de toda lógica. El nivel tecnológico del que disfrutamos hoy en día ha ido de la mano con el amplio desarrollo de las formas en las que se genera y se distribuye la electricidad. Todos los avances en materia energética han permitido que millones de personas tengan acceso a este valioso servicio que se ha convertido en la herramienta más importante en mira hacia el futuro de un planeta interconectado y automatizado que día a día demandará cada vez más energía.

2.1 Panorama energético mundial

En el mundo existen diferentes formas de obtener energía, muchas de ellas eficientes, pero poco sustentables. Según un informe redactado en 2019 por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), en 2017 la humanidad generó 25.606 *TWh* de electricidad durante todo el año de los cuales más del 64% provenían de la quema de combustibles fósiles, el 15,9% de la energía hidráulica, el 10,3% de la energía nuclear y solo el 9% de fuentes renovables en las que se incluye la geotérmica, fotovoltaica y eólica, como se puede apreciar en la Figura 1 [1].

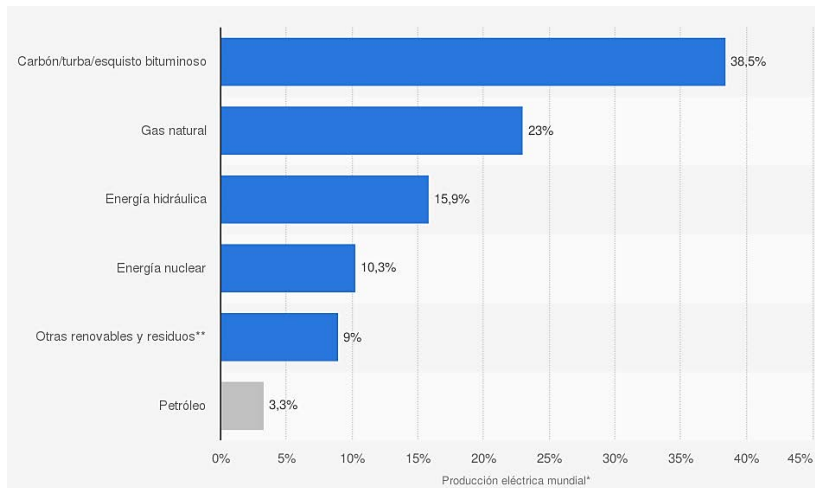


Figura 1. Distribución porcentual de la generación de electricidad en el mundo en 2017 por fuente de energía [2]

Como se mencionó con anterioridad, el panorama energético resulta poco alentador en términos ambientales. La humanidad depende casi en su totalidad de fuentes no renovables, contaminantes y peligrosas tanto para el planeta como para la propia salud de las personas. Además, el cambio climático que ha venido empeorando debido al gran nivel de emisiones de CO_2 , está llevando al límite el ingenio humano que se plantea evitar una gran crisis de cara al futuro.

Con las políticas actuales que regulan las emisiones y la manera en la que se produce energía, el nivel de emisiones crecerá de forma alarmante e incluso a un nivel superior que el de la demanda de energía, lo cual crea una gran preocupación en la comunidad científica en cuanto al cambio climático. Incluso con las nuevas regulaciones y objetivos que se plantean a largo plazo los países pertenecientes a la OECD, no será suficiente para frenar el acelerado incremento de las emisiones pronosticado para el 2040, como muestra la Figura 2.

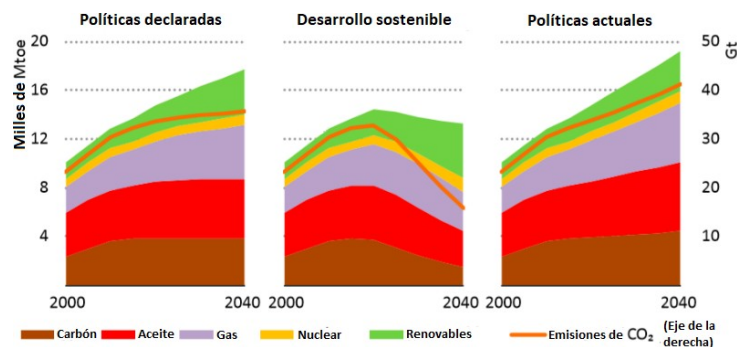


Figura 2. Demanda mundial de energía primaria por combustible y emisiones de CO_2 relacionadas por escenario [3]

2.2 Energías renovables en el mundo

Muchos países han empezado a apostar por energías renovables, adoptando políticas un poco más radicales y estrictas que llevan el desarrollo energético al siguiente nivel. La Energiewende alemana, por ejemplo, es un proyecto ambicioso que planea transformar la forma en la que Alemania genera y consume energía con objetivos muy concretos en el mediano y largo plazo, como la desmantelación completa de todas las centrales de energía nuclear antes de 2023 o que para el 2050 la matriz energética estará compuesta en un 80% por energías renovables, por medio de diversos planes de acción que ya se están llevando a cabo [4].

Como se puede observar en la Figura 3, actualmente Alemania tiene una capacidad instalada de 61,428GW de los cuales el 87,76% se genera en tierra (*onshore*) con 29.456 turbinas de eje horizontal y el 12,24% restante se genera en alta mar (*offshore*) con 1.469 turbinas de eje horizontal, siendo los parques marinos Gode Windfarm (fase 1 y 2) los más grandes del país con una capacidad combinada de 582MW. Todo lo anterior equivale a un 24,4% de participación en el mercado energético alemán [5], siendo así el país con la

capacidad eólica instalada más alta de Europa y el tercero a nivel mundial después de China y Estados Unidos [6]. Es importante resaltar que, en periodos de baja demanda energética, la generación eólica llega a suplir hasta el 50% de la electricidad consumida en Alemania, lo que indica que este tipo de energía se ha convertido en la más importante a nivel nacional [7].

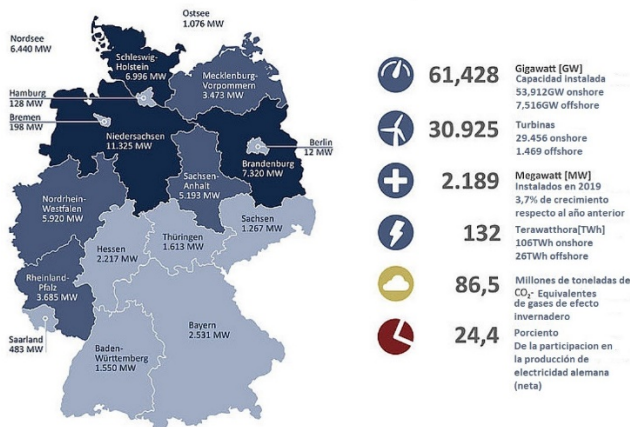


Figura 3. Capacidad Eólica instalada en Alemania por estado [5]

China por su parte, es el país con la mayor capacidad eólica instalada, la cual asciende hasta los 221GW, llegando a ser más de tres veces superior a la capacidad de Alemania. Además, cuenta con el parque eólico terrestre más grande del mundo ubicado en la provincia de Gansu con una capacidad de generar 7.965MW [8]. El segundo lugar en generación eólica lo ocupa Estados Unidos con 105GW equivalentes a poco más del 7% del suministro energético de la nación, con la operación de casi 60.000 turbinas y con la capacidad suficiente para suplir las necesidades energéticas de 32 millones de hogares, además se prevé la adición de otros 44GW de capacidad que se encuentran ya en construcción o en avanzadas etapas de desarrollo. El uso de este tipo de energía supuso una reducción de emisiones de carbono de 198 millones de toneladas métricas en Estados Unidos en el año 2019 [9].

Por otra parte, Brasil ocupa el cuarto puesto a nivel mundial y el primero en Latinoamérica en cuanto a capacidad instalada de energía eólica (16GW) provenientes de 7.700 turbinas ubicadas en 637 parques eólicos. Esto representa poco más del 9% de la capacidad total de energía eléctrica instalada de Brasil, el cual es considerado uno de los países con mayor dependencia de las energías renovables a nivel mundial, si se consideran también la energía proveniente de hidroeléctricas, ya que cerca del 75% de toda la energía del país procede de energía hidroeléctrica, eólica y solar [10].

2.3 Canasta energética colombiana

Colombia, al igual que Brasil, posee muchos recursos hídricos con potencial para producción hidroeléctrica y de hecho la energía hidráulica es la que mayor acogida tiene en el país. El sistema interconectado nacional tiene una capacidad efectiva neta de 17.462,34MW, de la cual poco más del 63% corresponde a las centrales hidroeléctricas y algo más del 29% corresponde a plantas térmicas [11].

El desarrollo en el país de las energías renovables (eólica y la solar) ha representado solo el 0,16% de su capacidad eléctrica. En el país, solo existe un parque eólico y está ubicado en la Guajira (Figura 4). El parque eólico Jeparachi cuenta con 15 aerogeneradores capaces de generar 1,3MW cada uno para un total de 19,5MW.

Por su ubicación en la península, los aerogeneradores están sometidos a vientos alisios con velocidades promedio de 9,8m/s, durante casi todo el año, lo que crea las condiciones idóneas para generación de este tipo de energía, permitiendo la planeación y desarrollo de otros proyectos [12].

Se estima que en Colombia cerca del 4% de los hogares colombianos no tiene servicio de energía, representando más de 490 mil viviendas, distribuidas en diversas zonas del país conocidas como zonas no interconectadas (ZNI), las cuales se caracterizan por tener recursos renovables [14].



Figura 4. Parque eólico Jepirachi, ubicado en el departamento de la Guajira [13]

Según el Atlas de Viento de Colombia, existen muchas zonas de Colombia con el potencial suficiente para la generación de energía eólica. Entre las zonas que más se presenta esta inexistencia del servicio eléctrico se encuentran Nariño, Valle del Cauca, Cauca; donde las velocidades del viento oscilan entre 2 y 8 m/s , la densidad de energía eólica llega a alcanzar hasta $1728 W/m^2$. Choco y la región de la Amazonia, alcanzan velocidades del viento entre 2 y 4 m/s , la densidad de energía eólica oscila entre 64 y $125 W/m^2$ y la radiación solar se encuentra entre 2,5 y 4 $kWh/m^2/día$. Algunas partes de la Orinoquia alcanzan velocidades de viento de hasta 7 m/s , con una densidad de energía eólica de hasta $512 W/m^2$ en diciembre, enero y febrero, y de $125 W/m^2$.

En la Guajira (departamento con mayor potencial de energías renovables), se presentan velocidades del viento que oscilan entre 7 y 11 m/s , con una densidad de energía eólica superior a los $1700 W/m^2$ y radiación solar entre 5 y 6 $kWh/m^2/día$; Bolívar y Magdalena, los cuales presentan escenarios similares que el departamento de la Guajira, con incluso un mayor potencial eólico *offshore* ya que en las cercanías de sus costas la densidad de energía eólica supera los $1728 W/m^2$. En conjunto, estas zonas representan más de 1400 localidades menores, corregimientos, centros poblados o caseríos que están fuera del alcance de Sistema Interconectado Nacional a pesar de tener las mejores condiciones para implementar los diferentes tipos de energía renovable [15, 16].

2.4 Turbinas eólicas de eje vertical

Una turbina eólica o aerogenerador es una máquina con la capacidad de transformar la energía cinética que posee el viento en energía mecánica que posteriormente puede o no ser transformada en energía eléctrica dependiendo de lo que se requiera o para lo que se haya diseñado la turbina. Partiendo de este hecho, tenemos que las turbinas de eje vertical poseen un rotor que gira de forma perpendicular al suelo. Ahora bien, como es sabido en el mundo predominan las turbinas de eje horizontal y esto se debe a que son las turbinas que han tenido mayor desarrollo a lo largo de la historia puesto que fueron inventadas mucho antes, además las turbinas de eje vertical presentan algunas fallas por fatiga debido a las cargas dinámicas a las que se someten los alabes y en algunos tipos se requiere de una ayuda externa para que estas puedan iniciar la rotación, hechos que aún se encuentran en estudio [18].

Las turbinas de eje vertical, por sus dimensiones relativamente compactas, pueden ser instaladas en cualquier lugar, incluso directamente en las terrazas de edificios. Este tipo de turbinas también son mucho más silenciosas que las convencionales, son omnidireccionales, lo cual indica que sin importar la dirección del viento van a mantener su rotación, aspecto que minimiza los costos de instalación y operación puesto que no se debe invertir en sistemas de control de seguimiento de las direcciones del viento. Otra importante ventaja es que son mucho más silenciosas y pueden ser instaladas en zonas urbanas sin ningún inconveniente [17]. Este tipo de turbinas funcionan gracias a la diferencia entre los coeficientes de arrastre que existen entre los alabes de la turbina, lo cual provoca que el rotor gire sobre su propio eje [18].

En líneas generales existen tres tipos de turbinas eólicas de eje vertical que son: Savonius, Darrieus y las híbridas. La turbina Savonius es la más sencilla en cuanto a diseño y construcción puesto que se trata de un cilindro hueco partido por la mitad, en el cual sus dos mitades son desplazadas para convertirse en una especie de S. Las partes cóncavas son las encargadas de captar el viento, mientras que los reversos presentan una menor resistencia al viento, lo cual hace que la turbina gire en el sentido que ofrece menor

resistencia. Este tipo de turbinas presentan un inconveniente debido a que el aire queda atrapado en el centro y genera una sobre presión que perjudica el rendimiento, esto se soluciona separando un poco más las palas y dejando un hueco entre ambas para permitir que el aire fluya. Es más común ver este tipo de soluciones en aplicaciones mecánicas puesto que es una turbina que gira a bajas revoluciones, por lo que en ocasiones es necesario utilizar multiplicadores de giro que afectarían la eficiencia y el rendimiento negativamente, están diseñadas para operar a bajas velocidades donde alcanzan un máximo de 200rpm [18].

Como se puede ver en la Figura 5, los parámetros de una turbina Savonius son la altura (H), el diámetro del rotor (D), también llamado razón de aspecto (a), el *overlap* (β) que en el caso de la figura está indicado con la letra e , a es el diámetro del eje, y d es el diámetro de la pala [19]. Muchas turbinas Savonius pueden tener tres o más palas e incluso pueden manejar más de un nivel de altura, además las palas pueden tener formas helicoidales con diferentes grados de inclinación, conocido como ángulo de *twists*, a las turbinas de este tipo se les conoce en algunos lugares como turbina *Windside*.

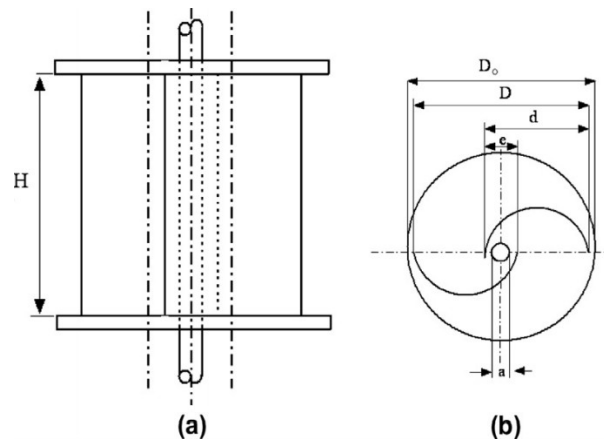


Figura 5. Esquema de un rotor Savonius de una etapa: (a) vista en alzado; (b) vista en planta [19]

La turbina tipo Darrieus se originó a partir del problema y los costos que representaba el diseño y la construcción de los complicados alabes para las turbinas de eje horizontal, como una solución un poco más rentable y de geometría más sencilla (figura 6), a pesar de que su diseño fue patentado por primera vez en 1939, no fue sino hasta la década de 1960 que se comenzó a fomentar la investigación y el desarrollo de este modelo [18].



Figura 6. Turbina *Dorier* Darrieus 55, ubicada en Alemania con una capacidad de generación de 55kW [20]

Las turbinas eólicas tipo Darrieus, son turbinas que permiten velocidades de rotación superiores a las turbinas Savonius, pero siguen sin superar las velocidades de las turbinas convencionales. El rotor consta de finos alabes con perfiles aerodinámicos similares a los de un ala de avión, las cuales son simétricas entre sí, y se encuentran unidas al eje central únicamente por los dos extremos (superior e inferior), con una curvatura especialmente diseñada para ofrecer el máximo rendimiento. Los modelos de curvas más

utilizados para los alabes se denominan como Troposkien, aunque también suele utilizarse la catenaria. Al presentar esta forma, los alabes experimentan una fuerza centrífuga durante la rotación, lo cual indica que únicamente trabajan a tensión haciendo más barata su fabricación [18]. Una importante dificultad que presentan estas turbinas es el hecho de que no pueden arrancar por sí mismas, lo cual obliga a tener un sistema de arranque secundario, aunque por la aerodinámica de los alabes una vez en funcionamiento puede mantener la rotación. Para solucionar este inconveniente, muchas veces se emplea el uso conjugado de rotores tipo Savonius para facilitar el arranque lo que convierte a la turbina en una híbrida [18].

Las turbinas híbridas (Figura 7), como se mencionó anteriormente, son la combinación de dos tipos de turbinas de eje vertical, una Savonius que puede tener una o más etapas y es la encargada de dar el arranque en bajas velocidades, y una turbina Darrieus que generalmente se emplea con configuración Giromill o Troposkien, que funcionan a una mayor velocidad, para así aprovechar mejor la fuerza del viento y cubrir un mayor rango de velocidades sin los inconvenientes de arranque [18].



Figura 7. Turbina híbrida eólica vertical DS300, con capacidad para generar 3kW de potencia, instalada cerca de una torre de telecomunicaciones a la cual le brinda energía con ayuda también de paneles solares [21]

3. MÉTODO

La dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* en inglés) es un área de las ciencias y la ingeniería, que combina las disciplinas de la mecánica de fluidos y el cálculo numérico, la cual trata acerca de la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, aeroacústica, entre otras. Las ecuaciones que describen el flujo de un fluido, conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, se utilizan para calcular sus propiedades y su comportamiento [22].

Dichas ecuaciones a pesar de no tener solución analítica son ampliamente utilizadas para aplicaciones CFD donde se pueden calcular o aproximar numéricamente por medio de algún método de discretización como el de las diferencias finitas, los elementos y los volúmenes finitos; con los cuales se busca intercambiar un dominio continuo por uno discreto, en el que la forma algebraica de la ecuación (1) de Navier-Stokes se resuelven para cada uno de los volúmenes de control, generando un sistema de ecuaciones [22]. Todas esas ecuaciones se resuelven por medio de un software de fluidodinámica computacional de apoyo que en este caso en concreto se trata de ANSYS Fluent.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint \gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

La principal ecuación solucionada vía Fluidodinámica Computacional es la ecuación de transporte para la variable de interés, representada por el símbolo ρ . Todas las ecuaciones de conservación solucionadas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen la forma anterior, con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Para representar diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación: la variable ρ , el coeficiente de difusión γ , y la fuente S [22].

3.1 Representación del modelo de turbina híbrida en 2D

Dada la complejidad geométrica de las turbinas híbridas, en el presente trabajo se modeló una turbina híbrida en dos dimensiones. El diseño se realiza en el módulo *DesingModeler* de ANSYS. Es necesario

especificar y generar las dimensiones del dominio de control sobre el cual se realizará la simulación. Las dimensiones de este van en función del diámetro mayor de la turbina exterior y fueron determinados con base en investigaciones previas realizadas por Hossein et al. [24] (Figuras 8 y 9).

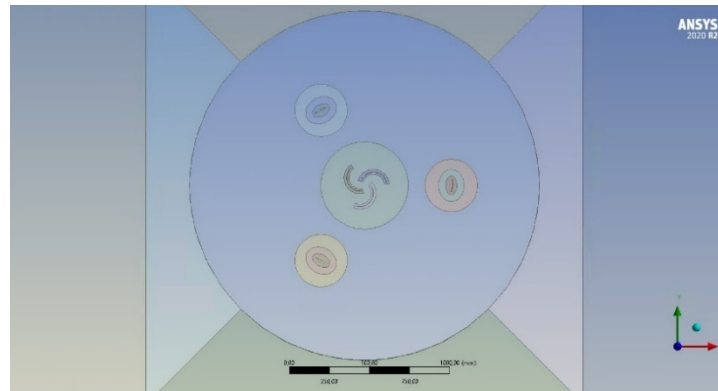


Figura 8. Diseño en dos dimensiones realizado en DesingModeler

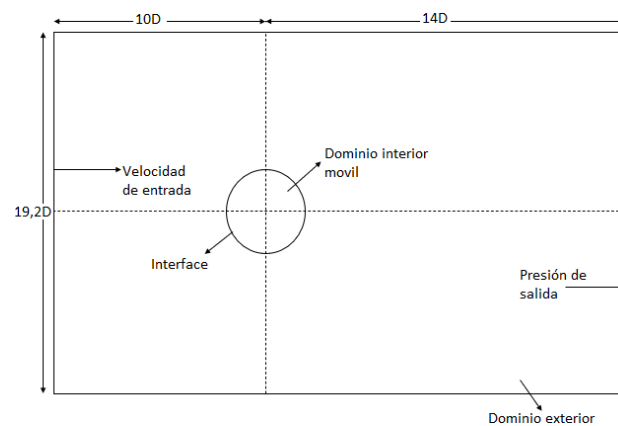


Figura 9. Dominio sobre el que se hará la simulación (Adaptado de Holssein et al. [24])

El dominio exterior tiene un ancho de 21 metros, con un largo de 26 metros, mientras que el dominio interior que abarca las turbinas tiene un diámetro de 2.2 metros. En la Tabla 1 se describen los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta para el diseño en dos dimensiones.

Tabla 1. Parámetros de diseño de la turbina híbrida

Rotor Darrieus	
Forma del álabe	Troposkien
Sección del perfil aerodinámico	n-10
Longitud de cuerda (mm)	86
Número de alabes	3
Rotor Savonius	
Espesor (mm)	1,5
Ángulo de extensión	143
Longitud de arco (mm)	419,3
Número de alabes	3

El método de los volúmenes finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares o *quad* en 2D o tetraédricos, hexas, prismas y otras en 3D, generando una malla. Dependiendo del tipo de elemento, de la capacidad computacional disponible y de la precisión que se quiera en la resolución del flujo, se tendrá que originar una malla con una buena discretización [23].

Dada la complejidad de la geometría de los alabes, se optó por una malla estructurada, con la cual es posible variar la metodología de mallado en diversas zonas de la geometría, con el objetivo de discretizar de la mejor manera posible con diversos tipos de elementos. Es importante resaltar que en las cercanías de los alabes resulta indispensable que los elementos tengan una calidad superior y un tamaño inferior, que crezcan de

manera exponencial a medida que se aleja de la superficie de estos (Figuras 10 a 12). Esto se conoce en ANSYS como inflar el método, y se realiza con el objetivo de que el programa tenga en cuenta la capa límite del fluido en aquellas zonas donde el flujo se ve interrumpido por la presencia de un sólido.

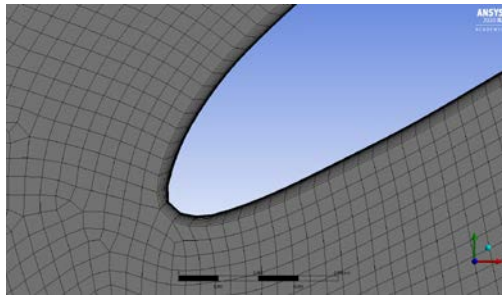


Figura 10. Mallado en las cercanías del borde de ataque de un alabe Darrieus

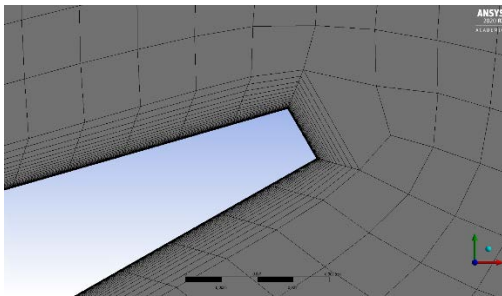


Figura 11. Mallado en las cercanías del borde de salida de un alabe Darrieus

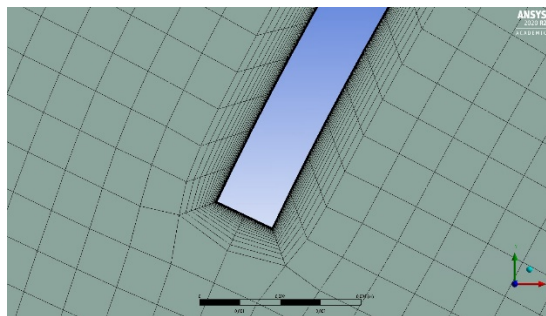


Figura 12. Mallado en las cercanías de un alabe Savonius

Una vez terminado el mallado se debe analizar la calidad del mallado principalmente en cuanto a la ortogonalidad y la oblicuidad, así como la cantidad de elementos que lo conforman, lo que dará una idea de la calidad de los resultados, además de la influencia que estos datos tienen en la duración del cálculo de la solución, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Estadística y métricas de malla

Nodos	1.016.839
Elementos	1.013.920
Oblicuidad (Skewness)	6,1071e-002
Ortogonalidad (Orthogonal Quality)	0,98072

Como se observa en la tabla anterior, a pesar de que, si existen algunos elementos de baja calidad, el promedio general de la malla es muy positivo ya que el valor de la ortogonalidad es mucho mejor a medida que se acerca a uno y por el contrario el valor de la oblicuidad es preferible que esté cerca a cero, y en ambos casos esta condición se cumple, concluyendo que la calidad del mallado es bastante aceptable.

Por otra parte, para facilitar un poco más la configuración de la simulación, es necesario indicar las diferentes zonas del volumen de control, como el *inlet* (ingreso del fluido), el *outlet* (salida del fluido), las fronteras de la turbina, así como las superficies que conforman tanto el dominio interior como el dominio exterior, además de las interfaces que se encuentran entre ambos dominios. Esto se realiza para que el programa reconozca la zona automáticamente y sepa cómo debe tratar cada zona en específico.

3.2 Análisis CFD

La modelación numérica de fluidos representa importantes desafíos principalmente a la hora de tratar con las variaciones caóticas que existen en las propiedades del flujo durante el análisis debido a la turbulencia. Este fenómeno, al ser inestable y difícil de caracterizar, requiere de modelos de cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales permiten ajustar el volumen de cálculos a realizar de acuerdo con la capacidad computacional disponible [25].

En CFD existen diversas técnicas que modelan la turbulencia mediante distintos enfoques. El Reynolds-Average Navier-Stokes conocido como modelo RANS es una de las técnicas más extendidas actualmente para la resolución de problemas de este tipo en ingeniería, ya que es una técnica que aporta resultados bastante aceptables con un bajo consumo computacional [25]. Los modelos RANS consisten en el promedio de las ecuaciones del fluido, donde se descomponen las variables de interés, sea la velocidad, la presión, entre otras, en un valor promedio y en una componente fluctuante, cuya aplicabilidad depende de la estabilidad de estos [25]. Las ecuaciones originales de Navier-Stokes se reformulan en función de las variables promedio, obteniendo un nuevo grupo de ecuaciones similares al conjunto original, pero con una variable adicional, por lo que se requiere un modelo adicional que permite cerrar el modelo RANS [27].

Actualmente existen diferentes métodos de solución para el RANS, entre los cuales se destaca el modelo K- ϵ , que es el que se aplicará en este estudio. Este modelo presenta dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo [26]. La primera variable de este modelo es la energía cinética turbulenta K (ecuación (2)), la cual determina la intensidad turbulenta, y la segunda variable representa la disipación turbulenta y se conoce como Epsilon o ϵ (ecuación (3)) [26].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3)$$

Con esto en mente, una vez importado el modelo discretizado a Fluent, se procede a establecer los parámetros de simulación teniendo en cuenta las condiciones promedio en las cuales operará la turbina. El viento se modela con una velocidad de 4m/s y a una temperatura de 15 °C. En la Tabla 3 se presentan los parámetros utilizados para configurar la simulación.

Tabla 3. Configuración de los parámetros para simulación

Parámetro	Valor
Velocidad de Entrada [m/s]	4
Relación de intensidad de turbulencia	0.05
Relación de viscosidad de turbulencia	10
Algoritmo de calculo	Couple
Densidad del fluido inicial [kg/m^3]	1.225
Temperatura del fluido [°C]	15
Modelo de viscosidad	k- ϵ
Orden de ecuaciones	Segundo orden
Condiciones de frontera	No deslizamiento

Es importante resaltar que en este punto también se debe establecer el modelo de malla deslizante, el cual permite la rotación del rotor de la turbina durante la simulación teniendo como marco de referencia el dominio exterior, de tal manera que se pueda analizar de forma transitoria las propiedades del fluido a medida que pasa a través de la turbina.

Durante el desarrollo de la simulación se puede observar la gráfica de convergencia de las distintas variables, donde es importante que estas tengan un residuo inferior a 1e-4 para considerar los datos como relevantes. Si alguna variable no se encuentra dentro de los valores aceptables sería necesario realizar modificaciones a la geometría, al volumen de control, a la malla o a la configuración de la propia simulación para corregir cualquier tipo de error.

Al tratarse de una simulación dinámica, es necesario indicar cuantas posiciones de la turbina se quieren analizar en cada rotación. Para este caso fue necesario analizar cincuenta posiciones por cada rotación, que, para un total de diez vueltas analizadas, son 500 posiciones durante cada simulación. Cada posición es separada de la anterior por 0.126 radianes que equivalen a poco más de 7° y una distancia recorrida de aproximadamente 68 milímetros en la turbina Darrieus y de 35 milímetros por la turbina Savonius.

Para el análisis de cada cambio de posición o time step, se indicó al programa que realizara 60 iteraciones, con el objetivo de que convergiera la solución y así mismo que la solución general fuera también acertada. Por ende, cada simulación requería de un máximo de 30000 iteraciones equivalentes en promedio a cerca de 20 horas de duración total.

3.3 Procesamiento de datos

Con el objetivo de completar la gráfica de coeficiente de potencia contra *tip speed ratio* (TSR), se deben realizar un total de 8 simulaciones variando en cada una de ellas la velocidad angular (ω) con la que debe rotar la turbina. Hay que tener en cuenta que la velocidad del viento (V_w) se mantiene fija y por medio de la ecuación característica de la TSR (ecuación (4)), se calcula la rotación.

$$TSR = \frac{\omega D}{2V_w} \quad (4)$$

Por otra parte, el coeficiente de potencia (C_p) puede calcularse mediante los resultados entregados por la simulación (ecuación (5)), en los cuales es evidente que se genera un momento en el eje de la turbina diferente en cada TSR.

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{viento}} = \frac{M\omega}{\frac{1}{2}\rho S V_m^3} \quad (5)$$

La variación de la velocidad de rotación de la turbina a una misma velocidad del viento se explica por la existencia de un generador que a medida que requiere más o menos potencia, la turbina va variando su velocidad. Para obtener una curva aceptable, los valores de TSR fueron aumentando 0.5 unidades. En la Tabla 4 se muestra como varía la velocidad de la turbina a medida que aumenta el TSR.

Tabla 4. Variación de la velocidad de rotación de la turbina de acuerdo con el TSR

TSR	Rad/s	RPM
1	7.33	69.96
1.5	10.99	104.94
2	14.65	139.92
2.5	18.32	174.90
3	21.98	209.87
3.5	25.64	244.85
4	29.30	279.83
4.5	32.97	314.81

La caracterización de la turbina se centra en hallar el promedio del torque generado por la turbina durante una rotación. Una vez obtenido el torque en cada punto de diseño se halla el coeficiente de torque (C_t) y por último el coeficiente de potencia (C_p) usando las ecuaciones (6) y (7) respectivamente.

$$C_t = \frac{4T}{\rho V_m^2 D^2 H} \quad (6)$$

$$C_p = TSR * C_t \quad (7)$$

La curva C_p contra TSR evalúa la fracción de potencia del viento que está siendo aprovechada por la turbina en distintas condiciones de operación, que dependen de la velocidad del viento y la velocidad con la que rota la turbina. Las curvas típicas relacionadas con las eficiencias están determinadas por una forma de campana como se puede observar en la Figura 13. Sin embargo, pueden presentar variaciones dependiendo de la configuración de la turbina.

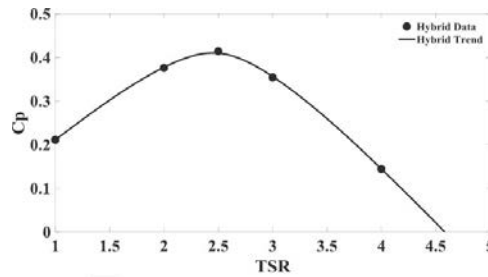


Figura 13. Gráfica de coeficiente de potencia contra TSR de una turbina híbrida [24]

La gráfica de la Figura 13 fue obtenida durante el desarrollo de un estudio realizado por Hossein et al. en donde se analizó una turbina híbrida que incluía una Darrieus tipo H de tres alabes y dos etapas, junto con ocho etapas de turbina Savonius de dos alabes cada una. La turbina tenía una altura total de tres metros y los estudios se realizaron con una velocidad de viento de 9 m/s^2 .

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez realizadas las ocho simulaciones, cada una manteniendo la velocidad de 4 m/s , pero variando la velocidad angular con la que rota la turbina según cada TSR, se obtuvieron imágenes (Figuras 14 a 17) de como interactuaba el flujo de aire sobre los alabes de la turbina.

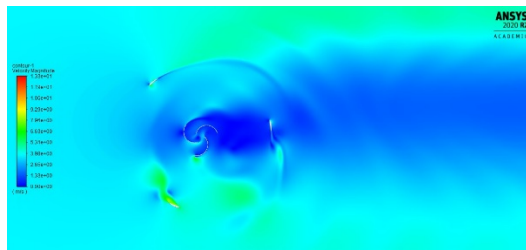


Figura 14. Interacción del fluido con la turbina híbrida con una TSR de 2

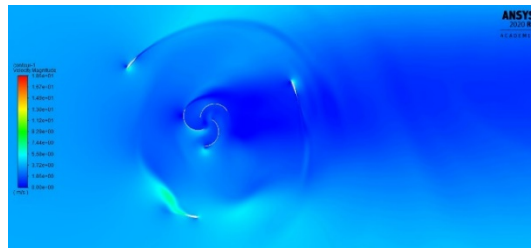


Figura 15. Interacción del fluido con la turbina híbrida con una TSR de 2,5.

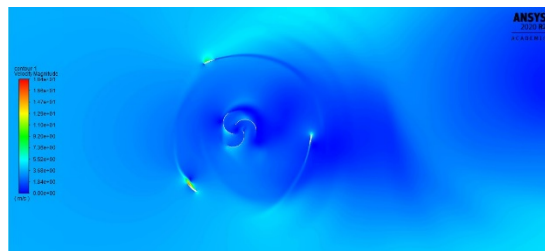


Figura 16. Interacción del fluido con la turbina híbrida con una TSR de 3

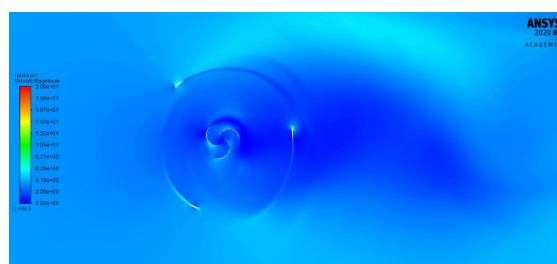


Figura 17. Interacción del fluido con la turbina híbrida con una TSR de 3,5

En las imágenes se evidencia como va cambiando la interacción del flujo, en el que a velocidades bajas se puede notar una alta resistencia con un flujo un poco más turbulento, en el que se visualiza que el perfil aerodinámico del álabe Darrieus no puede cumplir su función correctamente, evidenciándose desprendimiento de capa límite.

Sin embargo, a medida que aumenta el TSR y por ende la velocidad de rotación de la turbina, se puede observar como el álabe empieza a ser más eficiente. En la Figura 16, se puede deducir que los alabes alcanzan su eficiencia máxima de operación, ya que el trazado de la geometría es bastante uniforme, se puede notar una estela casi perfecta sin evidencias de desprendimiento de capa límite.

Por otra parte, en cuanto a los alabes Savonius, ocurre el fenómeno inverso, ya que a medida que aumenta la TSR se va perdiendo interacción del fluido con la superficie. Esto es algo que se espera, debido a que la turbina Savonius trabaja de una mejor manera con TSR bajos y la turbina Darrieus mejora su eficiencia con TSR un poco más altos.

Por otra parte, al evaluar los datos de la simulación se puede corroborar algunas de las afirmaciones realizadas con anterioridad, porque como se puede observar en las Figuras 18 y 19, cuando el TSR es bajo se muestra una gráfica bastante irregular donde el torque va variando en cuanto a su valor máximo y mínimo, teniendo también demasiados sobresaltos que no favorecerán a la eficiencia ni correcto funcionamiento de la turbina cuando se acople a un generador.

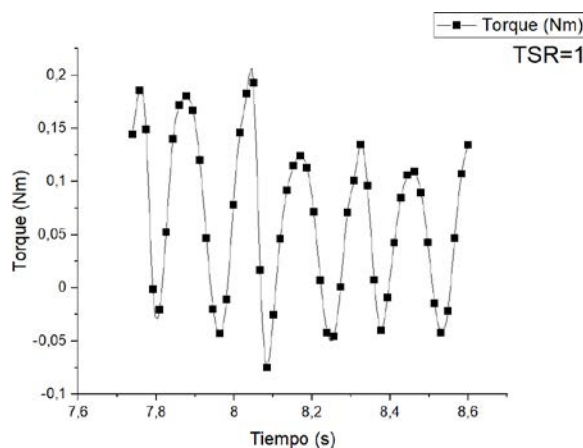


Figura 18. Comportamiento del torque a una TSR igual a 1

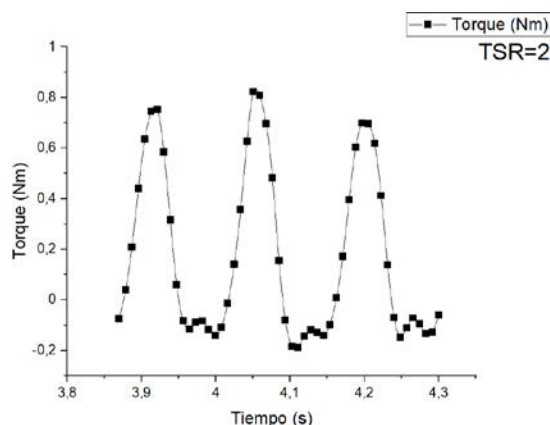


Figura 19. Comportamiento del torque a una TSR igual a 2

Ahora bien, cuando el TSR empieza a aumentar, el comportamiento del torque es más estable y se puede apreciar una tendencia sinusoidal en la que varía mínimamente entre el valor máximo y mínimo. También se puede observar en las Figuras 20 y 21, que los datos se distribuyen de una forma más uniforme haciendo que el valor promedio del torque este mucho más centrado en la gráfica, cosa que no pasa en las Figuras 18 y 19, donde se acumula una mayor cantidad de datos en la parte inferior, lo cual genera que la eficiencia en estos puntos sea muy baja como se puede apreciar en la Tabla 5.

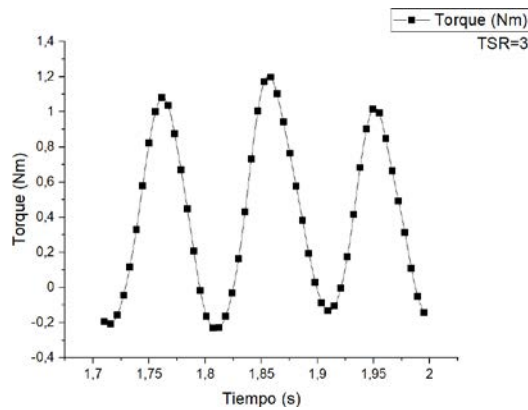


Figura 20. Comportamiento del torque a una TSR igual a 3

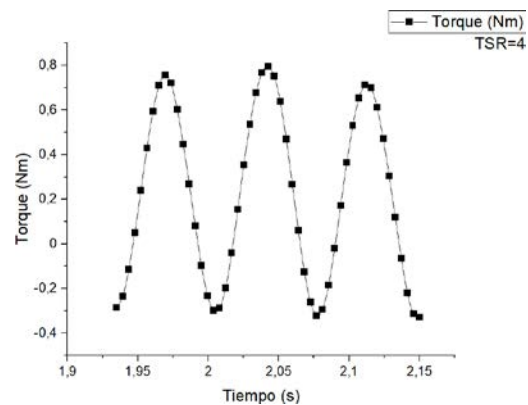


Figura 21. Comportamiento del torque a una TSR igual a 4

Tabla 5. Resultados de Torque y coeficiente de potencia por cada TSR

TSR	Torque	C_t	C_p
1	0,0647808	0,011086763	0,0110868
1.5	0,0782403	0,013390261	0,0200854
2	0,1743411	0,02983722	0,0596744
2.5	0,2976349	0,050938078	0,1273452
3	0,4021058	0,068817519	0,2064526
3.5	0,4360916	0,074633945	0,2612188
4	0,2174616	0,037216982	0,1488679
4.5	0,0403692	0,0069089	0,03109

El torque en este caso puede parecer bastante bajo, pero esto se debe a que las velocidades del viento son bajas. Esta velocidad se seleccionó puesto que el promedio de velocidad del viento en los lugares donde funcionaría la turbina es bajo. Sin embargo, esto supone una potencia máxima en estas condiciones de poco más de 11 vatios suficientes para algunas necesidades eléctricas básicas, sin embargo, al extrapolarlo a velocidades de viento superiores que se encuentran dentro de los rangos de Colombia puede alcanzar unos 60 vatios.

Como se puede observar en la gráfica de la Figura 22, la curva de eficiencia tiene forma de campana donde la eficiencia máxima esta sobre el 26%, lo cual se encuentra entre los rangos promedio aceptables de este tipo de turbinas. Cabe destacar que esta turbina estudiada es relativamente pequeña y muy compacta, lo cual también influye en la cantidad de potencia que puede generar, pero no demasiado en la eficiencia. Por ende, es posible escalar la turbina esperando obtener unos valores de eficiencia similares. Otros factores que si influyen en la eficiencia son: la cantidad de alabes por turbina, la cantidad de fases y por su puesto la geometría del perfil aerodinámico utilizado.

Es posible y necesario comparar los resultados de esta turbina con estudios realizados a turbinas similares, como por ejemplo la investigación de Wauki et al. [27], en la que utilizaban una turbina muy similar, cuya única diferencia radicaba en que solo presentaba dos alabes de cada tipo de turbina y el perfil utilizado era un NACA 0015. En dicho estudio se obtuvo una gráfica muy similar, la cual se puede apreciar en la Figura 23,

donde la eficiencia máxima presentada fue del 20%, es decir, es posible que el aumento de alabes influya de manera positiva en la cantidad de potencia que la turbina es capaz de extraer del viento.

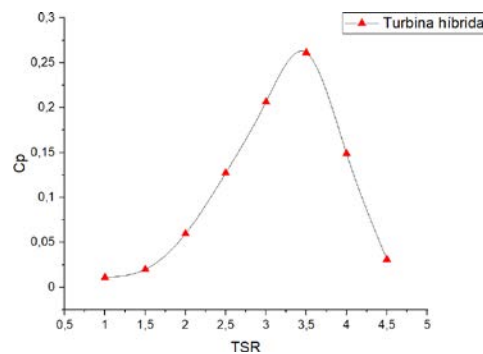


Figura 22. Resultados obtenidos de coeficiente de potencia en cada TSR

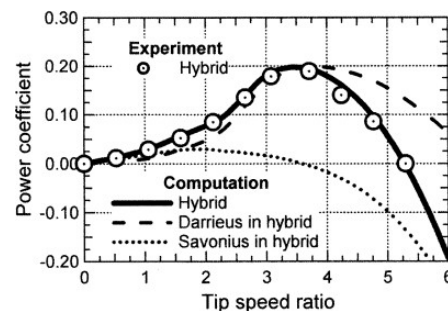


Figura 23. Resultados obtenidos de coeficiente de potencia en cada TSR por Wauki et al. [27]

Los resultados obtenidos son satisfactorios, a pesar de tener una eficiencia relativamente baja, si se compara con turbinas de eje horizontal (eficiencias alrededor del 20 al 30%), se encuentra dentro del rango promedio. Este valor de eficiencia podría aumentar si se agregan fases o cantidad de álabes como se ha visto en otros casos [24], donde se puede observar un valor máximo de eficiencia de alrededor del 40% (ver figura 13), aunque es un valor bastante distinto, esa turbina se evaluó a una velocidad del viento de 10m/s, además aquella turbina tenía dos fases de turbina Darrieus tipo H y ocho fases de rotores Savonius.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue caracterizar la eficiencia de una turbina híbrida compuesta por tres alabes Darrieus y dos fases de tres alabes Savonius utilizando dinámica de fluidos computacional, para ello se realizaron ocho simulaciones variando únicamente en cada una de ellas la velocidad con la que rotaba la turbina.

De la investigación se pudo evidenciar que la turbina se encuentra en el rango promedio de eficiencia aceptable. Además, también se demuestra que realmente la hibridación favorece únicamente a las turbinas Darrieus, ya que además de tener un mecanismo de arranque puede generar potencia en relaciones de velocidad más bajas.

Esta turbina es un dispositivo generador de baja potencia, que puede emplearse en numerosas aplicaciones básicas y muy sencillas de consumo energético. Resulta ser un buen candidato para contribuir con la disminución del porcentaje de familias que no tienen servicio eléctrico en sus hogares, al mismo tiempo que contribuye con el cuidado del medio ambiente.

Para continuar con la caracterización de la turbina también podría evaluarse el comportamiento de la curva de eficiencia a distintas velocidades, con el fin de analizar como varía la eficiencia y si cambia el comportamiento de la turbina en distintas condiciones de velocidad del viento.

En cuanto al balance general de la simulación, se descubrió que es muy importante tener muy claro que el tamaño del dominio influirá en los resultados. Durante la investigación fue necesario aumentar el tamaño

del dominio, ya que el que se utilizó inicialmente hacía que el cálculo de la continuidad generará un residuo que no se encontraban dentro de los valores aceptables y como consecuencia la solución no convergía, por ende, los resultados arrojaban datos que a la hora de ser graficados no tenían sentido.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "Key world energy statistics", 2019.
- [2] L. Fernandez, "Porcentaje de electricidad generada en el mundo por fuente energética 2017", *International Energy Agency*, 2020.
- [3] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2019", 2019.
- [4] I. Arraz, "La transición energética en Alemania: Energiewende 2016", *Icex.es*, 2016.
- [5] B. e.V., "Zahlen und Fakten BWE e.V.", *BWE e.V.*, 2021.
- [6] Ministerio federal de relaciones exteriores de Alemania, La Energiewende alemana, 2018.
- [7] S.F. Munguía, "La eólica genera el 50% de la electricidad alemana durante una semana", *Diario Renovables*, 2018.
- [8] "Los 10 primeros países del mundo por capacidad de energía eólica", *REVE*, 2019.
- [9] "Industria eólica de Estados Unidos supera los 100 GW en 2019", *World Energy Trade*, 2020.
- [10] "Geração e Energia Elétrica-Ministério de Minas e Energia. *Ministerio de Minas e Energia do Brasil*, 2020.
- [11] X.M S.A. E.S.P. Oferta de generación/Capacidad efectiva neta. Informe anual XM, 2019.
- [12] "Centrales de generación transmisión y distribución de energía de EPM", *Epm.com.co*, 2021.
- [13] D. Castaño, "Hasta ahora, en La Guajira solo opera desde 2003 el pequeño parque eólico Jepirachi, de EPM, de 20 megavatios". *El colombiano*, 2016.
- [14] J. Vivas, "El mapa de 1.710 poblados que aún se alumbran con velas en Colombia", *El Tiempo*, 2019.
- [15] J. Ruíz Murcia, J. Serna Cuenca and H. Zapata Lesmes, *Atlas de viento de Colombia*, 2017.
- [16] *Atlas de radiación solar de Colombia*. 2005.
- [17] S. Cáceres Luque, "Estudio y modelamiento de una turbina eólica de eje vertical de pequeña escala", Universidad de Chile, 2014.
- [18] J. Antezana Nuñez, "Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical", Universidad de Chile, 2004.
- [19] N. Mahmoud, A. El-Haroun, E. Wahba and M. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 51, no. 1, pp. 19-25, 2012.
- [20] S. Matysik, *Dornier Darrieus 55*. 2011.
- [21] *Turbina híbrida eólica vertical DS3000*. 2010.
- [22] E. ESSS, "Dinámica de Fluidos Computacional o CFD: entienda que es", *ESSS*, 2021.
- [23] R. Salcedo, A. Bayón and P. Chueca, "Introduciendo la dinámica de fluidos computacional en el análisis de flujos en medio poroso", *Modelling in Science Education and Learning*, vol. 10, no. 1, pp. 261 - 276, 2017.
- [24] A. Hosseini and N. Goudarzi, "Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems", *Energy Conversion and Management*, vol. 189, pp. 49-59, 2019.
- [25] Capote, J.A., Alvear, D., Abreu, O.V., Lázaro, M., Espina, P. "Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 24, no. 3, pp. 227-245, 2008.
- [26] L. López-Zamora and J. Muñoz-Cobo, "Estudio de la Turbulencia a través del Modelo k-epsilon, Mediante un Código Tridimensional con Esquemas de Alto Orden", *Información tecnológica*, vol. 15, no. 2, pp. 25 - 28, 2004.
- [27] T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume and T. Nagao, "Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 150, no. 4, pp. 13-22, 2005.

Sistema remoto de monitoreo de la conductividad eléctrica en un cultivo aeropónico

Jorge Mario Garzón González¹

Marisol Osorio Cárdenas²

Juan Camilo Acevedo Bedoya³

1, 3 Universidad Católica de Oriente

2 Universidad Pontificia Bolivariana

Colombia

La medición de la conductividad eléctrica CE en la solución nutritiva, que se suministra a las plantas en un cultivo aeropónico, permite conocer la concentración total de sales de manera que se pueda determinar la cantidad de nutrientes presentes en todo momento en la solución, para asegurar un desarrollo adecuado de las plantas. Una CE alta puede inducir toxicidad por salinidad, mientras que una CE baja viene acompañada de una deficiencia de macro y micronutrientes. En el presente trabajo los autores identificaron y experimentaron las ventajas del sistema remoto comparado con las mediciones manuales en campo. El sistema remoto permite conocer la CE de la solución nutritiva de manera regular durante todo el proceso de desarrollo de las plantas y facilita, tanto la toma de datos, como el registro de estos. Con el sistema implementado se pudo conocer en tiempo real cómo varían las concentraciones en la solución nutritiva de un cultivo de lechuga, para de esta manera determinar cuándo debe adicionarse agua o reponerse la solución nutritiva.

¹ Contacto: jgarzon@uco.edu.co

² Contacto: marisol.osorio@upb.edu.co

³ Contacto: jacevedo@uco.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos sin suelo, de los cuales los aeropónicos constituyen el desarrollo más reciente, son aquellos cuyo sistema radicular se desarrolla en un medio diferente al suelo, sus raíces crecen en la oscuridad y pasan la mayor parte del tiempo expuestas al aire. Poseen importantes ventajas sobre los cultivos tradicionales: ausencia de patógenos del suelo; los nutrientes y el agua se aplican de manera más uniforme a las plantas, lo que reduce el desperdicio y asegura una situación más cercana a las condiciones ideales de crecimiento; tienen la capacidad de aumentar el rendimiento, hasta alrededor de diez veces; existe la posibilidad de cultivar en invernadero, lo que asegura una mejor calidad del producto, permiten aprovechar espacios con suelos no cultivables y una mejora del rendimiento en los cultivos plantados durante la temporada de frío, debido a las temperaturas más altas en la raíz durante el día [1].

También se deben nombrar sus desventajas: dependen mucho de la disponibilidad de energía eléctrica, cortes de energía por periodos prolongados pueden conllevar pérdida total del ciclo de producción; se requiere personal con entrenamiento especializado; algunos materiales y equipos no se encuentran disponibles en algunos países; cualquier patógeno radicular se disemina rápidamente; y no funcionan bien en ambientes calientes, a no ser que se acondicionen costosos equipos de refrigeración, lo que aumenta los costos de producción [2].

En los sistemas aeropónicos se deben considerar diferentes aspectos, de modo que se potencien sus ventajas y se puedan paliar sus desventajas de la manera adecuada. La fertilización por medio del riego directo a las raíces, conocida como fertirrigación, debe ser permanente y periódica para mantener la demanda hídrica y nutritiva de las plantas, ya que la capacidad de retención de agua de las raíces en un cultivo aeropónico es muy baja. Por ello, el riego se debe hacer con una frecuencia que varía dependiendo de las necesidades de cada especie en los diferentes momentos del día y del año. Para determinar la frecuencia del riego se deben tener en cuenta tanto los requerimientos mínimos de nutrición como el nivel de concentración máxima de nutrientes, para evitar tanto la inanición, por defecto, como la intoxicación, por exceso, de nutrientes entregados a las plantas [3].

Para los cultivos aeropónicos se suele configurar un sistema cerrado de riego, en el cual la recirculación es continua, con pequeñas paradas para permitir una mejor aireación del sistema radicular [4]; a medida que las plantas absorben nutrientes se van acumulando iones en la solución restante, tales como sodio Na y cloro Cl, cuya concentración se controla añadiendo agua. Otro enfoque es dejar estos iones en la solución, sabiendo que no serán absorbidos por las plantas. Después de un período de uso, se produce una disminución progresiva de la conductividad eléctrica CE en la solución nutritiva, debida a la absorción natural de nutrientes por parte de las plantas. En ese momento, la solución debe ser reemplazada pues, por debajo de ciertos valores, la CE no puede ser corregida por inyección de agua o nutrientes y aparecen desequilibrios nutricionales en las plantas. En ese momento, la solución debe ser reemplazada [5].

En los sistemas aeropónicos simples, se toman regularmente medidas manuales usando un conductímetro, lo que le permite al agrónomo tomar decisiones para mantener constante la calidad en la solución nutritiva y por ende del cultivo. Para medir la composición de la solución nutritiva, en sistemas aeropónicos más complejos o en otras aplicaciones, se utilizan diferentes tipos de dispositivos, tales como lenguas electrónicas [6], electrodos selectivos de iones para calcio, celdas de conductividad [7], sensores fabricados a la medida [8] y sensores todo en uno [9], entre otros.

Estos sensores se comunican de forma constante con dispositivos inteligentes, como pueden ser un sistema microcontrolado [10], un Programmable Logic Controller PLC [11], un *data logger* [12], o un computador [13], dispositivos que, a su vez, por medio de un algoritmo de control, mantienen constante la CE a través de la inyección de nutrientes.

Por lo anterior, es de interés comparar los resultados de realizar mediciones manuales en campo con respecto a un monitoreo remoto y automático de la CE. La supervisión remota permite verificar en tiempo real cómo varía la concentración de nutrientes en la solución, con el fin de determinar de forma efectiva y oportuna cuándo se debe adicionar agua o reponerse la solución nutritiva.

Para realizar la comparación se desarrolló el sistema remoto de monitoreo que se describe posteriormente en este texto. Este desarrollo da pie a la futura implementación de un sistema de control que regule la cantidad de nutrientes para cada etapa de crecimiento de las plantas en diferentes especies que puedan ser cultivadas en sistemas aeropónicos. En este trabajo en particular, el desarrollo del sistema remoto de monitoreo permitió el estudio de las ventajas que tiene su implementación con respecto a las medidas manuales.

2. MÉTODO

2.1 Localización del sitio

El sistema aeropónico en donde se realizó el trabajo está ubicado en un invernadero de la Universidad Católica de Oriente, en el municipio de Rionegro, Colombia (679868.04 m N; 459607.51 m E), ciudad del oriente de Antioquia ubicada a 2100 m s. n. m., con temperatura media anual de 18 °C, humedad relativa del 87% y una precipitación anual promedio que oscila entre 1800 y 2500 mm.

2.2 Conductividad eléctrica CE

Se utiliza la medición de la CE para conocer la calidad de la solución nutritiva en un cultivo aeropónico, ya que ésta se relaciona directamente con el total de sólidos disueltos TDS en el agua, y por ende con la concentración total de sales para alimentar las plantas, por medio de la ecuación (1); donde el TDS está en mg l^{-1} y la CE en $\mu\text{S cm}^{-1}$, la constante K es típicamente 0.7 [14].

$$TDS = K * CE \quad (1)$$

2.3 Sistema aeropónico

Un sistema aeropónico es básicamente un sistema hidráulico cerrado, como el que se muestra en la Figura 1, y lo componen: una bomba eléctrica, que es la encargada de poner a circular la solución nutritiva desde un tanque; válvulas de paso, para permitir o no el riego en las camas aeropónicas; nebulizadores, que distribuidos en líneas de riego paralelas se encargan de asperjar las raíces de las plantas; y un temporizador, que se programa para los diferentes ciclos de riego en el cultivo.

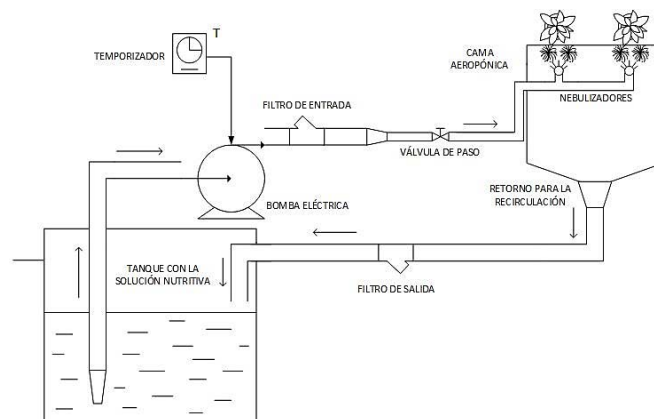


Figura 1. Sistema aeropónico

El sistema monitoreado consta de una cama aeropónica de 9 m de largo x 1 m de ancho y 80 cm de alto, equipada con dos líneas de riego de 16 mm con nebulizadores *Green Mix* con capacidad individual de 20 galones por hora, a una distancia de 70 cm el uno del otro, como se puede ver en la Figura 2.

Uno de los elementos más importantes es el temporizador, que es el encargado de activar el riego en el sistema aeropónico; se consiguen en el mercado temporizadores (*Timer*) que manejan una salida, o sea que se requiere uno para cada ciclo de riego, uno diurno y otro nocturno, esto debido a que las frecuencias de riego de día y de noche deben ser diferentes debido a los cambios en temperatura y humedad en el ambiente, así como a las variaciones en el metabolismo de las plantas.



Figura 2. Cama aeropónica

Para este trabajo, en vez de utilizar dos temporizadores, se diseñó un sistema embebido, compuesto por un microcontrolador PIC16F628A y un Reloj de Tiempo Real RTC referencia DS1307, que se puede programar para controlar automáticamente diferentes y múltiples ciclos de riego según las necesidades del usuario y del cultivo.

Para controlar el riego desde el sistema embebido, se utiliza un módulo de relés como interface de acople para energizar el contactor electromagnético que activa la bomba eléctrica (motobomba); el esquema de conexión ilustrado en la Figura 3, muestra los componentes mencionados y la forma cómo desde la salida digital del microcontrolador se controla una carga de corriente alterna como lo es la motobomba.

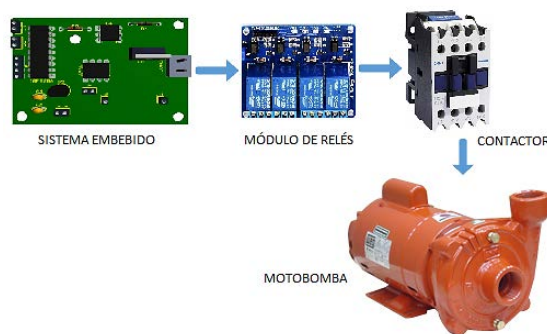


Figura 3. Sistema de fertirrigación

2.4 Sistema remoto de monitoreo

El sistema remoto de monitoreo de la CE que se implementó está compuesto por un sensor de CE, un computador de placa reducida y un modem WiFi. En la Figura 4 se muestra un esquema completo de conexión de los dispositivos mencionados y de algunos elementos auxiliares.

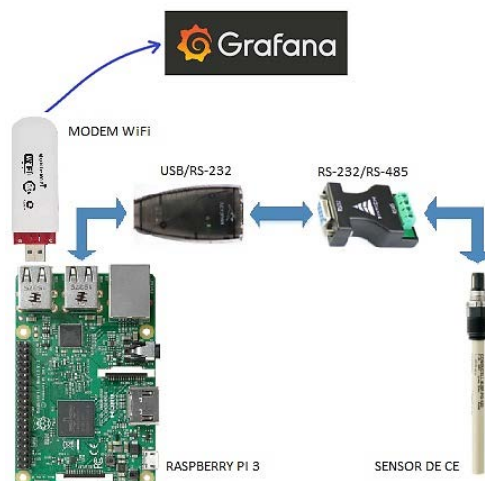


Figura 4. Sistema remoto de monitoreo de la CE

Para medir la CE se utilizó un sensor de la empresa Hamilton, que mediante un microprocesador incorporado, permite la comunicación directa con una computadora a través de señales digitales; se utilizó la referencia Conducell 4USF, que tiene entre sus principales ventajas muy buena linealidad, estabilización de valores de forma instantánea, baja desviación y respuesta rápida; además, mide también temperatura y utiliza el protocolo de comunicación Modbus RTU, lo que permite, bajo una red RS-485 en modo Maestro/Esclavo, la configuración general, el ajuste y la toma de datos remota a través de un par de hilos de cobre entre el sensor y un sistema inteligente. Para la calibración inicial del sensor y las mediciones manuales periódicas, se utilizó un multimedidor portátil marca Hach, modelo HQ40d, el cual se utiliza para mediciones en campo de la calidad del agua en proyectos de consultoría de la Unidad de Gestión Ambiental de la Universidad Católica de Oriente, y que es enviado periódicamente a calibración a un laboratorio certificado.

Para tratar los datos proporcionados por el sensor de CE se utiliza como Maestro un computador de placa reducida Raspberry Pi 3, dispositivo que cuenta con cuatro puertos USB y que se usan en este caso para la comunicación con el sensor, a través de un par de conversores RS-485/RS-232 y RS-232/USB, y para el envío de datos a internet usando para ello un modem WiFi.

Para disponer de los datos se usó la plataforma Grafana, que es un software libre basado en la licencia de Apache 2.0, que permite crear cuadros de mando y gráficos a partir de múltiples fuentes, como, por ejemplo, datos de sensores conectados a cualquier sistema embebido con acceso a internet; se puede configurar el tipo de gráfica para cada variable medida. También se pueden exportar los datos almacenados para, posteriormente, ser analizados. Los datos de CE y temperatura, aportados por el sensor Conducell 4USF, se almacenan inicialmente en una memoria SD incorporada en la Raspberry Pi 3 y posteriormente son enviados a la plataforma Grafana a través del modem WiFi; los datos de las mediciones manuales de CE, tomadas semanalmente usando el multimedidor portátil Hach ya mencionado, se cotejaron con los valores enviados por el sistema remoto de monitoreo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Cultivo monitoreado

El sistema se probó por medio de mediciones de CE en un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) que fueron trasplantadas al sistema aeropónico y a las que durante los primeros tres días se aplicó agua sin nutrientes para retirar el sustrato proveniente del periodo de enraizamiento. Cuando esto fue verificado, se comenzó su fertilización con la solución nutritiva según lo especificado por la literatura [15] a través del sistema de fertirrigación diseñado. Se muestra en la Figura 5 la cama aeropónica cultivada con la lechuga, en donde se pudieron comparar las mediciones manuales respecto a las tomadas por el sistema remoto de monitoreo.



Figura 5. Cama cultivada con lechuga

3.2 Comportamiento de la CE

El comportamiento en el tiempo de la CE y de la temperatura en la solución nutritiva en el cultivo aeropónico, monitoreado desde la plataforma Grafana, se ve en la Figura 6; en ésta se pueden observar los valores máximos (en un lapso que puede ser configurado), los dos últimos valores recibidos y las gráficas en tiempo real del comportamiento de las variables configuradas en la plataforma.

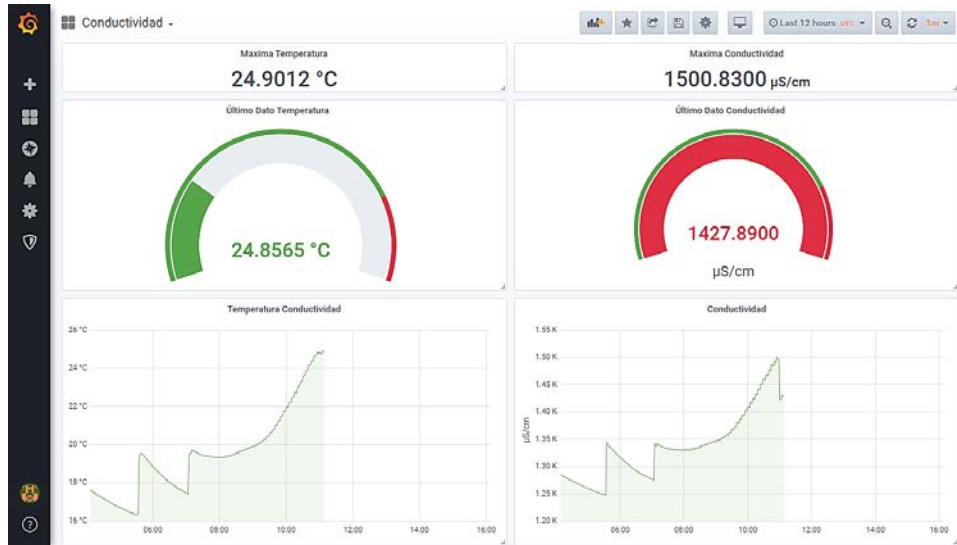


Figura 6. Datos de CE y temperatura en Grafana

Para un cultivo aeropónico de lechuga se recomienda mantener la CE alrededor de $1800 \mu\text{S cm}^{-1}$, para evitar toxicidad por salinidad, y no permitir que baje de $800 \mu\text{S cm}^{-1}$, ya que habría una deficiencia de macro y micronutrientes. Teniendo en cuenta lo anterior, cuando se da una disminución de la CE, como se ve en la Figura 7, se debe reponer la solución nutritiva.

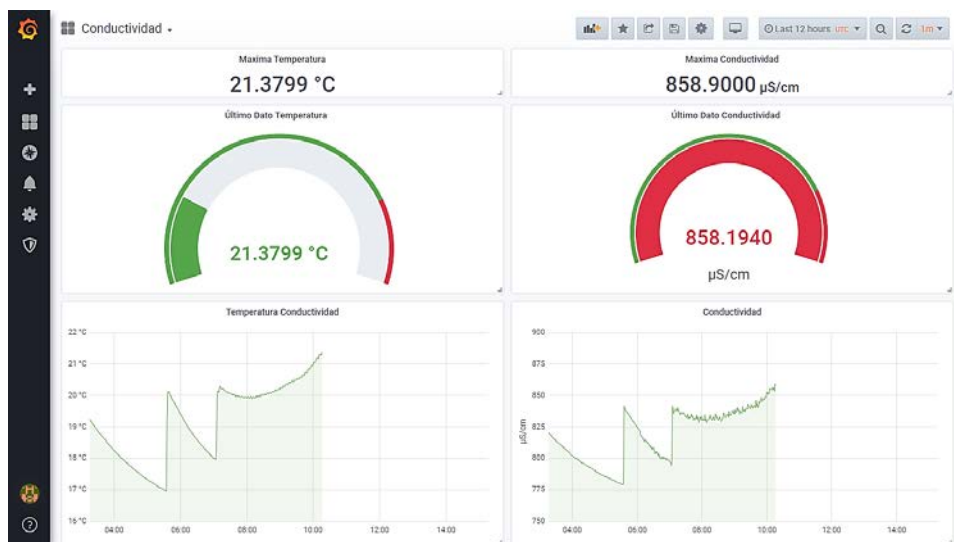


Figura 7. Baja CE en la solución nutritiva

A medida que las plantas crecen, van absorbiendo solución nutritiva y considerando que otra parte de ésta se evapora, llega un momento en que el nivel en el tanque que la contiene disminuye hasta casi agotarse, lo que indica que se debe adicionar agua ya que el riego se debe garantizar, pero se debe vigilar que la CE se mantenga entre los valores recomendados, lo cual puede ser verificado permanentemente por medio del sistema de monitoreo, y evitar así que la CE esté por debajo del valor recomendado.

Se verificó el desempeño del sistema de monitoreo de forma manual, usando el multimetro portátil Hach, lo que permitió evidenciar una adecuada correspondencia entre medidas. Es de anotar que cada vez que se realiza una medida manual, se requiere desplazamiento hasta el invernadero, la asignación de una hora

semanal de trabajo para la labor, y contar con la disponibilidad de un equipo que es utilizado por varias unidades académicas dentro de la institución.

Para un cultivo más grande, con fines de explotación comercial, el costo del monitoreo manual podría ser significativo, ya que se deben tomar medidas con mayor frecuencia. Los costos asociados al salario de la persona que tomará la medida, considerando una hora diaria para esta labor, y a la disponibilidad del equipo de medición, permiten establecer que la inversión realizada en el sistema remoto de monitoreo implementado podría ser recuperada a mediano plazo.

Después de seis semanas de trasplantadas las lechugas, se observa un desarrollo completo de algunas de ellas en el cultivo aeropónico, como se ve en la Figura 8, validando así, el manejo adecuado de los niveles de concentración de nutrientes a través del monitoreo de la CE.



Figura 8. Cultivo de lechuga después de seis semanas

4. CONCLUSIONES

Con el sistema remoto de monitoreo desarrollado se conoce cómo varía la conductividad eléctrica en la solución nutritiva de un cultivo aeropónico desde cualquier dispositivo que tenga acceso a internet a través de la plataforma Grafana, permitiendo a los administradores del cultivo un seguimiento más estricto sobre la producción y un mejor control de los niveles de CE, comparado con las mediciones periódicas manuales que harían los agrónomos para conocer el estado general del cultivo.

La plataforma usada para la adquisición de los datos desde el sensor de conductividad eléctrica, el computador de placa reducida Raspberry Pi 3, puede procesar la información de otros sensores que puedan necesitarse a futuro, como de pH, de oxígeno disuelto, entre otros; además, se le podría instalar una cámara web para almacenar imágenes del comportamiento del cultivo aeropónico.

La medición de la conductividad eléctrica es importante en la medida en que se pueda mantener en los niveles deseados, de modo que no se vaya a presentar toxicidad en las plantas o un déficit de nutrientes que no potencien su crecimiento adecuado, para ello hace falta un conocimiento más profundo de cuáles son esos niveles para cada especie en los diferentes momentos del año.

REFERENCIAS

- [1] P. A. Putra and H. Yuliando, "Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review," *Agric. Agric. Sci. Procedia*, vol. 3, no. 0, pp. 283–288, 2015.
- [2] V. Otazu, "Manual on quality seed potato production using aeroponics," *Int. potato Cent. (CIP). Lima, Peru*. 2010.
- [3] H.-P. Kläring, "Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops. A review," *Agronomie*, vol. 21, no. 4, pp. 311–321, 2001.
- [4] D. Savvas and G. Manos, "Automated Composition Control of Nutrient Solution in Closed Soilless Culture Systems," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 73, no. 1, pp. 29–33, 1999.
- [5] C. Lykas, N. Katsoulas, P. Giaglaras, and C. Kittas, "Electrical Conductivity and pH Prediction in a Recirculated Nutrient Solution of a Greenhouse Soilless Rose Crop," *J. Plant Nutr.*, vol. 29, no. 9, pp. 1585–1599, 2006.
- [6] M. Gutiérrez, S. Alegret, R. Cáceres, J. Casadesús, O. Marfà, and M. del Valle, "Nutrient Solution Monitoring in Greenhouse Cultivation Employing a Potentiometric Electronic Tongue," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 56, no. 6, pp. 1810–1817, 2008.

- [7] M. Darder *et al.*, "Multisensor device based on Case-Based Reasoning (CBR) for monitoring nutrient solutions in fertigation," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 135, pp. 530–536, 2009.
- [8] M. H. Banna, H. Najjaran, R. Sadiq, S. A. Imran, M. J. Rodriguez, and M. Hoorfar, "Miniaturized water quality monitoring pH and conductivity sensors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 193, no. 0, pp. 434–441, Mar. 2014.
- [9] R. Valdés, J. Miralles, J. A. Franco, M. J. Sánchez-Blanco, and S. Bañón, "Using soil bulk electrical conductivity to manage saline irrigation in the production of potted poinsettia," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 170, no. 0, pp. 1–7, 2014.
- [10] I. Idris and M. I. Sani, "Monitoring and control of aeroponic growing system for potato production," in *Control, Systems & Industrial Informatics (ICCSII), 2012 IEEE Conference on*, 2012, pp. 120–125.
- [11] R. Bayindir and Y. Cetinceviz, "A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants - An experimental setup," *Trans.*, vol. 50, no. 2, pp. 321–328, 2011.
- [12] T. Helmer, D. L. Ehret, and S. Bittman, "CropAssist, an automated system for direct measurement of greenhouse tomato growth and water use," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 48, no. 3, pp. 198–215, 2005.
- [13] D. S. Domingues, H. W. Takahashi, C. A. P. Camara, and S. L. Nixdorf, "Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 84, no. 0, pp. 53–61, 2012.
- [14] N. R. G. Walton, "Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids—What is Their Precise Relationship?," *Desalination*, vol. 72, no. 3, pp. 275–292, 1989.
- [15] D. R. Hoagland and D. I. Arnon, "The water-culture method for growing plants without soil.," *Circ. Calif. Agric. Exp. Stn.*, vol. 347, no. 2nd edit, p. 32 pp., 1950.

Controlador PID con autoajuste difuso para un regulador de voltaje DC-DC *boost* aplicado a generadores fotovoltaico

Rafael Augusto Núñez Rodríguez¹

Carlos Lizardo Corzo Ruíz²

Jeison Marín Alfonso³

Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

En este capítulo se propone un controlador proporcional integral con mecanismo de autoajuste basado en lógica difusa FPI aplicado a un convertidor DC-DC Boost en modo de conducción continua, como regulador de voltaje para un generador fotovoltaico PV-UD190HA6 190 Wp. De igual forma, el controlador propuesto busca mitigar los efectos de la variación paramétrica del convertidor, perturbación de carga del regulador y compensación por cambios de voltaje en el generador fotovoltaico. El controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso se diseñó de acuerdo con las especificaciones de desempeño que sintonizan los parámetros de la ley de control, a partir de un sistema de inferencia difusa estructurado en Matlab® Fuzzy Logic Toolbox y la medición del error durante la respuesta transitoria acorde a la dinámica del regulador. El controlador se diseñó en el entorno de Matlab® Simulink y Simscape Toolbox con base en técnicas para modelar sistemas físicos. El esquema propuesto muestra un comportamiento robusto del voltaje de salida del regulador ante los cambios en la impedancia de carga, y la variación del punto de operación del convertidor debido a la variación en la irradiación y la temperatura del generador fotovoltaico. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas mostraron que la respuesta dinámica del controlador PID con mecanismo de autoajuste difuso mejoró el tiempo de establecimiento para el seguimiento de referencia en un 23% y el sobrepaso debido a perturbaciones de carga en un 10%, respecto a un controlador PID convencional.

¹ Contacto: rrodriguez@correo.uts.edu.co

² Contacto: ccorzo@correo.uts.edu.co

³ Contacto: jmarin@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento adecuado de los generadores fotovoltaicos está ligado a las condiciones ambientales, además de la eficiencia del regulador, especialmente el algoritmo de control que calcula el ciclo de conmutación del convertidor para mantener la tensión de salida en un rango aceptable [1]. Con miras a incrementar la eficiencia de los convertidores DC-DC utilizados como reguladores de voltaje, se han estudiado e implementado diferentes técnicas de control, tanto lineal como no lineal, para convertidores DC-DC Boost, a partir de técnicas de control predictivo [2], control robusto predictivo por modelo continuo [3], incluso, técnicas de control predictivo por modelo interno contemplando en el proceso de diseño la dinámica de fase no mínima del convertidor DC-DC Boost [4].

De igual forma, se han desarrollado técnicas de control robusto basado en la norma H infinito [5], modos deslizantes [6], y estrategias con lazos en cascada que buscan mejorar el desempeño del convertidor [7], lo cual permite un seguimiento robusto de voltaje de referencia bajo un amplio rango en condiciones de alta incertidumbre paramétrica. Otras especificaciones de desempeño para convertidores DC-DC Boost se han tomado como referencia para el diseño de estrategias de control, tales como técnicas de modulación de anchura de pulso y modulación de frecuencia [8], algoritmos de seguimiento de referencia a partir de filtros pasa bajos variable en el tiempo y un observador de perturbaciones [9], lo cual permite, además de mejorar el desempeño robusto del sistema, mejora el seguimiento de la señal de referencia [10], con un incremento en la densidad de potencia y reducción de pérdidas por conmutación.

A pesar de los buenos resultados de estas técnicas de control, una limitación es la complejidad de su implementación dado que son funciones de orden superior con un ancho de banda muy amplio, aspectos críticos a la hora de implementar un algoritmo de control en un procesador digital [11]. Por otra parte, en condiciones normales de funcionamiento, un convertidor DC-DC Boost presenta una elevada incertidumbre paramétrica, está sometido a perturbaciones de carga, ya sean de la entrada o a la salida y, además, presenta un comportamiento no lineal en el rango de operación [12]. Es así que muchas de las técnicas de control que se han desarrollado están orientadas a mitigar los efectos de las condiciones normales de operación del sistema, por esta razón, en este artículo se propone el diseño de un controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso para un convertidor DC-DC Boost, utilizando técnicas de diseño basado en modelo en el entorno de Simulink de Matlab® con la *Simscape Toolbox*, a fin de regular el voltaje suministrado por un generador fotovoltaico de 190 Wp.

Para implementar el controlador, se formuló el modelo matemático en espacio de estado linealizado que describe la dinámica del voltaje de salida del convertidor en función del ciclo de trabajo de la señal PWM, cuya respuesta permitió establecer las especificaciones de desempeño para el diseño del mecanismo de autoajuste difuso que sintoniza los parámetros k_p y k_i del controlador PI, a partir de la *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab®. El modelo de simulación permitió realizar diferentes pruebas para determinar la respuesta transitoria y análisis de rechazo de perturbación del controlador al igual que la convergencia de los parámetros k_p y k_i de la ley de control PI. Finalmente, se plantearon conclusiones referentes a los resultados del estudio realizado.

2. MÉTODO

2.1 Modelamiento matemático

Los convertidores DC-DC Boost son sistemas no lineales dada su naturaleza dinámica [12]. Para el modelado del convertidor DC-DC se utiliza el enfoque propuesto en [13], donde se realiza un modelado en espacio de estado para el modo de operación 1 (T_{on}) y el modo de operación 2 (T_{off}), luego se establece un modelo en espacio de estado promediado el cual se linealiza alrededor de un punto de operación a partir de un modelo equivalente de un circuito lineal de pequeña señal de baja frecuencia [14]. El circuito del convertidor DC-DC Boost se muestra en la Figura 1.

Durante el modo 1, una señal periódica V_g de excitación, modulada por anchura de pulso (PWM) con ciclo útil d , es aplicada a la puerta del MOSFET durante un tiempo $T_{on} = Td$, el diodo D se polariza de forma

inversa y el voltaje de entrada v_i se transfiere al arreglo r_L, L , tal como se muestra en la Figura 2. La representación en espacios de estado en modo 1 se plantea a partir de la ecuación (1).

Figura 1. Circuito convertidor DC-DC Boost

Figura 2. Circuito convertidor DC-DC Boost Modo 1

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En el modo 2, el MOSFET se desactiva durante un tiempo $T_{\text{off}} = T(1-d)$, el diodo D se polariza de forma directa y la energía almacenada en la bobina durante el Modo 1, se transfiere a la carga, tal y como se muestra en la Figura 3. La representación en espacios de estado en modo 2 se plantea con la ecuación (2).

Figura 3. Circuito convertidor DC-DC Boost Modo 2

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} (v_i - v_D) \quad (2)$$

La representación en espacio de estados que describe la dinámica del convertidor se define a partir de la ecuación (3). Donde la corriente en la bobina i_L y el voltaje del condensador v_C representan las variables de estado del sistema x_1 y x_2 , respectivamente, agrupadas en el vector de estados $x = [i_L \ v_C]^T$, el voltaje de entrada v_i y la caída de tensión en el diodo v_D se agrupan en el vector de entrada $u = [v_i - v_D \ 0]^T$, la salida y corresponde al voltaje en el condensador v_C , que para este caso es igual al voltaje de salida v_o . A representa la matriz de estados del sistema, B la matriz de entrada y C la matriz de salida del sistema.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

A partir de las ecuaciones diferenciales del sistema en cada modo de funcionamiento, se define el promedio de la matriz de estado \bar{A} , la matriz de entrada \bar{B} y la matriz de salida \bar{C} , tal como se muestra en la ecuación (4). Al combinar la ecuación (1) y la ecuación (2) con la ecuación (4), se obtiene la representación en espacio de estados promediado del convertidor DC-DC Boost, la cual se presenta en la ecuación (5).

$$\begin{aligned}
\bar{A} &= A_{M1}d + A_{M2}(1-d) \\
\bar{B} &= B_{M1}d + B_{M2}(1-d) \\
\bar{C} &= C_{M1}d + C_{M2}(1-d)
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{(1-d)}{L} \\ \frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & -\frac{(1-d)}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (v_i - v_D) \\
y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5}$$

El modelo promediado de la ecuación (5), es un modelo no lineal, dado que el punto de operación depende de la entrada v_i . Sin embargo, para diseñar el controlador PI con autoajuste difuso para el convertidor DC-DC Boost, se debe definir la entrada a partir del ciclo de trabajo d de la señal PWM aplicada a la compuerta del MOSFET. Para tal fin, se linealiza el modelo promediado de la ecuación (5) alrededor del punto de operación (v_o, d) del convertidor [15]. El modelo en espacio de estado promediado y linealizado alrededor del punto de operación (v_o, d) , se muestra en la ecuación (6), donde Δx_1 y Δx_2 representan una pequeña variación alrededor del punto de operación de cada variable de estado del convertidor, Δd una pequeña variación alrededor del ciclo de trabajo d y ΔR se expresa como una entrada adicional que especifica una perturbación externa producto de un cambio en la impedancia de salida del convertidor, asimismo, V_{SS} e I_{SS} se refieren al voltaje de salida v_o y la corriente de entrada i_i en estado estable, cuando $\dot{x} = 0$.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 \\ \Delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{(1-d)}{L} \\ \frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{V_{SS}-v_D}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{I_{SS}}{C} & \frac{1}{R^2C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \Delta d \\ \Delta R \end{bmatrix} \\
y &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{6}$$

A partir de la ecuación (6), se establecen las especificaciones de desempeño del controlador PI con autoajuste difuso para el convertidor DC-DC Boost. En este caso se pretende mejorar la respuesta del sistema ante variaciones del voltaje de entrada v_i y variaciones de la carga conectada al convertidor ΔR , de esta manera, la variable manipulada del sistema se define a partir de la pequeña variación del ciclo útil de conducción del convertidor Δd . Para una frecuencia de conmutación $F_s = 50 \text{ kHz}$, un voltaje de entrada $v_i = 24 \text{ V}$, un voltaje de salida $v_o = 48 \text{ V}$ y una corriente de entrada $i_i = 3.5 \text{ A}$, se calculó una inductancia $L = 6.9 \text{ mH}$, una capacitancia $C = 36.5 \text{ }\mu\text{F}$, una resistencia de carga $R = 27.5 \text{ }\Omega$ y una resistencia equivalente en la bobina $r_L = 0.05 \text{ }\Omega$.

2.2. Diseño del controlador PI con autoajuste difuso

La estructura del control está basada en un controlador PI acoplado a un motor de inferencia difusa que ajusta los parámetros k_p y k_i del controlador a partir del error e y derivada del error \dot{e} del seguimiento de referencia [16]. El controlador PID convencional es una ecuación que se compone de tres términos definidos a partir de la relación proporcional del error P, la integral de error I y la derivada del error D [17]. La ecuación de salida del controlador se define a partir de la ecuación (7).

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \tag{7}$$

Donde $u(t)$ representa la salida del controlador PID, k_p la ganancia proporcional, k_d la ganancia derivativa, k_i la ganancia integrativa y, $e(t)$ representa el error de seguimiento de la referencia del controlador retroalimentado. En la ecuación (8), se expresa la ecuación de diferencia del controlador PID convencional digital, donde $e(k)$ y $e(k-1)$ son el error en el tiempo k y $k-1$. Para este caso, dada la naturaleza dinámica del convertidor DC-DC, se ajustó una $k_d = 0$, de tal forma que se conformó una estructura PI.

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=1}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)) \tag{8}$$

Con el fin de evitar la saturación de las variables internas del controlador PI y llevar a sobrepaso excesivos, se incluyó en la ley de control de la ecuación (8), con $k_d = 0$, un mecanismo *anti-windup* con la técnica *back*

calculation [18], el cual se define a partir de la ecuación (9), donde $du(k)$ es la diferencia de la señal de control saturada y $u(k)$ la señal de control calculada, k_{aw} es el coeficiente del mecanismo *anti-windup*, y T_s es el periodo de muestreo del sistema. Para el diseño del controlador PI con autoajuste difuso, se integró el mecanismo de inferencia difusa con la ecuación (8) en serie con el mecanismo *anti-windup*, de manera que se ajustan los parámetros k_p y k_i , y al mismo tiempo, se garantiza la no saturación de las variables internas de controlador propuesto [19].

$$u(k) = \left[k_p + (k_i + du(k)k_{aw}) \frac{T_s z}{z-1} \right] e(k) \quad (9)$$

Dada la dinámica de fase no mínima del convertido DC-DC Boost, no fue posible adicionar el componente derivativo en la ley de control, es decir, se considera suficiente mantener solo la componente proporcional e integral para conseguir que el voltaje a la salida del convertidor se mantuviera estable en 48 V con un error en régimen permanente cercano a cero [20].

En el diagrama de bloques de la Figura 4, se observa la etapa de autoajuste y la etapa del controlador PI, acoplado a la planta en espacio de estado que modela el comportamiento dinámico del convertido DC-DC Boost dado en la ecuación (6). La salida del sistema v_o se compara con la referencia v_r a partir del lazo de realimentación para generar la señal de error e . El mecanismo de autoajuste difuso se conformó a partir de una estructura tipo Mamdani [21].

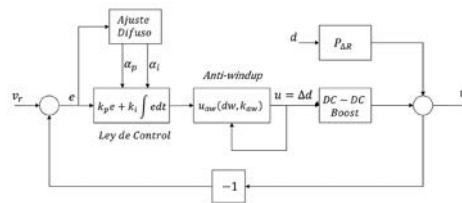


Figura 4. Diagrama de bloques de controlador PI con autoajuste difuso

El motor de inferencia difusa tipo Mamdani, del mecanismo de adaptación de los parámetros del controlador PI cuenta con dos entradas, una para el error $e(k)$ y otra para la derivada del error $\dot{e}(k)$, con un universo del discurso en el intervalo $[-1,1]$ para el error $e(k)$ y $[-1,1]$ para la derivada del error $\dot{e}(k)$, tal como se muestra en la Figura 5. De igual forma se especificaron dos salidas con funciones de pertenencia definidas a partir de conjuntos tipo gaussiano, una salida para el ajuste de la constante proporcional α_p y otra para el ajuste de la constante integral α_i .

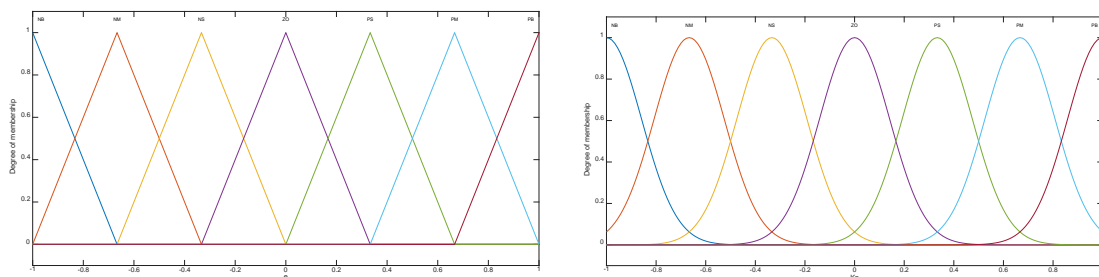


Figura 5. Conjuntos variables lingüística de entrada ($e(k)$ y $\dot{e}(k)$) y salida (α_p y α_i)

Para las entradas se asumieron siete (7) variables lingüísticas representadas a partir de conjuntos triangulares, tal como se muestra en la Figura 5, definidas como Negativo Grande (NB), Negativo Medio (NM), Negativo Pequeño (NS), Cero (ZO), Positivo Pequeño (PS), Positivo Medio (PM) y Positivo Grande (PB). Por su parte, para las salidas se definieron 7 conjuntos tipo gaussiano definidos como Negativo Grande (NB), Negativo Medio (NM), Negativo Pequeño (NS), Cero (ZO), Positivo Pequeño (PS), Positivo Medio (PM) y Positivo Grande (PB), tal como se muestra en la Figura 5.

La base de reglas del motor de inferencia difusa se muestra en la Tabla 1. Las reglas difusas han sido diseñadas con base en la experiencia orientada a la técnica de sintonización Ziegler-Nichols y a la respuesta dinámica de un controlador PI convencional, lo que permite implementar un mecanismo de sintonización en tiempo real basado en lógica *Fuzzy* para el controlador PI propuesto [22].

Tabla 1. Base de reglas mecanismo ajuste de la constante proporcional α_p y constante integral α_i

		Parámetro α_p						Parámetro α_i								
$e(k)$ \ $\dot{e}(k)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	$e(k)$ \ $\dot{e}(k)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM		PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS		PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO		PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS		PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM		PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB		ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

La superficie del motor de inferencia difusa para el coeficiente de ajuste α_p y α_i se observa en la Figura 6. En esta superficie se observa la manera como se ajustan estos parámetros en función del error y derivada del error. Para cada posible combinación de estas variables, se genera un valor positivo o negativo según la programación de la base de reglas del mecanismo propuesto.

Figura 6. Superficie del motor de inferencia difusa para las salidas α_p y α_i

Las variables de salida del sistema de inferencia difusa α_p y α_i , son los coeficientes que modulan y sintonizan en tiempo real los parámetros k_p y k_i del controlador PI a partir de la ecuación (10) y la ecuación (11), donde k_{p0} y k_{i0} son los valores iniciales del controlador PI seleccionados a partir de la respuesta dinámica deseada del sistema.

$$k_p = k_{p0}(1 - \alpha_p) \quad (10)$$

$$k_i = k_{i0}(1 - \alpha_i) \quad (11)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El esquema de control PI con mecanismo de autoajuste difuso, se comprueba a partir de técnicas de diseño basado en modelo bajo el entorno de Simulink de Matlab® y con el apoyo de *Simscape Toolbox* para el modelamiento de sistemas físicos. Con base en el modelo de simulación, se cuantificó la lógica propuesta por el controlador diseñado para generar una señal PWM de 50 kHz con ciclo de trabajo en función de la acción de control $u(k)$, la cual es aplicada a la compuerta del MOSFET de canal N, tal y como se muestra en la Figura 7. El controlador se implementa a partir de los bloques soportados por la *Fuzzy Logic Toolbox* y *Control System Toolbox*. El generador fotovoltaico se modela a partir de las ecuaciones en [23] y el modelo de simulación *Renewable Energy Systems* documentados en la *Simscape Toolbox* de Matlab® [24].

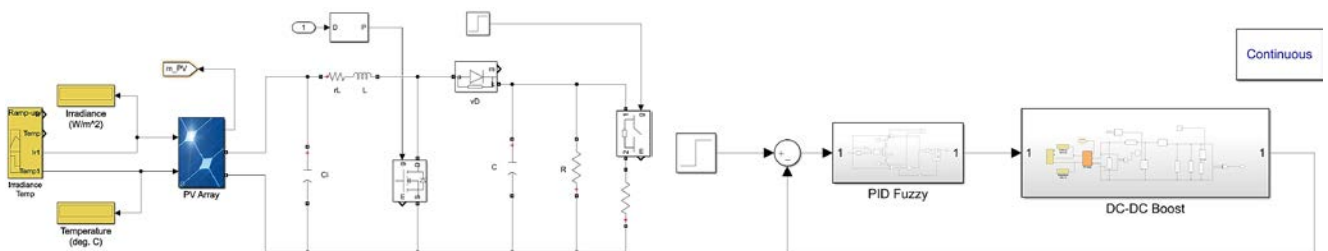


Figura 7. Modelo de simulación del convertidor DC-DC Boost con controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso

3.1 Prueba de seguimiento de voltaje de referencia

La respuesta del convertidor DC-DC Boost se comprueba cuando el generador fotovoltaico de 190 Wp genera 29.45 V y se establece una tensión de referencia en la salida de 48V. El comportamiento dinámico del controlador PI con autoajuste difuso es comparado con la respuesta de un controlador PI convencional. Dichas respuestas se muestran en la Figura 8, donde se presenta un sobrepaso cerca del 5% para controlador PI con autoajuste difuso y 13.15 % para el controlador PI convencional. En cuanto al tiempo de establecimiento, el controlador PI con autoajuste difuso tiene un tiempo de 12 ms, mientras que el controlador PI convencional se estabilizan a los 10 ms. La señal de control por su parte, para el controlador PI con autoajuste difuso, presenta un menor esfuerzo dado que es menos agresiva que el controlador PI convencional, aun cuando este último presenta mejores índices de desempeño en la respuesta transitoria.

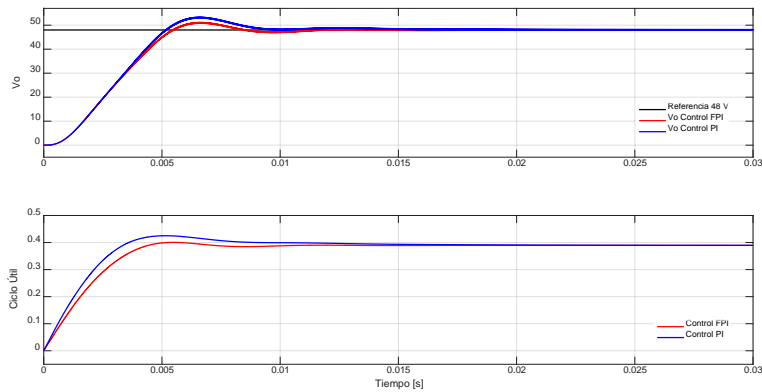


Figura 8. Respuesta controlador PI con autoajuste difuso Vs Respuesta controlador PI convencional

3.2 Prueba de perturbación de carga

Dada la estabilidad del sistema en lazo cerrado con controlador PI con autoajuste difuso, se analiza la respuesta del convertidor ante una perturbación en la corriente de salida producto de un cambio brusco en la resistencia de carga, cercano al 66% del valor nominal de la carga. La respuesta temporal se observa en la Figura 9, con una variación del 50% de la corriente inicial de 1.74 A.

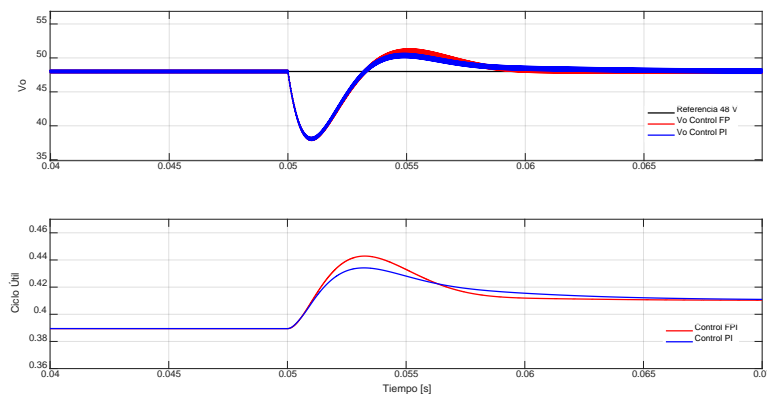


Figura 9. Prueba de perturbación de carga del controlador PI con autoajuste difuso Vs Respuesta controlador PI convencional

Durante la prueba de perturbación de carga, el tiempo de establecimiento es del orden de 8 ms para el controlador FPI y 11 ms para el controlador PI convencional. En cuanto a la señal de control se observa que el controlador FPI tiene un comportamiento más abrupto que el controlador PI convencional, consecuente con la respuesta transitoria de la perturbación de carga.

3.3 Prueba de variación paramétrica

Para validar la respuesta del controlador ante variaciones en el punto de operación debido a cambios en el voltaje de entrada del convertidor, se modela un cambio de irradiancia en el generador fotovoltaico y un

gradiente de temperatura, factores que afectan el rendimiento y la potencia del generador. Se simuló una variación de irradiancia de 1000 W/m^2 a 750 W/m^2 , lo que provocó un cambio del voltaje de entrada de 29.45 V a 24.56 V . En la Figura 10 se observa la respuesta transitoria del voltaje a la salida de convertidor y la respuesta de la señal de control para ambos controladores.

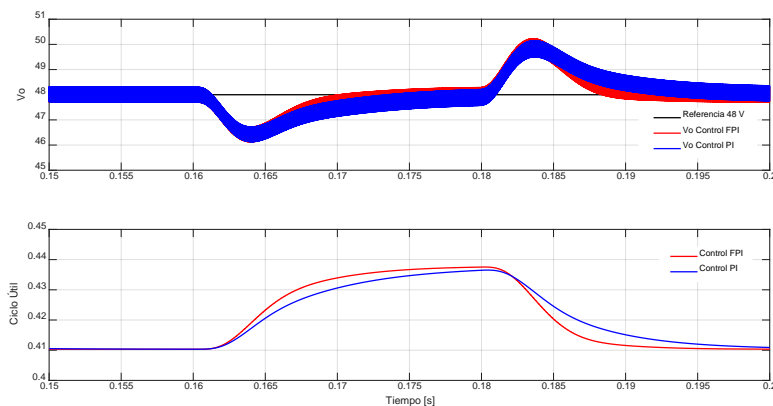


Figura 10. Prueba de Irradiancia del controlador PI con autoajuste difuso Vs Respuesta controlador PI convencional

Al observar el subimpulso a los 164 ms , ambos controladores tienen respuesta similar, sin embargo, el tiempo de establecimiento del controlador FPI para compensar la variación del voltaje en el generador PV es 4% menor que el tiempo que toma el controlador PI. Por su parte, al observar el sobreimpulso a los 183 ms , el controlador FPI presenta una leve diferencia respecto al controlador PI, ya que este último presenta un sobreimpulso del 5% frente a un 4% del controlador FPI. Finalmente, luego de amortiguar el sobre impulso, los tiempos de establecimiento mantiene la misma tendencia que en el evento de subimpulso. Este comportamiento es coherente con el incremento de la señal de control traducida en ciclo útil de la señal PWM aplicada al convertidor.

En la Figura 11 se observa la respuesta del controlador FPI y PI ante variación de temperatura en el generador fotovoltaico. En esta se identifica un incremento en el ciclo de trabajo que compensa la variación del voltaje de salida del convertidor como efecto de la variación de la temperatura. No obstante, el controlador FPI presenta una mejor figura de mérito, dado que se estabiliza y responde de una manera rápida respecto al controlador PI convencional, cuyo tiempo de establecimiento es de 3 ms más largo que el controlador FPI, el cual está cercano a los 10 ms .

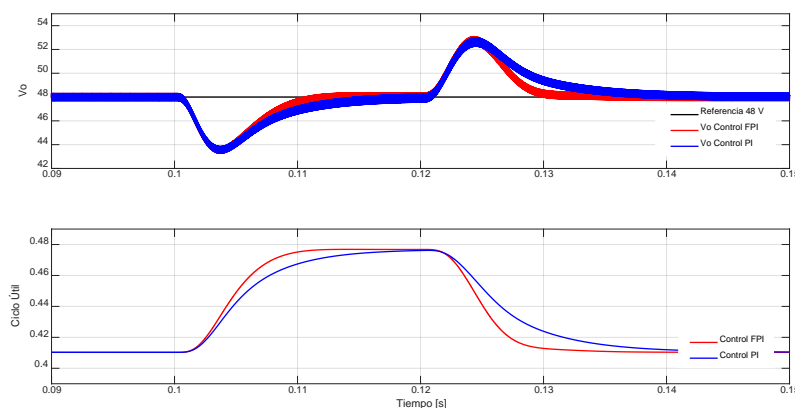


Figura 11. Prueba de Temperatura del controlador PI con autoajuste difuso Vs Respuesta controlador PI convencional

El generador fotovoltaico se somete a una variación de 25°C a 50°C , lo cual se traduce en una variación en el voltaje de salida de 29.45 V a 27.2 V . Esta reducción en el voltaje de entrada, es compensada de manera rápida por el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, dado que es 5 ms más rápido que la respuesta del controlador PI convencional.

En la Figura 12 se observa la convergencia de los parámetros k_p y k_i durante las pruebas de seguimiento de referencia, rechazo de perturbación y cambio en el punto de operación del sistema. Para cada una de las

pruebas realizadas sobre el funcionamiento del convertidor DC-DC Boost con controlador FPI, se observa que las constantes k_p y k_i modulan su amplitud en función del error y derivada del error de forma no lineal dada las características del mecanismo de autoajuste difuso, aun así, dichos parámetros convergen siempre al valor inicial del controlador k_{p0} y k_{i0} en estado estable.

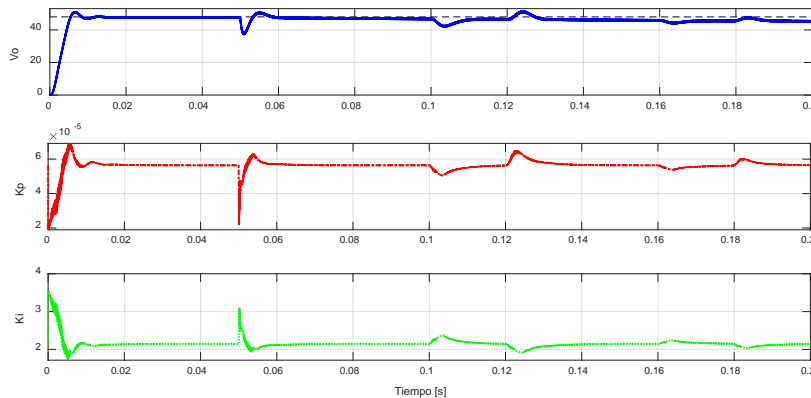


Figura 12. Convergencia de los parámetros k_p y k_i durante pruebas de seguimiento, rechazo de perturbación y variación en el punto de operación del convertidor

4. CONCLUSIONES

El modelo linealizado en espacio de estado del convertidor es válido para el diseño del controlador FPI dado que cumple con las especificaciones de desempeño deseada, por lo cual se describió adecuadamente la dinámica del circuito del convertidor a pesar de contar con un comportamiento de fase no mínima durante el modelamiento del circuito.

El mecanismo de adaptación basado en lógica Fuzzy permitió construir un controlador PI adaptativo con un mecanismo de autoajuste, el cual modifica las constantes k_p y k_i , en función del error y derivada del error de seguimiento de referencia. Se pudo demostrar que este mecanismo de adaptación permite reajustar el controlador ante cambio de puntos de operación, perturbaciones externas y variación paramétrica del sistema, mostrando un mejor desempeño en cuanto a la respuesta transitoria y esfuerzo de la señal de control en relación con un controlador PI convencional.

Ante diferentes puntos de operación, y pruebas de perturbación externa, se pudo demostrar que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso muestra un mejor desempeño y menor esfuerzo de la señal de control respecto a un PI convencional, dado que presenta menor tiempo de establecimiento, un sobrepaso mínimo, con un error en estado estable cercano a cero, además de la rápida convergencia de los parámetros del controlador.

REFERENCIAS

- [1] Y. Nitesh, B. Malakondareddy, S. S. Kumar, and I. Anand, "Experimental investigation of distributed maximum power point operation for solar PV system," in *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*, Dec. 2018, pp. 1–6.
- [2] L. Cheng *et al.*, "Model Predictive Control for DC-DC Boost Converters With Reduced-Prediction Horizon and Constant Switching Frequency," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 9064–9075, Oct. 2018.
- [3] R. Errouissi, A. Al-Durra, and S. M. Mueen, "A Robust Continuous-Time MPC of a DC-DC Boost Converter Interfaced With a Grid-Connected Photovoltaic System," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 6, pp. 1619–1629, Nov. 2016.
- [4] T. Kobaku, S. C. Patwardhan, and V. Agarwal, "Experimental Evaluation of Internal Model Control Scheme on a DC-DC Boost Converter Exhibiting Nonminimum Phase Behavior," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 11, pp. 8880–8891, Nov. 2017.
- [5] J. T. de Carvalho Neto, A. L. de Oliveira Cavalcanti, and A. Ortiz Salazar, "Design and Implementation of DSP-Based H-Infinity Robust Controller for a Boost Converter," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 11, pp. 2766–2774, Nov. 2018.
- [6] S. Singh, D. Fulwani, and V. Kumar, "Robust sliding-mode control of dc/dc boost converter feeding a constant power load," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 7, pp. 1230–1237, Jul. 2015.

- [7] S.-K. Kim and K.-B. Lee, "Robust Feedback-Linearizing Output Voltage Regulator for DC/DC Boost Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 7127–7135, Nov. 2015.
- [8] B. C. Mandi, S. Kapat, and A. Patra, "Unified Digital Modulation Techniques for DC–DC Converters Over a Wide Operating Range: Implementation, Modeling, and Design Guidelines," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 65, no. 4, pp. 1442–1453, Apr. 2018.
- [9] S.-K. Kim and C. K. Ahn, "Self-Tuning Proportional-Type Performance Recovery Property Output Voltage-Tracking Algorithm for DC–DC Boost Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 4, pp. 3167–3175, Apr. 2019.
- [10] S.-K. Kim, "Output Voltage-Tracking Controller With Performance Recovery Property for DC/DC Boost Converters," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 1301–1307, May 2019.
- [11] M. Matusiak, M. Bąkała, and R. Wojciechowski, "Optimal Digital Implementation of Fractional-Order Models in a Microcontroller," *Entropy*, vol. 22, no. 3, p. 366, Mar. 2020.
- [12] S. Bacha, I. Munteanu, and A. I. Bratcu, *Power Electronic Converters Modeling and Control*. London: Springer, 2014.
- [13] R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modelling switching-converter power stages," in *1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jun. 1976, pp. 18–34.
- [14] V. Vorperian, "Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. Continuous conduction mode," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 490–496, May 1990.
- [15] M. G. Simões and F. A. Farret, *Modeling power electronics and interfacing energy conversion systems*. 2016.
- [16] W. Jiang and X. Jiang, "Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-Tuning PID," *Procedia Eng.*, vol. 43, pp. 307–311, 2012.
- [17] V. M. Alfaro and R. Vilanova, *Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [18] S. Shcherbovskiy, K. Kozłowski, and D. Pazderski, "Evaluation of integral anti-windup feedback coefficient for PI regulator," in *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, May 2018, pp. 74–77.
- [19] H. Jigang, W. Jie, and F. Hui, "An anti-windup self-tuning fuzzy PID controller for speed control of brushless DC motor," *Automatika*, vol. 58, no. 3, pp. 321–335, Jul. 2017.
- [20] S. Wang, Y. Chen, and G. Zhang, "Adaptive fuzzy PID cross coupled control for multi-axis motion system based on sliding mode disturbance observation," *Sci. Prog.*, vol. 104, no. 2, p. 003685042110118, Apr. 2021.
- [21] I. Sakti, "Methodology of Fuzzy Logic," *2014 1st Int. Conf. Information Technol. Comput. Electr. Eng. (ICIT ACEE)*, pp. 93–98, 2014.
- [22] S.-Z. He, S. Tan, F.-L. Xu, and P.-Z. Wang, "Fuzzy self-tuning of PID controllers," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 56, no. 1, pp. 37–46, May 1993.
- [23] T. Khatib and W. Elmenreich, *Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB: Simplified Green Codes*. 2016.
- [24] R. Ayaz, I. Nakir, and M. Tanrioven, "An Improved Matlab-Simulink Model of PV Module considering Ambient Conditions," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014.

Control de movimiento de un dron mediante señales bioeléctricas de electroencefalografía

Iván Daniel Villegas¹

Julián Rolando Camargo López²

Cesar Andrey Perdomo Charry³

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Colombia

En este capítulo se presenta los resultados de una propuesta para controlar el movimiento de un dron usando señales electroencefalográficas, las cuales se filtran entre frecuencias de 8 y 13 Hz; además, se evalúa algunos preprocesamientos en tres tipos diferentes de clasificadores: el random forest, vecinos más cercanos y convolucional. Como mejor resultado se tiene la red convolucional con los datos normalizados con una precisión cercana al 90%. Para integrar el clasificador con el dron y los módulos BCI, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario en Python donde se utiliza dos hilos: uno para los módulos y otro para el dron, además de un temporizador encargado de realizar las predicciones.

¹ Contacto: idvillegasi@correo.udistrital.edu.co

² Contacto: jcamargo@udistrital.edu.co

³ Contacto: cperdomo@correo.udistrital.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La electroencefalografía es una técnica de monitorización del cerebro, que recibe señales de la corteza cerebral a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo. Para que una persona pueda controlar un objeto a través de la actividad cerebral, es necesario un sistema de comunicación que monitorice la actividad cerebral y sea capaz de traducirla para determinar las intenciones del usuario. Este sistema se llama interfaz cerebro-computador BCI.

Con el desarrollo actual de la tecnología EEG y el aumento del uso de aeronaves no tripuladas (drones), el presente trabajo está orientado a la detección y procesamiento de señales electroencefalográficas EEG obtenidas por BCI, que permiten obtener una serie de comandos que sirven para enviar controlar el movimiento de una aeronave no tripulada de manere diferente a la propuesta por otros autores [1].

2. MÉTODO

Para controlar el movimiento de una aeronave no tripulada a través de señales de EEG, se divide este objetivo en diferentes fases. La primera de ellas tiene como misión encontrar las regiones de la corteza cerebral donde se puede obtener más información teniendo como paradigma la ejecución motora, para posteriormente colocar los electrodos con el fin de tener acceso a la información que posteriormente servirá para entrenar un modelo de inteligencia computacional; la segunda es la exploración de los datos recogidos, cuyo objetivo es eliminar el ruido y facilitar la interpretación de las señales para una posterior extracción de características. El siguiente paso es la obtención de un paradigma de inteligencia computacional capaz de clasificar las señales en tiempo real por lo que debe tardar menos de 300 milisegundos que es lo que demora un parpadeo. Por último, la integración de los módulos de EEG y del clasificador con el dron para que éste obedezca órdenes, lo que se realiza utilizando el lenguaje de programación Python.

La Figura 1 muestra el modelo conceptual propuesto, en la que la aeronave recibe órdenes a través de señales de EEG que son interpretadas y procesadas por una interfaz gráfica de usuario en un computador.

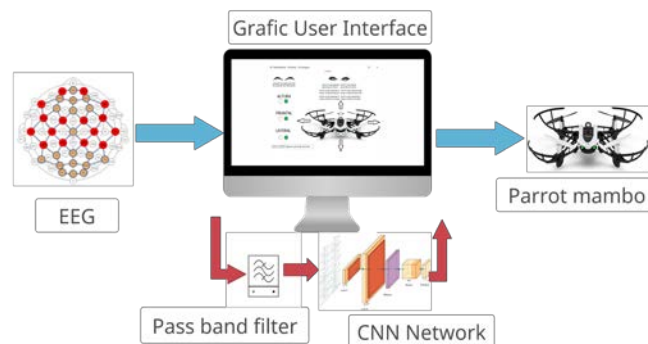


Figura 1. Modelo conceptual

A diferencia de algunas otras funciones cerebrales, la ejecución de las acciones motoras se realiza en una zona específica del encéfalo, según [2] la corteza motora se divide en tres partes, la corteza motora primaria, área motora suplementaria y corteza premotora. Estas partes se encuentran cerca una de la otra, ubicadas después del surco central en el lóbulo frontal sobre la corteza cerebral. Como el propósito es obtener la mayor cantidad de información, los electrodos se ubican rodeando la zona de interés siguiendo la distribución 10/20 en los puntos: Fp1, Fp2, C3, C4, Cp5, Cp6, Fc5, Fc6, F7, F8, Fc1, Fc2, T3, T4, Cp1, Cp2 y referencias biauriculares (SDR y BIAS), tratando de aprovechar que, al estar los electrodos sobre el cuero cabelludo, van recibir una señal, producto de la superposición de toda la actividad cerebral que rodea al electrodo. Además, se ubican otro grupo de electrodos cerca de la frente, para que reciban información proveniente de los parpadeos y del movimiento de las cejas.

Dando pie al estudio de las señales, se conoce que las señales EEG están compuestas por diferentes rangos de frecuencias llamados ritmos, los cuales son asociados a diferentes estados de la conciencia como lo

pueden ser el sueño profundo o la concentración intensa. Para el proyecto se utiliza el ritmo α , que abarca desde los 8 Hz hasta los 13 Hz y está relacionado con un estado de conciencia, pero no de concentración [3-6]. Para aislar esta banda del resto, se implementa un filtro pasa banda digital con topología butterworth.

Algunos clasificadores, presentan un desempeño más bajo si los valores en sus entradas hay una desviación estándar muy alta en su magnitud, por lo que es recomendado en ciertas ocasiones realizar un preprocesamiento. Como no es posible saber de antemano cual es mejor para el desarrollo del proyecto, se prueban dos métodos que están incluidos en módulo de Python Scikit learn tras filtrar la señal: el estandarizado de los datos y la normalización, y como para todos los clasificadores un preprocesamiento no implica una mejora, también se decide probar con los datos únicamente filtrados.

En la Figura 2 se pueden observar las diferencias entre las señales tratadas con los diferentes preprocesamientos, dentro de los cuales la más destacable es el cambio en la forma de la señal al aplicar la función de normalización; la segunda y más relevante diferencia es el rango entre los que se encuentran los valores pico de la señal.

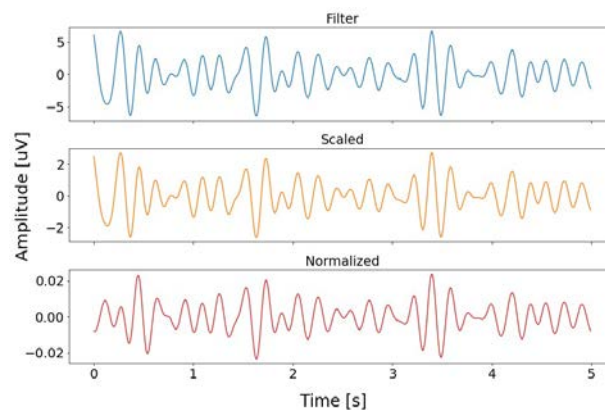


Figura 2. Señales EEG con diferentes preprocesamientos

Se tienen 90 datos por gestos con los que se entrenan los clasificadores recogidos tanto de hombres como de mujeres de entre 16 y 33 años de edad, usando los módulos BCI Daisy y Cyton, de la compañía OpenBCI [7], de la cual también se utilizan los electrodos secos a base de plata y Cloruro de Plata Ag-AgCl y el casco Ultracortex Mark IV; no obstante, el software usado no es el sugerido por la compañía, sino uno desarrollado por el grupo de investigación LASER.

Los clasificadores probados tienen 16 canales de entrada cada uno con 625 datos, los cuales son los 16 electrodos con las muestras tomadas a lo largo de 5 segundos; además los clasificadores tienen cuatro salidas, las cuales representan tres acciones motoras (el parpadeo con el ojo izquierdo, el parpadeo con el ojo derecho y el levantamiento de las cejas) y la inactividad o no ejecución de alguno de las acciones motoras correspondientes a la otra salida. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se opta seguir el proceso planteado por [8] dividiendo el conjunto de datos en tres, 70% de entrenamiento, 20% para validación y 10% para test; evaluando tres tipos de clasificadores: Random Forest, k-Nearest Neighborhood (usando el módulo de python scikit learn) y Convolutional Neuronal Network mostrada en la Figura 2 (usando el módulo de python keras) cuyos datos se determinan haciendo un barrido y observando con cuáles combinaciones se llega a un valor mayor de precisión.

Los resultados de estas pruebas se pueden observar en la Tabla 1, donde se puede ver los valores de salida de cada capa y su respectivo número de parámetros entrenables. El dron se controla usando el módulo de Python pyparrot, el cual permite de manera sencilla enviar comandos al vehículo para indicar el eje y la dirección en la cual moverse, además al permitir enviar los comandos desde python, facilita la creación de un GUI donde se integre la conexión de los módulos BCI, la preparación de los datos, la clasificación y el control del parrot mambo. El GUI toma los datos de los módulos BCI, los filtra, y los clasifica, una vez se sabe que acción se realizó, se determina si el dron debe realizar algún movimiento o debe permanecer a la espera de una próxima indicación sin desplazarse. En caso que el clasificador tenga como salida la

inactividad, el dron no debe desplazarse al igual si la salida indica un levantamiento de las cejas, aunque en ese caso se cambia el eje en el que el dron se moverá si la siguiente acción es un parpadeo, ya que estos gestos determinan la dirección del eje en la que se mueve el vehículo.

Tabla 1. Topología del clasificador utilizado

Tipo de capa	Tamaño de la salida de la capa	Parámetros
Capa de entrada	[(None, 625,16)]	0
Convolutacional 1D	(None, 576, 6)	4806
Max Pooling 1D	(None, 288, 6)	0
Convolutacional 1D	(None, 39, 16)	24016
Max Pooling 1D	(None, 20, 16)	0
Flatten	(None, 320)	0
Capa densa	(None, 250)	80250
Drop out	(None, 250)	0
Capa densa de salida	(None, 4)	1004

En la Figura 3 se muestra el algoritmo que explica la toma de decisiones según la salida del clasificador; el algoritmo comienza asumiendo que tanto los módulos BCI como el dron, están correctamente conectados al computador. En el inicio del proceso se inicializan las variables que se van a usar, se solicitan los datos del clasificador y la altura, para posteriormente evaluar si el gesto pertenece al interruptor que va a cambiar el eje de movimiento o a algún comando relacionado con la dirección.

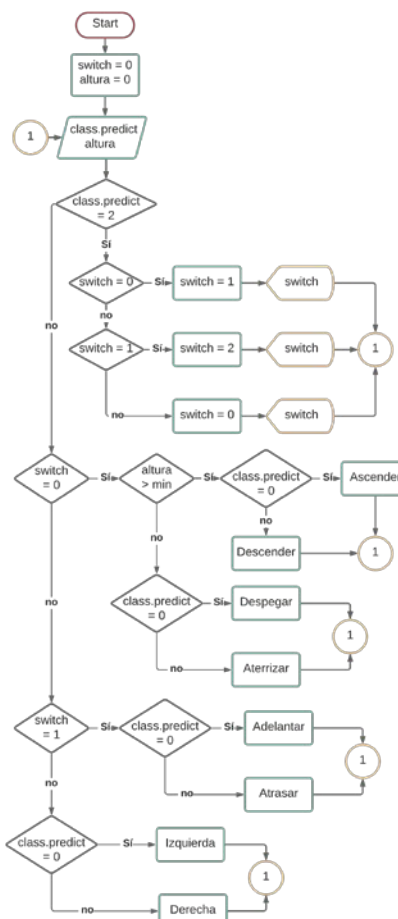


Figura 3. Algoritmo de control de movimientos de dron basado en clasificación de gestos

En el caso que el gesto pertenezca al asignado como interruptor, se verifica el estado en el que se encuentra el interruptor y lo cambia al siguiente mostrando que movimiento se ha de habilitar para volver a preguntar por el siguiente gesto. Por el contrario, si el gesto hace parte a uno perteneciente a la dirección, se pregunta primero por el estado del interruptor, para saber en qué eje se debe mover el dron y posteriormente preguntar por el gesto para ejecutar el movimiento correspondiente. En caso que el interruptor se encuentre en el eje vertical, se tienen dos opciones que se ejecutarán dependiendo de la altura a la que se

encuentre el dron, despegar y aterrizar si se está cerca del piso, o, ascender y descender si por el contrario se está a cierta distancia del piso.

La implementación del algoritmo y su funcionamiento en tiempo real se lleva a cabo dentro del GUI, el cual ejecuta dos hilos, uno para la conexión del Ultracortex y la lectura de las señales EEG y el otro para la conexión con el dron y la ejecución de las órdenes que se le asignen. El algoritmo previamente explicado se ejecuta cada cierto tiempo con ayuda de un timer del módulo PyQt5. Para que la persona sepa cuándo realizar el gesto y evitar que en una misma grabación hallan varios gestos y se confunda el clasificador, se muestra al usuario el intervalo de tiempo en el que puede realizar el gesto en la consola.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desempeño de las redes se evalúa con diferentes métodos: *Precisión* que evalúa la cantidad de verdaderos positivos en relación a los falsos, *Recall* que evalúa los verdaderos positivos frente a los falsos negativos, y *f1-Score* con *Overall Accuracy* que hacen un promedio entre las dos métricas anteriores. Los resultados de los clasificadores KNN y RF se muestran en la Figura. 4. Las redes KNN muestran un comportamiento mediocre y poco fiable con métricas por debajo del 50% en la mayoría de los casos. Por otro lado, los clasificadores RF sus métricas mejoran levemente respecto a las anteriores, en especial en el caso de las señales escaladas donde la *Precisión* supera el 60%; este caso llama la atención debido a lo juntos que se encuentran los cuartiles entre sí, sin embargo, su comportamiento sigue siendo insuficiente para ser usado.

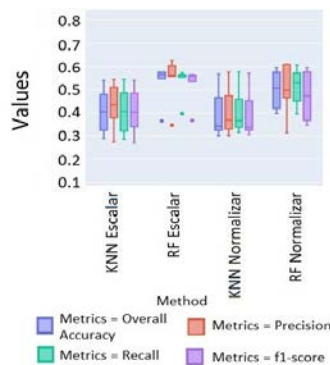


Figura 4. Comparación de los modelos KNN y RF

Al cambiar 5 a la red CNN, los resultados son mejores que los obtenidos en las redes anteriores, la Figura 5 muestra que al escalar la señal filtrada se obtiene una *Precisión* similar a la obtenida con el clasificador RF tras normalizar la señal, aunque el resto de las métricas están por debajo de las que se obtienen con el clasificador RF. Sin embargo, las métricas más altas se encuentran al introducir la señal normalizada en el clasificador, las cuales alcanzan valores cercanos o superiores al 70% con una desviación estándar baja en las métricas con valores inferiores al 80%; de este clasificador cabe resaltar la *Precisión* que alcanza valores al 90%. Adicionalmente, se realizan pruebas con 150 grabaciones para obtener el tiempo de respuesta del clasificador el filtro y la normalización, con un retardo mínimo de 36 ms, en promedio 39.52 ms, y con un tiempo máximo alcanzado de 171.17 ms, haciendo al clasificador aceptable para uso en tiempo real.

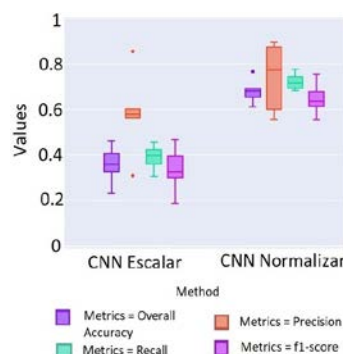


Figura 5. Plataforma de captura de datos en pruebas

Respecto al desempeño del GUI, se implementó en Ubuntu un sistema operativo basado en Linux, y no presenta problemas en la comunicación siempre y cuando los hilos se ajusten para que los resultados de uno no interfieran con el otro, en el presente caso el clasificador espera un tiempo para arrojar un resultado tras los dos segundos en que se realiza el gesto, por lo que se ejecuta cada cuatro segundos mientras que el hilo del dron se ejecuta cada tres segundos, dentro de estos el dron se demora un segundo en realizar el movimiento y luego espera dos segundos antes que el hilo vuelva a ejecutarse.

4. CONCLUSIONES

Al concentrar los electrodos alrededor de la región encargada del comportamiento motor y cerca a los músculos que realizan los gestos se capta la suficiente información para clasificar las diferentes acciones (como se puede ver en la Figura. 5 siendo esta una opción diferente a la que se sugiere en otras ocasiones en la que los electrodos se distribuyen alrededor de todo el cuero cabelludo. Basado en los resultados del clasificador CNN se puede asegurar que la distribución de los electrodos es adecuada para el trabajo que se quiere realizar, ya que este es capaz de diferenciar las acciones motoras con las señales suministradas por los electrodos. Al estar todos los electrodos tan cerca unos de otros, es probable que haya redundancia en la información, por lo que es probable que se puedan eliminar algunos y de todas formas conseguir buenos resultados.

En cuanto al ritmo elegido, también resulta ser una buena elección, basado nuevamente en los resultados de los clasificadores se puede decir que el ritmo α brinda suficiente información para distinguir entre tres gestos faciales y la inactividad a la vez que se encuentra por debajo del rango de actividad muscular que va desde los 20 Hz a 300Hz [6]. En cuanto al preprocesamiento, los resultados muestran que en los clasificadores RF y CNN las métricas alcanzan valores más altos a costa de una mayor desviación estándar entre las pruebas realizadas; no así en el caso de las redes KNN las cuales parece que no es suficiente con los preprocesamientos probados.

Con la red CNN seleccionada como la que mejor rendimiento presenta, se destaca por tener una *Precisión* alta, esto indica el porcentaje de predicciones verdaderas respecto falsas predicciones, lo cual significa que en el caso de a CNN normalizado, cerca del 90% de las predicciones que se dan de un gesto realmente pertenecen a la clase predicha, mientras que el resto de las predicciones pertenecían a otro gesto; a su vez se puede apreciar que su desviación estándar es alta, dado que sus valores varían entre el 60% y el 90%, siendo el promedio cercano al 80%. Respecto a los falsos negativos, la cual se muestra en la métrica *Recall*, compara cuantos a los casos de un gesto en particular que fueron clasificados en su clase verdadera respecto a los datos que pertenecían al gesto, pero fueron ubicados en otro. Esta métrica también tiene un valor inferior al de *Precisión*, sin embargo, su desviación estándar es baja y con un promedio cercano al de la métrica anterior. Con los resultados de las métricas y el tiempo que demora en ser ejecutado normalmente muy inferior al de un parpadeo, se puede concluir que es un buen resultado [9, 10].

REFERENCIAS

- [1] F. O. R. Hernández, *Sistema clasificador para ondas cerebrales de acciones simples para la interacción con robots*, 2016.
- [2] Á. G. Velasco, "El movimiento humano", Universidad de Salamanca, inf. téc., 2012.
- [3] J. A. C. Saeid Sanei, *EEG Signal Processing*, Primera Edición. John Wiley y Sons Ltd, 2007.
- [4] J. M. Arriola, "Representación matemática de ondas cerebrales", Tesis de maestría, Universidad Nacional del Sur, 2016.
- [5] M. S. b Abd Rani y W. bt. Mansor, "Detection of eye blinks from EEG signals for home lighting system activation", en *2009 6th International Symposium on Mechatronics and its Applications*, 2009, págs. 1-4.
- [6] S. D. Muthukumaraswamy, "High-frequency brain activity and muscle artifacts in MEG/EEG: a review and recommendations", *Frontiers in human neuroscience*, vol. 7, 2013.
- [7] OpenBCI. (2020). "OpenBCI: Documentation, @ONLINE". Recuperado: <https://docs.openbci.com/docs/Welcome.html#docs-website-update>
- [8] V. Roman, "Machine Learning: Cómo Desarrollar un Modelo desde Cero, @ONLINE", *Ciencia y Datos*. Recuperado: <https://medium.com/datos-y-ciencia/machine-learning-c%C3%B3mo-desarrollar-un-modelo-desde-ceroc17654f0d48>, feb. de 2019.

- [9] B. Shmueli, "Multi-Class Metrics Made Simple, Part I: Precision and Recall, @ONLINE", *Towards Data Science*. Recuperado: <https://towardsdatascience.com/multi-class-metrics-made-simple-part-i-precision-and-recall-9250280bddc2>, 2019.
- [10] Shmueli, "Multi-Class Metrics Made Simple, Part II: the F1-score, @ONLINE", *Towards Data Science*. Recuperado: <https://towardsdatascience.com/multi-class-metrics-made-simple-part-ii-the-f1-score-ebe8b2c2ca1>, 2019.

Diagnóstico y desempeño de la energía solar fotovoltaica en el departamento del Valle del Cauca, Colombia

Alejandra María Restrepo Franco¹

Francy Nelly Jiménez García²

Yuri Ulianov López Castrillón³

Universidad Autónoma de Manizales
Colombia

En esta investigación se caracterizan los sistemas solares fotovoltaicos instalados a red en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Primero se realizó un diagnóstico de algunos sistemas solares fotovoltaicos instalados en el departamento, a partir de información de la Unidad de Planeación Minero Energética UPME y la empresa de energía Celsia, que permitió determinar los proyectos registrados, su ubicación, capacidad instalada y sector de la economía. Además, se desarrolló un análisis general, ambiental, técnico y financiero de diferentes proyectos. Seguidamente, se realizó la estimación del potencial de radiación solar en las 5 subregiones del departamento, a partir de información climática registrada en las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Con esta información se obtuvo los promedios históricos diarios de radiación solar anual para las 5 subregiones, a partir de análisis estadísticos descriptivos e inferenciales. Finalmente, se realizó un estudio de caso en el desempeño energético de un sistema instalado en una vivienda que se encuentra en el departamento objeto de estudio, se pudo determinar características de rendimientos en cuando a generación, consumo e inyección. El conocimiento de los sistemas solares existentes en la región, de la radiación solar en diferentes sitios del departamento y del desempeño energético bajo las condiciones ambientales propias del sitio permitió establecer perspectivas para la implementación de esta forma de energía en el Valle del Cauca.

¹ Ingeniera Mecánica, estudiante de la Maestría en Ingeniería.

Contacto: Alejandra.restrepof@autonoma.edu.co

² Ingeniera Química, Especialista en Computación para la Docencia, Magister en física y Doctora en Ingeniería.

Contacto: francy@autonoma.edu.co

³ Doctor en Energía Renovables y Eficiencia Energética.

Contacto: ylopez@uao.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y la concientización ambiental han transformado la manera de pensar y actuar por parte de las personas y empresas que buscan procesos amigables con el medio ambiente que lleven a disminuir la huella de carbono [1]. Por ello cobra importancia el concepto de conciencia ambiental, que es un pilar fundamental en el mundo globalizado, en la que la sostenibilidad depende fundamentalmente de tres dimensiones: la ambiental, la social y la económica [2].

La electricidad resulta vital para el desarrollo de la sociedad y constituye una pieza fundamental para afrontar los principales retos sociales en el camino hacia el desarrollo sostenible [3]. En la actualidad, países de todo el mundo buscan formas de incrementar el suministro de energía eléctrica y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, los jefes de estado reconocieron la necesidad de incrementar el porcentaje de fuentes de energía renovable FER en la matriz energética de sus países. En este contexto, para fomentar el uso de FER, muchos países cuentan con incentivos tributarios. Por ejemplo, en Alemania, el incentivo que se destaca es la aplicación de tarifas premium, lo que hace que la energía generada por fuentes renovables sea más atractiva y competitiva [4].

En América Central y el Caribe, la diversificación de los recursos energéticos es clave ya que la región depende en gran parte de la energía hidroeléctrica. Su vulnerabilidad es evidente debido a los eventos meteorológicos y los cambios en el régimen hidrológico, especialmente por la Oscilación del Sur asociada con los fenómenos de El Niño y La Niña [5] [6]. Por lo tanto, la región busca mecanismos para diversificar la matriz energética utilizando recursos renovables como el sol. En este sentido vale la pena indicar que la capacidad instalada de energía fotovoltaica en Colombia creció de 341 MW en 2014 a 1737 MW en 2018 [7].

En el escenario energético colombiano, a pesar de que los incentivos gubernamentales aún ocurren de manera incipiente, la inclusión de fuentes renovables está creciendo, especialmente luego de la aprobación de la Ley 1715 y la Resolución de la CREG. Esta reglamentación establece las condiciones generales de acceso de micro y minigeneración al sistema de distribución (energía distribuida) y al sistema de compensación de energía (medición neta), lo que proporciona un aumento en la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución de energía SFCR.

Las plantas de energía solar fotovoltaica ESFV representan opciones financieramente competitivas en comparación con otras tecnologías [8]. Entre las energías renovables ER más destacadas en Colombia está la energía solar, la cual se ha convertido en el tipo de energía más inclusiva y aceptada. La ubicación geográfica privilegiada para la irradiación energética, el desarrollo de nuevas tecnologías, el auge de nuevos mercados de energías renovables no convencionales y los beneficios tributarios de la Ley 1715 del 2014 [9] han generado un entorno ideal para el desarrollo de pequeños y grandes proyectos basados en este tipo de energía, que convierten al país en un referente de desarrollo de ER.

El costo de inversión era considerado como la principal barrera para la implementación de energía solar masiva hace algunas décadas, pero en la actualidad constituye el principal atractivo para los gobiernos y los inversionistas que no pertenecen al sector, gracias a que los costos de la tecnología han disminuido de forma considerable en la última década [10]. La electricidad producida en lugares con un fuerte recurso solar es actualmente competitiva frente a otros como el uso de combustibles fósiles y para numerosas regiones aisladas ya que es una fuente más barata, modular y limpia para la generación de energía.

El departamento del Valle del Cauca fue elegido como el enfoque de este estudio ya que la región tiene una gran cantidad de luz solar natural durante todo el año, según Gómez et al. (2017) las condiciones naturales en la región son favorables para la generación fotovoltaica y los niveles de radiación a lo largo del año son buenos. De acuerdo con los mapas de radiación solar sobre una superficie plana media recibida en superficie [11] en la ciudad de Cali, capital del departamento de Valle del Cauca, se pueden alcanzar valores entre 4 y 4.6 kWh.día/m², lo que garantiza la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos.

En el departamento del Valle del Cauca se han venido desarrollando algunos proyectos conectados a red que involucran la generación de ESFV, pero son poco conocidos. Si bien la región se ha caracterizado por

tener una gran capacidad de generación de energía a partir de los sistemas solares fotovoltaicos SSFV se requiere más difusión de tales proyectos. Es importante conocer los lineamientos que se han seguido para su proceso administrativo, procedimientos de acceso y conexión, equipamiento tecnológico instalado, disponibilidad de energía y su aplicación en el modo de generación distribuida a través del tiempo, de tal manera que se den a conocer a la comunidad para difundir las buenas prácticas y las lecciones aprendidas para futuras implementaciones, y buscar un mayor desarrollo de estas tecnologías en la región y el país.

El objetivo de esta investigación es dar un panorama general de la participación de la energía solar fotovoltaica en el Departamento del Valle del Cauca. El factor de novedad de este trabajo radica en el reconocimiento del potencial de energía solar del departamento desde la caracterización de los proyectos fotovoltaicos instalados a red, el estudio del potencial solar y la evaluación del desempeño energético de un SSFV conectado a red.

2. MARCO CONCEPTUAL

Las bases de datos con información climática son alimentadas por estaciones meteorológicas ubicadas en sitios particulares en las cuales se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos, todo ello con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio. En Colombia estos datos son recolectados por el IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [11], e incluyen en general datos de brillo solar.

Existe varios modelos para estimar la irradiación solar a partir del brillo solar, uno de los más usados es el modelo de Angstrom y Prescott [12], mediante el cual se puede calcular la irradiación global sobre superficie horizontal usando datos de brillo solar. Como complemento a este modelo se puede usar las ecuaciones de Gopinathan [13] con las que se calculan los coeficientes de la ecuación de Angstrom.

El primer algoritmo publicado para el cálculo de la radiación solar global fue el de Ångström [12], que posteriormente fue modificado por Prescott [14]. En la actualidad, los modelos denominados Ångström-Prescott, que de acuerdo con Pelkowski incluyen de forma integral las interacciones entre la atmósfera despejada y la radiación solar, son utilizados debido a su sencillez y facilidad en el cálculo de la radiación solar. Estos modelos para poderlos utilizar, requieren indispensablemente de datos medidos "in situ" de la radiación solar global. El modelo de luz solar de Ångström-Prescott [12] modificado utilizado en el estudio viene dado por la ecuación (1).

$$\frac{G_{dm}(0)}{Bo_{dm}(0)} = a + b \cdot \frac{n}{N} \quad (1)$$

Donde $G_{dm}(0)$ es el promedio mensual de la irradiancia global diaria en la superficie horizontal, $Bo_{dm}(0)$ es el promedio mensual de la irradiancia solar extraterrestre, n es el promedio mensual de las horas diarias de brillo solar, N es la máxima duración de sol diaria promedio mensual posible, y a y b son los coeficientes de regresión. La relación de n/N es la fracción del número máximo posible de horas brillantes de sol, y $G_{dm}(0) / Bo_{dm}(0)$ es el coeficiente de transmisión atmosférica, comúnmente conocido como índice de claridad K_{TM} que se da por la ecuación (2).

$$K_{TM} = \frac{G_{dm}(0)}{Bo_{dm}(0)} \quad (2)$$

El promedio mensual de la irradiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal $Bo_{dm}(0)$ se obtiene del promedio de la irradiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal diaria $Bo_d(0)$ de la serie de los días del mismo mes en todos años y se calcula según la ecuación (3).

$$Bo_d(0) = \frac{24}{\pi} \cdot B_0 \varepsilon_0 (\omega_s \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_s) \quad (3)$$

Donde B_0 es la constante solar igual a 1367 W/m^2 , δ el ángulo de declinación solar, φ la latitud del lugar, ε_0 el factor de correlación de la excentricidad de la órbita de la tierra, y ω_s el ángulo de salida del sol todos los ángulos medidos en radianes. Los parámetros ε_0 y ω_s están dados como se evidencia en la ecuación (4).

$$\varepsilon_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (4)$$

Donde d_n es el número del día del año, y ω_s se presenta en la ecuación (5).

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (5)$$

La fracción de brillo solar es la fracción de horas de brillo medidos en la zona sobre las horas de brillo solar máxima posible n/N . El valor de n es el valor de las horas de brillo solar medido en las estaciones meteorológicas, y el valor de N es la duración del día o máxima duración de brillo de sol, y es dependiente del ángulo de salida del sol ω_s , como se observa en la ecuación (6). Aquí se mide los ángulos en grados.

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (6)$$

Para calcular los coeficientes de la ecuación de Angstrom a y b se usa la correlación validada por Gopinathan para cualquier ubicación en todo el mundo y se presentan en las ecuaciones (7) y (8).

$$a = -0.309 + 0.539\cos\varphi - 0.0693h + 0.290\left(\frac{n}{N}\right) \quad (7)$$

$$b = 1.527 - 1.025\cos\varphi + 0.0926h - 0.359\left(\frac{n}{N}\right) \quad (8)$$

Donde φ es la latitud, h es la altitud y n/N la fracción de brillo solar. Los coeficientes así estimados se pueden emplear para estimar la radiación global en una superficie horizontal con una precisión de aproximadamente el 10%. La precisión de los datos estimados sobre la radiación global puede mejorarse aún más al obtener constantes regionales en las ecuaciones de a y b [13].

3. MÉTODO

En este proyecto se realiza una investigación aplicada con un enfoque cuantitativo, un alcance descriptivo y correlacional y un diseño no experimental transversal. Este proyecto se realizó en tres fases, primero se realizó un diagnóstico de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Departamento del Valle del Cauca a partir de información encontrada en Celsia y la UPME. Se revisaron bases de datos de SSFV registrados en Celsia, EPSA y en la UPME donde además se recopilaron para algunos proyectos registros de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA.

Seguidamente se realizó un análisis de la radiación solar del departamento mediante información de las bases de datos meteorológicas como el IDEAM. Finalmente, se realizó un estudio de caso en el desempeño energético en un SSFV instalado a red en el departamento objeto de estudio. En la Figura 1 se presenta la metodología de la presente investigación.

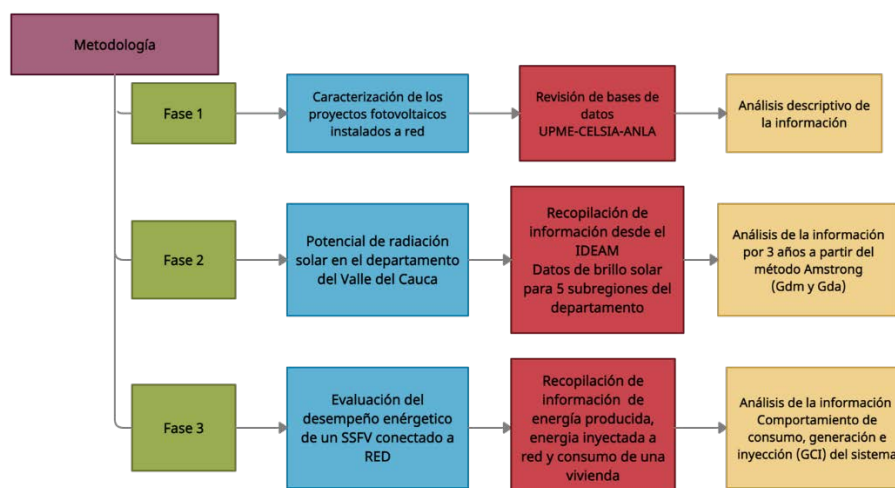


Figura 1. Metodología de trabajo

Uno de los retos más significativos de esta investigación fue conocer el potencial que tiene el departamento del Valle del Cauca en cuanto a energía solar fotovoltaica. Este departamento es uno de los treinta y dos departamentos de Colombia, su capital es Santiago de Cali y está ubicado en las regiones andina y pacífica. Se localiza en el suroeste del país. Cuenta con una superficie de 22.140 km², lo que representa el 1.94% del territorio nacional y está dividido políticamente y administrativamente en 42 municipios y 5 subregiones como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Subregiones del departamento del Valle del Cauca

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de los SSFV conectados a red en el departamento del Valle del Cauca

Desde las bases de datos de UPME, CELSIA y ANLA se identificaron 130 SSFV conectados a red [15], los cuales se encuentran distribuidos en las diferentes subregiones como se identifica en la Figura 3. La subregión sur presenta la mayor participación de los SSFV en un 78.46%, en esta zona se encuentra la capital del departamento, la ciudad de Cali, y algunas ciudades altamente industrializadas como Yumbo y Palmira Valle. Seguidamente con un 10% se encuentra la subregión centro, donde se encuentran ciudades como Buga y Tuluá, que son de alta participación comercial en el departamento.

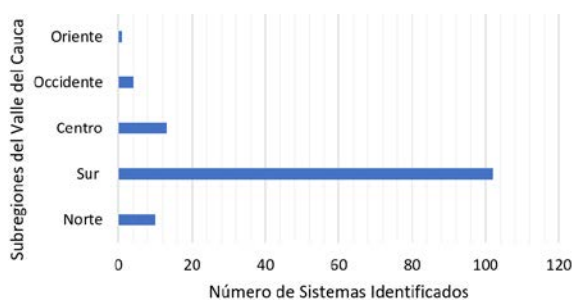


Figura 3. SSFV en el Valle del Cauca

La subregión sur, donde la participación ha sido evidente, se ha caracterizado por contar con un sector de empresas, de comercio y de educación considerable. En primera instancia, se resalta la ciudad de Cali como la capital del Departamento, con una extensión de 619 km² y eje principal de la actividad empresarial del suroccidente del país.

Entre las principales ciudades de Colombia, Cali registró el segundo mayor crecimiento de la producción industrial (2.4%) durante enero-noviembre de 2019 después de Barranquilla (4.8%). Cali y Yumbo registraron crecimientos anuales superiores al total de la industria nacional en el mismo periodo (2.4 y 1.9%) respectivamente. La región del Valle del Cauca es la que posee un consumo per cápita eléctrico más alto del

país, seguido de Noroeste, Centro y Costa Caribe [16], las cuales están reflejadas primordialmente por el nivel de la actividad económica en sectores claves de consumo de electricidad (Industria y comercial). El departamento presenta un gran potencial, cuenta con el sistema solar fotovoltaico más grande del país instalado en una institución educativa -Universidad Autónoma de Occidente, y cuenta con la primera granja solar de Colombia desde finales de 2017, la cual genera 16 GWh año de energía [17].

Teniendo en cuenta el potencial y las oportunidades de inversión que ofrece el Valle del Cauca para el desarrollo de proyectos de energías renovables, es importante conocer como la Ley 1715 de 2014 ha impactado la región. Este impacto se ha dado desde los incentivos tributarios para la inversión, investigación y desarrollo, además, para la producción y utilización de energía a partir de las FNCE, caso que se evidencia en el desarrollo de esta investigación.

En cuanto al sector de la economía donde emplean la energía solar fotovoltaica registradas en el departamento, se identificó que el sector industrial es el de mayor participación con un 45,4%. Este resultado está de acuerdo con el hecho de que la mayoría de SSFV se encuentran en la subregión sur donde se encuentran las grandes ciudades industriales del departamento como Cali y Yumbo. En segundo lugar, se encuentra el sector residencial en un 21,5% como se muestra en la Figura 3.

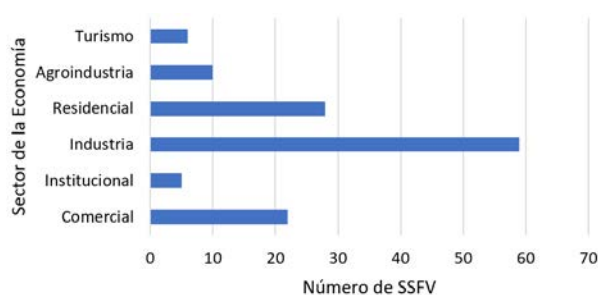


Figura 4. Sectores de la economía de los SSFV

En cuanto al tipo de zona donde están distribuidos los SSFV, el 26% se encuentran en la zona urbana y el 74% en la zona rural. Esto se debe a que la mayoría de las industrias identificadas se encuentran en las cabeceras municipales. Cabe destacar que el sector de la agroindustria es participativo en los proyectos identificados en un 7.69%.

En la Figura 5 se presenta la distribución de los 116 SSFV registrados en la UPME de acuerdo con su capacidad instalada. Esta categorización está de acuerdo con la resolución CREG 030 de 2018, que entró en vigencia a partir del 1 de mayo del 2018, en la que se establece que es generación a pequeña escala entre 0 y 100 kW y gran escala con capacidades entre 1 MW a 5 MW corresponde al indicado en este artículo. El 53.03% son sistemas a pequeña escala, su mayor participación se da en los sectores industrial, ubicado en su mayoría en el municipio de Yumbo, y el residencial, ubicado en su mayoría en los municipios Palmira, Cali y Jamundí. Así la subregión Sur se identifica como la más participativa en la instalación de SSFV conectados a red en el departamento.

Los SSFV se encuentran en instalaciones entre 101-500 kW en un 24.13% y en rangos mayores a 1000 kW 7.75%; en las capacidades más altas mayores a 5000 kW se encuentra el proyecto Celsia Solar Yumbo que fue la primera granja solar de Colombia conectada al SIN. Actualmente, la granja le entrega su energía a la planta de producción de Postobón Yumbo. Los sistemas enmarcados en el alto rango de producción, corresponden al 7.75%, del total analizado. Estos proyectos se encuentran en marcha desde el sector empresarial energético, lo que pone de manifiesto la capacidad de generación de la subregión sur.

En cuanto al análisis ambiental se consideró el indicador empleado para medir el impacto ambiental de sistemas conectados a red. El más utilizado es la emisión de CO₂ o huella de carbono [18]. En Colombia, la UPME el 26 de diciembre de 2017, expidió la Resolución 804 de 2017 por medio de la cual se actualizó el factor marginal de emisión de GEI del SIN a 0.367 Ton.CO₂/MWh, para realizar el cálculo de las reducciones de emisiones de GEI de los proyectos aplicables al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Con esta norma

se evidencia que en el ámbito nacional se busca dar cumplimiento a los compromisos adquiridos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1994, para buscar la estabilización de GEI y también al Protocolo de Kyoto, que fue más allá y fijó obligaciones cuantificadas de reducción.

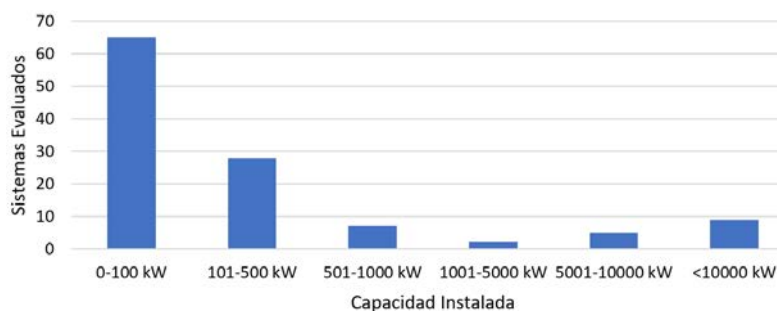


Figura 5. Capacidad instalada en SSFV del Valle del Cauca

Basados en la reglamentación dada en la Ley 1715 sobre la promoción de las energías renovables, de acuerdo con 27 sistemas solares registros en la UPME conectados a red, con información de producción energética anual, se dejan de emitir en total 8.999,85 Ton.CO₂/MWh. En la Tabla 1. se encuentran los proyectos con mayor participación en reducción de emisiones de GEI a la atmósfera, se destacan proyectos del sector energético y el sector industrial, además de ser proyectos ubicados en el municipio de Yumbo.

Tabla 1. Proyectos con mayor participación de emisiones

	Capacidad (kW)	Producción Anual (kWh /año)	Reducción de emisiones Ton.CO ₂ /MWh
Proyecto fotovoltaico Celsia Solar Yumbo	9.900	16.570.000	6081.9
Comestibles Aldor	975	16.570.000	559.675
Centro Internacional de Agricultura Tropical Ciat Valle del Cauca	902.4	1.274.000	518.571
Plásticos especiales planta flexibles	650	1.030.000	378.01
Denim Factory	240.84	365.540	134.15

A nivel nacional, la zona industrial de ACOPI en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca) es catalogada altamente contaminante por ser una de las zonas con importantes niveles de contaminación atmosférica [19]. Existen estudios que confirman que la contaminación atmosférica tiene una relación directa con la salud en Yumbo, lo que genera alzas en la morbilidad representada en infecciones respiratorias agudas; lo que indica que se debe incentivar al sector industrial a adoptar tecnologías más limpias para la generación de energía. La mayor participación se da en proyectos de producción anual baja, por lo cual sus emisiones están en escala de 0 a 50 Ton.CO₂/MWh, lo que evidencia que el sector industrial y residencial aportan significativamente a la reducción de GEI.

Por otro lado, en cuanto a la caracterización financiera desde la revisión general realizada a los SSFV, se identificaron 130 proyectos, para la mayoría, la empresa promotora es la electrificadora del departamento del Valle del Cauca, EPSA S.A E.S. – Filial de Celsia en la región. EPSA es el operador de red energética en 37 de los 42 municipios del Valle del Cauca y un municipio del Chocó (San José del Palmar). En segundo lugar, se encuentran algunas empresas dedicadas a la instalación y comercialización de energía como Datecsa S.A., Vatia, Smart Consulting Group SAS (Figura 6), Innova Solar, la cuales muestran que las pequeña y medianas empresas existentes pueden fortalecerse o crear una nueva división, para diseñar e implementar tecnología en energía solar.

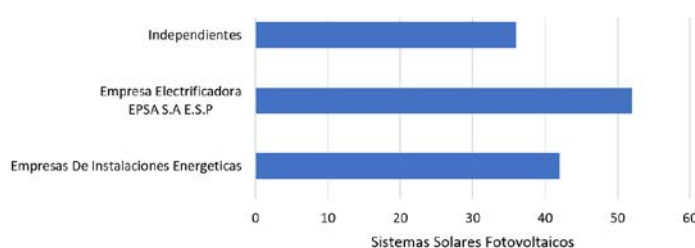


Figura 6. Empresas promotoras de ESFV

También, se presentan algunos grupos independientes como Comfenalco Valle, Pricemart Colombia S.A.S, instalaciones comerciales de alto consumo energético, lo que demuestra que las empresas ven las energías renovables como una optimización en recursos energéticos. Estas empresas encuentran un nuevo nicho de mercado, lo que genera nuevas oportunidades laborales y por tanto de formación en este campo de la transformación de energía, campo que está en crecimiento mundial.

Para los costos de los sistemas instalados, se encontraron 31 registros con dicha información recopilada desde Celsia y ANLA, se evidencia que el 41,9% de los SSFV instalados tuvieron costos mayores a los \$500 millones, lo cual es coherente a los análisis presentados anteriormente ya que la mayor cantidad de sistemas se usan a nivel industrial. Los sistemas con valores globales entre \$0 y \$100 millones están en un 25.8% pues son sistemas de baja escala lo cual es evidente con las capacidades instaladas.

De los proyectos anteriormente encontrados se evidenciaron 23 registros con aplicaciones en incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. De estos registros, que fueron encontrados en UPME y en ANLA, los tipos de incentivos predominantes en la región fueron un 60% con la Exclusión de Bienes y Servicios de IVA, seguido de un 39% con Deducción Especial en la Determinación del Impuesto sobre la renta. En promedio se encontraron ahorros en 19% del costo total por IVA y en deducir anualmente renta con valores no superiores al 50% liquidada por el contribuyente.

En cuanto a descripción de la oferta tecnológica fotovoltaica en el departamento del Valle del Cauca. Los elementos más comunes en los que sustentan el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos en el departamento del Valle del Cauca en sistemas conectados a red son módulos solares e inversores. De 27 registros completos encontrados en Celsia y UPME se encuentran 172.162 módulos fotovoltaicos instalados, las marcas empleadas en las aplicaciones de generación de energía solar para los paneles solares fueron: Jinko, Hareon Solar, Kyocera y Trina Solar, todos con tecnologías policristalina. Se demandan módulos en 260, 265, 270, 280, 320 y 340 (Wp). También se encuentran 168 inversores de marcas Fronius, Enphase, ABB, Schneider Electric, Hersic y AP systems y se encuentran en 480, 208 y 640 V.

De los 27 registros, 26 contaban con información completa para analizar el área instalada, aquí se evidencia que el departamento cuenta con un área instalada de 35026.21 m² lo que equivale aproximadamente a 9 canchas de fútbol, de los 26 sistemas 11 se encuentran en una escala baja de área instalada, seguido de la escala alta con una cantidad de 7, lo cual es coherente con los comportamientos costos y capacidad instalada. Si bien son grandes áreas, desde una perspectiva de sostenibilidad son áreas escalares de aprovechamiento en techos y apta en cualquier lugar de la región, por tanto, es importante evidenciar el área de los demás sistemas que generan energía al departamento.

En el departamento están en operación 10 centrales hidroeléctricas en un rango desde 1.7 MW hasta 429 MW. De las 10 centrales 2 centrales cuenta con represa y las demás son pequeñas centrales hidroeléctricas que aprovechan corrientes o caídas de agua, a continuación, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Centrales hidroeléctricas ubicadas en el departamento del Valle del Cauca

Centrales Hidroeléctricas	Capacidad (MW)
Alto Tuluá	20
Alto y Bajo Anchicayá	429
Amáime	19.9
Bajo Tuluá	20
Calima	132
El rumor	2.5
Nima I y II	6.7
Río Cali I y II	1.8
Riofrío I	1.7
Riofrío II	10

Como se observa, las hidroeléctricas de mayor capacidad son la de Albán (Alto y Bajo Anchicayá) y la de Calima las cuales abarcan capacidades instaladas de 429 MW y 132 MW respectivamente. Por un lado, Calima abarca un área de 1934 hectáreas inundadas con 581 millones de metros cúbicos de agua. El

embalse mide 13 kilómetros de largo por 1.5 kilómetros de ancho. Por otro lado, solo Bajo Anchicayá comprende una longitud de 2.5 km y un espejo de agua de 18 hectáreas para sus condiciones de máxima cota, la cual corresponde al volumen de embalse total de acuerdo con el diseño inicial de 5'100.000 m³, de los cuales se consideraron 2'800.000 m³ como embalse muerto. La presa es una estructura en concreto macizo tipo arco de gravedad, que tiene una altura de 60 metros, una altura a nivel de vertedero de 53 metros, ancho de base de 45 metros, longitud de estribos de 206.5 metros y una longitud del rebosadero de 141 metros [20].

Lo anterior pone en evidencia algunas desventajas pues las represas no pueden ser construidas en cualquier lugar, es necesario que se den las condiciones apropiadas de caudal y altura, se debe tener en cuenta el medio natural ya que se puede alterar la vida de los peces y demás organismos acuáticos. Es evidente que se necesita un gran espacio para construir la presa y la central hidroeléctrica, además de tener en cuenta el gran impacto paisajístico que estas tienen:

- Presa: Las presas son las infraestructuras de obra civil. Su desventaja principal es el impacto paisajístico.
- Embalse: Los embalses almacenan grandes volúmenes de agua. El agua que se retiene modifica el caudal del río.

De acuerdo con lo anterior, se evidencia las grandes capacidades que se deben tener para la construcción de sistemas hidroeléctricos; lo cual pone en ventaja la energía solar pues son infraestructuras modulares y de aprovechamientos de espacios de poco uso como techos. Además, estos sistemas son escalables, se puede instalar la cantidad de placas que se desee y generar progresivamente ampliaciones, sin generar problemas ambientales contundentes, por ejemplo, plantas pequeñas (hasta 5MW) en techos dentro de las ciudades podría ser más sostenible que tener una central hidroeléctrica de 400 MW o incluso que tener un mega parque solar de 400 MW dado que ambos ocupan suelo que podría tener otro uso.

4.2 Potencial de radiación solar en el departamento del Valle del Cauca

En la segunda fase de la investigación se realizó un análisis del potencial de radiación solar que existe en la región a partir de los datos reportados por el IDEAM, horas de brillo solar (hbs) total de cada mes y anuales por 3 años. Este análisis se realizó para las 5 subregiones del departamento.

Aplicando el método Angström-Prescott establecido en la ecuación (1) del marco conceptual a los datos de *hbs* reportados por el IDEAM para una serie de tiempo de 3 años (2017, 2018 y 2019), se calculó la irradiación sobre superficie horizontal, y se obtuvo como salida el promedio anual $G_{da}(0)$. En la Tabla 5 se registran los $G_{da}(0)$ y sus estadísticas suponiendo una distribución normal; se realizaron los análisis con una significancia de 5% correspondiente a un intervalo de confianza *IC* del 95%, además se dan los valores del error estándar *EE* y desviación estándar *S*. Es de anotar que en las estaciones del IDEAM no se encontraron datos completos, de todas las regiones, para un rango de tiempo más amplio, por tanto, se procedió con los análisis para los tres años que tenían información completa.

Tabla 3. Promedio diario anual $G_{da}(0)$ de irradiación calculado de los datos del IDEAM

Irradiación solar global sobre superficie horizontal $G_{da}(0)$ (kWh. día /m ²)					
	Norte	Centro	Occidente	Oriente	Sur
Promedio	4.92	4.60	4.16	3.77	4.79
Máximo	5.74	5.25	4.84	4.47	5.41
Mínimo	3.95	3.86	3.50	3.18	4.22
S	0.45	0.50	0.39	0.49	0.38
EE	0.14	0.23	0.12	0.16	0.11
IC95%	0.27	0.44	0.24	0.31	0.22

En la tabla anterior se observa que la subincluir región con el promedio de $G_{da}(0)$ más alto es la subregión norte con un valor de 4.92 kWh.día/m², esta subregión se encuentra rodeada por las cordilleras occidental y central, lo que significa para esta zona una topografía quebrada en los extremos y un valle en el medio. Estas condiciones permiten suponer que su baja nubosidad indica una zona con buena de radiación.

La subregión oriente cuenta con una zona montañosa con la altitud más alta presente en el estudio; si bien la altitud determina la cantidad de radiación que se recibe debido a que en zonas de alta montaña el aire es más limpio y más delgada la capa atmosférica que deben recorrer los rayos solares, la nubosidad también juega un papel importante [21]. En promedio, por cada 1.000 metros de incremento de la altitud, la radiación aumenta entre un 10% a un 12%, pero las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más radiación que una nube delgada. Por tanto, en la región oriente se presenta el promedio más bajo ya que el factor que afecta en mayor parte la radiación efectiva es la alta nubosidad.

Para la región sur se da un promedio de radiación de 4.79 (kWh.día/m²), dato importante ya que esta subregión se caracteriza por presentar alto volumen de proyectos fotovoltaicos, como se presentó en el análisis de la fase anterior. Además, en esta región se encuentra la capital del departamento y las zonas industriales más desarrolladas del país.

4.3 Desempeño energético de un caso de estudio en el departamento del Valle del Cauca

Con el fin de identificar el desempeño energético de un SSFV ubicado en la subregión sur del departamento se analizaron datos de dos instrumentos de medida: uno para el SSFV y otro de frontera. En el medidor del SSFV se tomaron datos de la energía producida por el sistema cada 15 minutos (kWHD_{sis}). En el medidor de frontera se tomaron dos datos: uno a la salida de la vivienda y entrada al medidor (KWHD_{front}) y otro a la salida de la red y entrada al medidor (kWHR_{front}). Con esta información se pudo realizar un análisis de consumo, generación e inyección del SSFV instalado en la vivienda.

A partir de la información recolectada se realizaron las sumatorias de los valores kWHD_{sis}, KWHD_{front} y kWHR_{front} para cada día y cada mes y a partir de estos totales se calculó la generación (kWHD_{sis}), el consumo (kWHD_{sis} - KWHD_{front} + kWHR_{front}) y la inyección diaria y mensual (KWHD_{front} - kWHR_{front}).

Como se observa en la Figura 7, en los 5 meses el sistema genera más energía de lo que consume la vivienda, en el mes 2 se presenta un excedente mayor al consumo equivalente en un 125.76 %, en los demás meses el promedio de inyección a la red es de 20.42% en excedente. Los excedentes provienen de variaciones mensuales en el consumo y también en la generación de los sistemas fotovoltaicos.

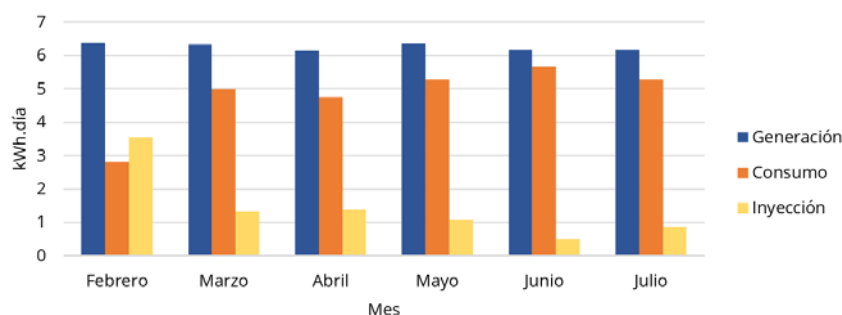


Figura 7. GCI Vivienda

Para hacer un análisis más profundo de la vivienda, se realizó una serie de tiempo y así evidenciar el comportamiento de generación, consumo e inyección diarios para el mes de febrero. Como se observa en la Figura 8, se presenta un comportamiento en generación para los días 4, 8, 15, 16, 18 y 25 por debajo de 6 kWh.día; en promedio el mes de febrero presentó una radiación de 4.66 (kWh.día/ m²), pero para estos días la radiación estuvo entre 2 y 3.5 (kWh.día/ m²). Para los días 2 y 6 de mayor generación se presentan valores de radiación cerca de 6.2 (kWh.día/ m²), lo que demuestra la relación directa que tiene la generación de los SSFV con la radiación global horizontal.

Para 6 días de los 29 del mes no hubo inyección neta a la red, por el contrario, se hizo solicitud a la red para así abastecer el consumo; para 23 días se genera excedente a la red. Estos resultados permiten evidenciar que los SSFV suministraron la energía requerida de manera mensual que corresponde a la manera de realizar la diferencia entre generación y consumo de acuerdo a la CREG 030 de 2018.

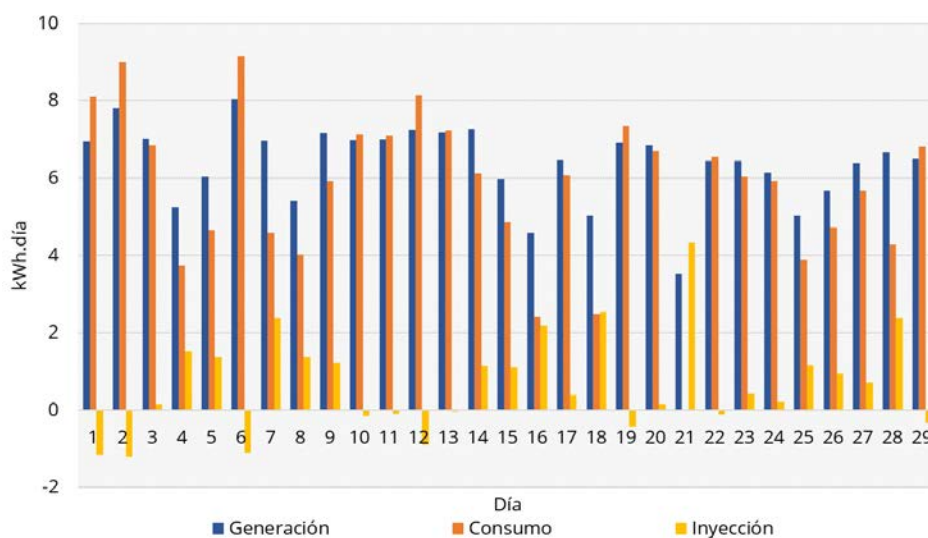


Figura 8. GCI diario para febrero

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación del potencial de irradiación se realizó para las 5 zonas del departamento del Valle del Cauca, a partir de los datos de hrs reportados por las estaciones del IDEAM. Se obtuvieron datos mensuales para las 5 subregiones en un período de 3 años. A partir del modelo de Angstrom-Prescott y los datos de brillo solar, latitud y altitud de la zona de las estaciones, se calcularon los promedios diarios anuales de irradiación $G_{da}(0)$.

Se determinó que la subregión norte del Valle presenta los promedios más altos de irradiación, zona totalmente plana, mientras que el valor más bajo se dio para la subregión Oriente, la zona montañosa del departamento, con variaciones recurrentes de altura. El valor máximo para la subregión norte fue 4.92 kWh.día/m^2 , seguidamente fue la subregión Sur con valores de 4.79 kWh.día/m^2 , centro con 4.6 kWh.día/m^2 , occidente con 4.16 kWh.día/m^2 y oriente 3.77 kWh.día/m^2 .

Los resultados de irradiancia muestran que los valores de brillo solar afectan directamente los valores del cálculo de irradiancia, sin embargo, los efectos de la altitud y de la latitud también influyen en los resultados. Lo anterior se puede observar en la ecuación de Angstrom-Prescott y las ecuaciones para calcular los coeficientes a y b propuesto por Gopinathan y seguidas en este trabajo mediante las cuales se realizaron los cálculos para el Valle del Cauca (Tabla 3). Se observa un comportamiento similar entre subregiones norte y sur y diferente para el oriente; si bien centro y occidente son regiones geográficamente diferentes, se presentan comportamientos de hrs e irradiancias similares.

Por otra parte, como se mostró en los resultados de los SSFV encontrados en el departamento del Valle del Cauca conectados a red se identificó la mayor participación en la Subregión sur, zona de alto impacto industrial por hacer parte de la capital del departamento y contar con la ciudad de Yumbo, la capital industrial del país. Se observa además una amplia participación para las subregiones Norte y Centro, lo que indica un buen aprovechamiento de la energía solar de la región. Se establece que la participación de estos proyectos en su mayoría se da en la zona urbana, lo que pone en manifiesto la necesidad indagar un poco más sobre los SSFV de la zona rural, ya que un análisis para zona no interconectada podría generar un panorama más general al estado actual de la región y evidenciar su desarrollo en esta fuente de energía.

El departamento cuenta con una gran capacidad instalada, entre la que se incluyen los proyectos más grandes del país en cuando a ESFV se refiere, como lo es la granja solar de Yumbo. Este sector tiene varios proyectos instalados, lo que es beneficioso ambientalmente ya que es una zona con un alto porcentaje de emisiones de GEI a la atmósfera; se evidencia la necesidad de ir adoptando tecnologías más sostenibles.

El departamento del Valle del Cauca, al ser un sector activo en los temas energéticos, presenta una gran capacidad empresarial en cuanto a la instalación y comercialización de energía. Varias empresas han ido

transformando su modelo de negocio hacia instalación de tecnologías sostenibles, aprovechando así la capacidad solar que tiene la región. Actualmente, es cada vez más común encontrar este tipo de instalaciones en el sector empresarial o industrial, ya que es una tecnología que beneficia el ahorro económico y el cuidado del medio ambiente mediante la reducción de la huella de carbono.

Sin duda, la percepción de la inversión es elevada aproximadamente \$500 millones para los grandes sistemas, sin embargo, esta tecnología tiene un tiempo de vida de por lo menos 25 años y el retorno de inversión es normalmente mucho menor que este tiempo. El costo también depende de la necesidad de energía eléctrica que se requiera cubrir, y puede ir desde un 20%, 50% o hasta el 95%, porcentaje que se determina con un análisis particular, ya que cada sistema fotovoltaico es personalizado. Es evidente que los SSFV son una inversión y una oportunidad de aumentar la competitividad ya que en los registros analizados se confirman los beneficios tributarios y la efectividad que está abarcando la Ley 1715 para el apoyo a estas nuevas formas de energía.

La región compite con tecnología internacional y eficiente, en promedio se instalan módulos solares con una eficiencia del 16.5 %, los cuales funcionan bien para la región, pues se cuenta con una potencia solar indicada para generar energía a partir de estos módulos.

Según el análisis realizado, los proyectos a gran escala requieren espacios grandes para instalar el sistema, sin embargo, la opción de aprovechar la instalación en azotea puede representar un aprovechamiento del área disponible; la instalación en piso incrementa la percepción de empresa social y ecológicamente responsable por su fácil visibilidad ante los demás. Desde el análisis de la matriz energética del departamento, se evidencia que las centrales hidroeléctricas requieren grandes terrenos para su instalación, lo que trae consigo daño en los territorios y las fuentes hídricas intervenidas; por tanto, el requerimiento de área para la instalación de SSFV no es necesariamente un problema adicional o nuevo para el sector, por tanto, los SSFV pueden ser una buena opción para la diversificación de la matriz energética.

Por otra parte, el SSFV analizado que se encuentra conectado a red, muestra un balance entre generación y consumo, en la mayoría de los casos hay inyección mensual, vale mencionar que a vivienda estaba habitada por 3 personas. Se puede establecer entonces, el buen funcionamiento de los sistemas se da por una instalación de equipos adecuados, un dimensionamiento bien diseñado y una relación radiación generación evidente.

Todo lo anterior pone de manifiesto la buena capacidad climática, técnica, empresarial e industrial del Departamento del Valle del Cauca con relación al uso de las FNCER en específico la ESFV. Se evidencia que hay un crecimiento en el tiempo en el uso de ESFV, que las políticas están dando sus frutos en cuanto a incentivar la implementación, y que se cuenta con un potencial de radiación importante para hacer eficientes los SSFV que se instalen. Es de anotar que se requieren datos de radiación para cada región en particular que permitan hacer diseños más precisos y óptimos, y que es necesario considerar las condiciones propias de cada lugar para garantizar desempeños óptimos de los sistemas.

6. CONCLUSIONES

Se registra un alto volumen de proyectos registrados conectados a red, se encontró información para 130 SSFV instalados y pendientes a instalar, lo que evidencia el crecimiento energético en la región en cuanto a ESFV. Se registra que para las Subregiones Sur y Norte hay una mayor cantidad de proyectos; lo cual se correlaciona muy bien con la información analizada de radiación solar, por tanto, estas zonas se convierten en regiones de alto potencial para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica.

La energía solar se convierte en una solución viable para reducir la huella de carbono como por ejemplo en la ciudad de Yumbo que es uno de los municipios industriales más grandes del país y con registros altos de contaminación por su actividad industrial. La energía solar en el departamento es una opción viable para generar energía eléctrica en cualquier lugar; es modular y escalable y puede empezar a generar la transformación en la matriz energética de la región e ir independizándose de la energía hidroeléctrica.

El potencial solar de la región tiene promedios altos de radiación solar, lo que evidencia la capacidad climática para la generación de energía desde capacidades solares en el departamento.

Se registraron comportamientos óptimos en cuando a generación, consumo e inyección en un SSFV conectado a red, se evidencia la capacidad técnica en la que incursiona el departamento y su generación óptima de energía.

REFERENCIAS

- [1] A. Restrepo, R. Becerra, and J. E. G. Tibaquirá, "Energetic and carbon footprint analysis in manufacturing process of bamboo boards in Colombia," *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 563–571, Jul. 2016.
- [2] R. Rajesh, "On sustainability, resilience, and the sustainable-resilient supply networks," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 15, pp. 74–88, Jul. 2018.
- [3] Iberdrola, "Transición energética, una apuesta de Iberdrola hace 20 años - Iberdrola." Recuperado: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/transicion-energetica>.
- [4] M. M. De Carvalho, A. S. Magalhães, and E. P. Domingues, "Economic impacts of the expansion in the use of residential solar energy in Minas Gerais," *Nov. Econ.*, vol. 29, no. 2, pp. 459–485, May 2019.
- [5] J. Restrepo-Trujillo, R. Moreno-Chuquen, and F. N. Jiménez-García, "Strategies of expansion for electric power systems based on hydroelectric plants in the context of climate change: Case of analysis of Colombia," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 6, pp. 66–74, 2020.
- [6] K. S. Boodoo, M. E. McClain, J. J. Vélez Upegui, and O. L. Ocampo López, "Impacts of implementation of Colombian environmental flow methodologies on the flow regime and hydropower production of the Chinchiná River, Colombia," *Ecohydrol. Hydrobiol.*, vol. 14, no. 4, pp. 267–284, Jan. 2014.
- [7] I. Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Capacity Statistics 2019*. 2020.
- [8] R. E. World, "World's Energy Giants Flock to Latin American Renewables Market | Renewable Energy World." Recuperado: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/world-s-energy-giants-flock-to-latin-american-renewables-market/>
- [9] CELSIA, "Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia - Celsia - Eficiencia energética." Recuperado: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>
- [10] J. W. Burnett and F. Hefner, "Solar energy adoption: A case study of South Carolina," *Electr. J.*, vol. 34, no. 5, p. 106958, Jun. 2021.
- [11] IDEAM, "Atlas Interactivo - Radiación IDEAM." Recuperado: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- [12] O. Guzmán Martínez, J. Vicente Baldión Rincón, O. Simbaqueva Fonseca, H. Josué Zapata, and C. Chacón Cardona, "Coeficientes Para Estimar La Radiación Solar Global A Partir Del Brillo Solar En La Zona Cafetera Colombiana," 2013.
- [13] K. K. Gopinathan, "A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration," *Sol. Energy*, vol. 41, no. 6, pp. 499–502, Jan. 1988.
- [14] C. Girado-Polo and L. Gónima-Gónima, "Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 42, no. 162, p. 104, 2018.
- [15] UPME- SIEL, "Capacidad Efectiva de Generación (SIN)," *SIEL - Sistema de Información Eléctrico Colombiano*, 2020. Recuperado: [http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%252fSIEL+UPME%252fGeneraci%25u00f3n%252fCapacidad+Efectiva+de+Generaci%25u00f3n+\(SIN\)](http://www.upme.gov.co/Reports/Default.aspx?ReportPath=%252fSIEL+UPME%252fGeneraci%25u00f3n%252fCapacidad+Efectiva+de+Generaci%25u00f3n+(SIN))
- [16] UPME, "Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia - Cluster de Energía Eléctrica, Cámara de Comercio de Bogotá," 2020. Recuperado: <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Energia-Elctrica/Noticias/2016/Julio-2016/Proyeccion-de-la-demanda-de-energia-electrica-y-potencia-maxima-en-Colombia>
- [17] CELSIA, "Granjas solares," 2018. Recuperado: <https://www.celsia.com/es/granjas-solares/>
- [18] L. G. Acuña, R. V. Padilla, and A. S. Mercado, "Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator," *Renew. Energy*, vol. 106, pp. 68–77, Jun. 2017.
- [19] Alcaldía de Yumbo, "Diagnóstico Participativo Construcción Plan de Desarrollo, 2020-2023, Creemos en Yumbo," 2020.
- [20] ANLA, "PIS - Proyecto Central Hidroeléctrica de Bajo Anchicayá," 2016. Recuperado: <https://www.anla.gov.co/proyectos/proyecto-de-interes-en-seguimiento-central-hidroelectrica-de-bajo-anchicaya>
- [21] J. Daniel *et al.*, "La atmósfera, el tiempo y el clima." Recuperado: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/medioambiente/cap3partel.pdf>

Retos regulatorios y de gestión del espectro en relación con la implementación de la tecnología 5G. Caso de estudio: Colombia

Dilan Steve Vargas Pérez¹
Universitaria Agustiniiana
Colombia

Se plantea una investigación que tiene como fin ofrecer posibles soluciones a los retos regulatorios y de gestión del espectro que han tenido otros países con la implementación de la red 5G. Adicionalmente, se analizan las soluciones implementadas en otros países para el desarrollo de cada uno de los retos que se interpusieron. Se buscaron los retos con la implementación de 5G, y se catalogan como más importantes y en común de los países que ya tenían habilitada la red; luego se buscaron y analizaron las soluciones en cada país y se presenta una posible solución a los mismos, ofreciendo información para que Colombia los puede afrontar al momento de implementar la tecnología 5G. Se logró solucionar los retos seleccionados, tales como la asignación del espectro, para el cual se sugieren frecuencias; también al reto de las antenas, los dispositivos móviles, la telemedicina para operar en tiempo real, y el IoT con múltiples conexiones para facilitar los procesos.

¹ Estudiante de Ingeniería en Telecomunicaciones, vinculado al semillero de investigación IDESTIC.
Contacto: dilan.vargas@uniagustiniana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad presenta varios cambios tecnológicos, uno de estos cambios importantes es la llegada de la tecnología 5G, la cual busca que la comunicación sea de forma ágil y segura para los usuarios. Según el CRCOM [1] algunas de las características más esperadas de las redes 5G, son la rapidez de la navegación en internet, la alta disponibilidad, es decir la capacidad del sistema para ofrecer un servicio activo sin fallas en un tiempo extenso; por último, tenemos la disminución de las fallas para satisfacer a los usuarios. Por otro lado, la ITU [2] desempeña un papel fundamental en la elaboración de reglamentos y normas mundiales con el fin de garantizar que las redes 5G sean seguras, confiables y eficientes para un mejor funcionamiento sin interferencias de las redes ya existentes. Además, también establece métodos de cálculo [3], como los que se mencionan en las recomendaciones UIT-R P.452, UIT-R P.530, entre otras.

En [4] se habla acerca de un problema que va a traer 5G y es que hay que incrementar la cantidad de antenas y usualmente la población está en contra de esto, ya que anteriormente se presentaron sucesos en los cuales se veían afectados por el deterioro de la estructura en las antenas y por otra parte hay población con temor de que les suceda algo parecido a lo que le sucedió a una familia en la ciudad de Barranquilla, según análisis por el mal cuidado de una antena que se encontraba cerca de su vivienda, con el pasar del tiempo esta antena se cayó dañando así media propiedad, dejando muertos y heridos.

Se busca con la tecnología 5G el avance para la renovación tecnológica y ser así un país [5] en crecimiento tecnológico en comparación con otros países, obteniendo con la nueva tecnología una velocidad mayor en las redes y con mejor estabilidad. Según GSMA [6] los principales retos son la instalación masiva de antenas para la creación de redes, verificar las frecuencias en las que se puede transmitir y la posibilidad de lograr el máximo potencial del internet de las cosas IoT.

En [4] se hizo un comparativo entre China y Estados Unidos más allá de las guerras tecnológicas que han tenido entre sí, la llegada de la tecnología 5G está evidenciando un gran cambio con el que se espera contar con vehículos inteligentes, implementación del 5G en campos de cultivos para hacer el trabajo más automatizado, mayor conectividad con la misma velocidad inicial, casas inteligentes y más autónomas.

2. MÉTODO

La realización del proyecto se basa en la metodología cuantitativa, por lo cual se empieza con la identificación de cuáles son los retos que enfrenta el mundo respecto a la implementación de la tecnología 5G, adoptándola así de una manera medible como, por ejemplo, ver los porcentajes de utilización de la tecnología en otros países y hacer un pronóstico para cuando llegue la tecnología 5G a Colombia. Luego se formula una hipótesis empírica de forma tal que indique cómo se va a comportar la tecnología en el país, con base en cómo se comportó la tecnología 4G; después se compara la hipótesis propuesta con el comportamiento que ha tenido la tecnología 5G en otros países donde ya esté en funcionamiento, para sacar un pronóstico de cómo se va a dar el desarrollo más adelante.

Adicionalmente, se analizan estadísticas hechas de lo que se espera lograr con el desarrollo en el país, con base a cómo se está comportando en el mundo y conocerlas bien para más adelante proponer qué se puede hacer al respecto, para que la implementación del 5G llegue a buen término y para que el país no cometa los mismos errores o descuidos que han tenido los países en los que ya se utiliza. Esto ayudará a que el país se fortalezca en las deficiencias que tienen los demás con respecto a la red.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de los retos que afrontará Colombia respecto a la regulación y la gestión del espectro

3.1.1 Reto respecto a las antenas

Según [7], la red 5G utilizará antenas de múltiples entradas – múltiples salidas MIMO que permiten enviar o recibir varios elementos con múltiples conexiones. El beneficio que estas antenas le aportan a los usuarios es que pueden conectarse simultáneamente a la red, manteniendo un alto rendimiento.

El tamaño físico de las antenas 5G MIMO, va a ser similar a las antenas 4G, a comparación que las antenas MIMO van a tener una frecuencia más alta, las frecuencias en las que se van a propagar serán desde los 9 KHz hasta los 3.000 GHz, el tamaño de la antena está en el rango de 15 a 50 metros y permitirá conectividad con más de 100 elementos en el mismo espacio físico, adicionalmente en estas antenas podemos encontrar velocidades de transferencia de hasta 600Mbps y un radio de cobertura de 500 metros.

Estas antenas serán controladas por el direccionamiento del haz, esto quiere decir que maneja una tecnología que permite que las antenas MIMO de las estaciones de base, direccionen una radioseñal hacia los usuarios y hacia los dispositivos, en lugar de emitir señales hacia todas las direcciones sin necesidad. La tecnología que usa este direccionamiento se basa en algoritmos para el procesamiento de la señal, esto se hace con el fin de determinar el mejor recorrido para que la radioseñal llegue a los usuarios con mayor brevedad, aumentando así la eficiencia ya que reduce la interferencia de radioseñales no deseadas.

Por otra parte, la página web [8] público un documento en el que habla sobre los temores que tienen algunos ciudadanos por las antenas 5G, tanto así que cuando estuvimos en cuarentena algunos ciudadanos en Reino Unido quemaron antenas 5G porque las relacionaban con la propagación de Covid-19.

Además de lo anterior cuando se habla de ondas, estamos hablando de emisión de radiación no ionizante, es decir que es la misma radiación que transmiten los electrodomésticos que tenemos en nuestros hogares como las neveras, los secadores de pelo, etc. Esta radiación es capaz de aumentar la temperatura, pero incapaz de romper enlaces moleculares. Para mantener esta radiación controlada es importante verificar la potencia máxima con la que transmiten estas antenas, por lo tanto, se opta por mantener la ubicación de estas antenas un poco más alejadas de la población en caso tal de que se necesite aumentar la potencia y así no causar daños a la población, por tal motivo es que se piensa en aumentar el número de antenas 5G para disminuir la potencia y a su vez disminuir la radiación.

Otro motivo para aumentar el número de antenas es por la frecuencia en la que se va a manejar la red 5G, que hasta el momento se habla de dejarlo en un rango de frecuencia de 9 KHz a 3.000 GHz.

Estas antenas no pueden situarse a centímetros de las viviendas o de las personas ya que sería peligroso para la salud, se aconseja que como mínimo estemos a dos metros de distancia de estas antenas para reducir la radiación a un 95%. Como garantía para la población la normativa indica que las antenas deben estar situadas en torres a 30 metros de altura, en el caso de los edificios es aconsejable situarlas en una zona no transitada a dos metros de altura, ya que las antenas emiten una radiación en un aproximado de 160° y así no afectaría a las viviendas inferiores.

3.1.2 Reto respecto a los celulares

Por otra parte, los equipos celulares de los usuarios van a poseer antenas con tecnología MIMO para permitir la conectividad y captar las frecuencias de onda milimétrica. Como bien sabemos los celulares que utilizamos también emiten radiación para poder establecer la conexión con la antena, la potencia de esta radiación va a variar en función de la señal que nos llegue, es decir que entre mejor cobertura tengamos menor radiación tendrá nuestro Smartphone.

Según la página web [9] los principales operadores de telefonía móvil en Colombia desde el 2018 comenzaron hacer las pruebas en sus dispositivos móviles con conexiones 5G, hasta el momento las expectativas se consideran altas ya que algunos de estos operadores se han basado en estudios con los desarrollos que han tenido operadores en otros países donde ya se está utilizando la tecnología 5G.

Según el gobierno es uno de los retos más grandes que tiene el gobierno para la incrementación de esta red, ya que sin dispositivos celulares la red 5G sería más complicada y no se podría aprovechar al 100% en especial con el IoT, otro de los grandes retos es la ubicación de las antenas en todos los territorios, ya que es fundamental que no afecte a los habitantes y que el lugar donde se ubiquen esté disponible para hacerle la debida adecuación para que se dé un excelente funcionamiento con la red.

3.1.3 Reto respecto a la asignación del espectro

En cuanto al reto digital para el 2021 se trata de la subasta de bandas para el tercer trimestre, investigación que ha venido haciendo el sitio web [10], el cual nos cuenta que Colombia busca hacer la subasta de 5G. La agencia nacional de espectro tiene como tarea hacer una revisión sobre las condiciones técnicas del uso en dicha banda. Para esta agencia el reto más grande es el de la instalación masiva de antenas por todo el país, ya que tienen que adecuar los lugares para la instalación y adicionalmente todos los sitios no se encuentran aún en disposición para la instalación de las antenas.

En cuanto a los demás temas que se tienen que desarrollar podemos encontrar el de la disponibilidad del espectro radioeléctrico, este proceso aún se encuentra pendiente por un presunto uso ilegal por parte de Avantel y por otro lado está el proyecto de política del espectro radioeléctrico. El pasado 18 de agosto del año 2020 la Agencia Nacional del Espectro iniciaron dos investigaciones administrativas de carácter sancionatorio en contra de Avantel, por el uso no autorizado del espectro radioeléctrico. Primeramente, se encontraron una explotación en el rango de frecuencias de 773 MHz -778 MHz, seguido de esto Avantel realizaba operaciones en frecuencias no autorizadas como 723 MHz - 733 MHz y 778 MHz - 788 MHz, las anteriores frecuencias estaban asignadas a Telecom Colombia S.A.S.

Nos comparte la página de las [11] que debido al anterior suceso la ministra de las tecnologías de la información y las telecomunicaciones, aseguro que el espectro es un recurso de todos los colombianos y por tal motivo debe ser utilizado en los términos de los permisos otorgados por el MinTIC y con respeto al ordenamiento jurídico. De acuerdo con el plan MinTIC, una de las primeras acciones previstas para el año 2020 fue comenzar con las pruebas en diversas regiones del país. Para ello la entidad abrió la convocatoria para desarrollar los pilotos de esta tecnología 5G, este plan se haría mediante la asignación del espectro de pruebas en bandas de frecuencia superiores a los 3.3 GHz.

Por otro lado, un gran reto al que se enfrentó España fue las reducciones de costos primordialmente en el tema de las antenas, no se refieren a la disminución de antenas sino al compartimiento y arriendo de las mismas para diferentes operadores. La revista [12] comenta que los operadores y las áreas encargadas de telecomunicaciones se reunieron y llegaron a la conclusión que no iban a pasar por lo mismo que habían pasado con el 4G, es decir que no iban a gastar tanto dinero en el desarrollo de la red 5G viendo que podían ahorrar recursos innecesarios y espacio público.

La reducción de estos costos se basa en una alianza entre operadores, esto no solo lo pensó España, sino también Reino Unido en la cual operadores como Telefónica y Vodafone comparten torres móviles para la transmisión y recepción de la red, además de operadores se han unido equipos de radio e instalaciones. En este país se tenía un presupuesto estimado de 500.000 millones, pero gracias al ahorro que se hizo se gastaron solo 300.000 millones y además del presupuesto se redujo espacio público. No obstante, se hablaba de una controversia ya que los operadores tenían que pagar el alquiler del espacio usado, pero se llegó a la conclusión que se gastaba más poniendo toda la infraestructura nueva que pagando un arrendamiento a largo plazo y también se gastaban más tiempo implementando todo desde cero, mientras que con el arrendamiento reducían tiempo y costos.

3.1.4 Reto de telemedicina

Por otra parte, Movistar empresas junto con el hospital Militar central presentaron un segundo plan piloto con la tecnología 5G, por lo cual se beneficiarán los usuarios del subsistema de salud de las fuerzas militares. Esta información la comparte el sitio web [13] en el cual dice que, gracias al aval del MinTIC, Movistar empresas junto con el hospital Militar de Bogotá está presentando su segundo plan piloto 5G, este plan se basa en atender pacientes por medio de un medical Trolley (carro de telemedicina) en especial para UCI-Covid 19.

El medical Trolley va a estar conectado por medio de la red 5G de Movistar, permitirá la comunicación en tiempo real entre los médicos profesionales y los pacientes a través de cámaras de videoconferencia de alta definición, las cuales van a ser instaladas en las UCI. De esta manera, especialistas, residentes, internos y

estudiantes podrán hacer interconsultas y observar procedimientos sin presentar intermitencia ni demoras en la transmisión, gracias a la latencia de menos de 10 milisegundos que ofrece 5G y a la velocidad de 1.62 Gbps en enlace descendente y de 176 Mbps en enlace ascendente.

Con este plan piloto del 5G, el hospital militar central también realizara el primer teletriage por video para pacientes que se encuentren en los dispensarios de sanidad de las fuerzas militares, ubicados en el norte (Santa Ana), en el sur (Usme) y suroccidente (Kennedy) de Bogotá, de esta manera se agilizaran los procesos médicos internos para diagnosticar de inmediato y así optimizar los recursos en ambulancia al clasificarse el nivel de urgencia previa a través del telediagnóstico.

Por otro lado [4] en la ciudad de Barcelona en España propuso hacer la primera operación quirúrgica tele asistida mediante 5G. Este proyecto se llevaría a cabo por el cirujano Antoni De Lacy, el cual fue bautizado como cirujano remoto, el proyecto piloto se tenía presupuestado desarrollar en el hospital Clinic, esta institución fue escogida por contar con un bloque quirúrgico de alta tecnología y con un quirófano hospitalario clasificado como el más avanzado del mundo. De esta manera Vodafone se convirtió en el proveedor tecnológico de la red 5G necesaria para conectar a cirujanos alrededor del mundo a través del proyecto Telesurgeon.

Este proyecto se creó con base a la compañía Advances In Surgery AIS, la cual tiene una plataforma online líder mundial en educación médica e innovación y pionera en tele formación de cirujanos.

Otra variable de la telemedicina es el ahorro económico que se puede suponer en un futuro, según previsiones de expertos apuntan que en los próximos años se presentaran alrededor de 158.4 millones de consultas virtuales, de la cifra anterior se calcula que al menos 50 millones de estos usuarios se beneficiaran de usar la telemedicina. De este modo el usuario que elija viajar podrá contar con ser atendido de manera tradicional o manera remota. El dispositivo de tele cirugía cuenta con unos auriculares con micrófono para permitir la comunicación remota con el cirujano que se localiza en el exterior y se enlaza con una pantalla situada a 90° respecto a la posición del cirujano para evitar así posibles confusiones con la señal de la cámara laparoscópica.

Esta señal se transmite por conexión 5G en tiempo real, el cirujano externo podrá acceder a ella a través de cualquier dispositivo con conexión, es decir el celular, la Tablet o un ordenador. De este modo se eliminan las limitaciones espaciotemporales con el beneficio de poder atender en cualquier procedimiento desde los lugares más remotos del mundo. El cirujano remoto podrá dar recomendaciones o sugerencias realizando indicaciones directas sobre la imagen real de lo que sucede en el quirófano localizado a miles de kilómetros, esto lo hará a través de una pantalla táctil o dibujando con el ratón.

Por otra parte, el operador Vodafone gracias al proyecto que tuvo con la telemedicina, se le ocurrió el plan piloto de la ambulancia conectada al 5G, este proyecto se podría llevar a cabo en su entorno real, el cual tiene como objetivo agilizar el diagnóstico del paciente, este sería un tratamiento más rápido que en algunas situaciones podría salvar vidas. Este plan piloto funcionaria como si el paciente llegara al hospital mucho antes de entrar a la puerta de urgencias. Un breve ejemplo que puso el operador es que, si un hombre que ha sufrido un accidente de tráfico, el cual estaría siendo atendido por los efectivos de emergencias en su vehículo con un sistema de cámaras y sensores conectados mediante 5G en tiempo real, sería igual a que un doctor lo estuviese atendiendo en ese mismo momento.

3.1.5 Reto de IoT

Según [14] actualmente el reto de IoT es marcar un estándar de comunicación entre el HW y las plataformas que generalmente se encuentran en la nube de forma que todos los dispositivos se puedan comunicar con todas las plataformas de IoT.

Dentro del mismo reto encontramos otra complicación la cual es la integración de todos los sistemas y elementos de los que disponemos. A nivel de hardware el reto es el uso eficiente de energía para tener dispositivos remotos que puedan funcionar con baterías por años con la misma eficiencia todo el tiempo.

Por otro lado, España ha sido el país más atacado durante los últimos 18 meses nos muestra [15]. Así, durante el primer semestre de 2018, soporto el 80% de todo el tráfico de ataques a través de dispositivos IoT. Rusia, Hungría, Estados Unidos y Singapur también sufrieron una importante presión en este tipo de actividad. La mayoría de los ataques identificados entre el 1 de enero y el 30 de junio de 2018 se originaron en Brasil (18%), China (15%), Japón (9%), Polonia (7%), Estados Unidos (7%) e Irán (6%).

Un nuevo informe de F5 Labs, la división de inteligencia en ciberseguridad de F5 Networks, revela que los dispositivos IoT ya son el principal objetivo para los ciberdelincuentes, superando a los servidores de correo electrónico y a los servicios web y de aplicación. Según el analista Gartner, este tipo de dispositivos ha crecido un 143% durante los últimos tres años y para el pasado 2020 se esperaba que llegaran a 20.400 millones en todo el mundo. Una de las frases más relevantes de la página fue *Los dispositivos IoT se están multiplicando a gran velocidad, pero las medidas de seguridad que incorporan siguen siendo bastante laxas. Esto es un problema, ya que a través de ellos es posible atacar infraestructuras críticas, lo que significa que se puede llegar a poner en riesgo la vida de las personas*, dice David Warburton, Senior Threat Research Evangelist EMEA en F5 Networks.

Para concluir con este objetivo se mostrará a continuación una tabla, la cual contiene cinco retos que son de los que se hablarán en todo el proyecto, son más retos que han tenido en la implementación del 5G, pero estos que se están tratando son de los más relevantes e importantes para la implementación y utilización de la red, ya que sin la asignación del espectro y de frecuencias, no se podría propagar la red 5G por cualquier ancho de banda, sin la implementación de antenas o infraestructura, no se podría dar un buen desarrollo de la red en cuanto a velocidad ni cobertura, sin los dispositivos celulares adecuados no se podría navegar en 5G, ya que no poseen las características necesarias los celulares que hay actualmente para 4G, como sub retos para la red 5G tenemos uno de los más importantes y es la Telemedicina, ya que con este programa se pueden salvar miles de vidas sin que el cirujano o especialista este en cierto lugar físicamente pero si en tiempo real y por ultimo con la ayuda del IoT podría haber una mejor comunicación entre dispositivos y esto sería un poco más fácil para las personas en cuanto a comunicación.

3.2 Cómo afrontaron los retos que tuvieron otros países para la implementación de la tecnología 5G con base a la regulación y gestión del espectro

3.2.1 Solución de asignación del espectro

En cuanto a gastos de gestión del espectro se encontró que en China los operadores Telefónica, Orange, Vodafone y MasMovil a partir de julio del año 2018 empezaron a pujar para que les dieran su banda de frecuencia para poder empezar a implementar el 5G, la subasta de la banda de frecuencias fue de 3.6 – 3.8 GHz, en esta asignación tuvieron un gran reto el cual pudieron resolver de manera tal que se pudiera usar la banda que estaba ocupando la telefonía fija inalámbrica anteriormente y así reemplazarla para que pudieran usar la red 5G en ella, adicionalmente por los 200 MHz que se licitaron se pagaron alrededor de 100 millones de euros.

Estos operadores consideraron razonable las condiciones de la subasta ya que la licitación dura alrededor de 20 años, tiempo en el cual se pueden recuperar y sacar fruto a los 100 millones de dólares invertidos en esta banda de frecuencia. Los 200 MHz que salieron a subasta se dividen en los operadores en un total de 40 bloques de 5 MHz cada uno, todos en el ámbito nacional y con un precio de salida fijado en 2.5 millones de dólares para cada uno de ellos.

Las redes de 5G vienen funcionando en España desde mediados de junio de 2019, lo que confiere a Vodafone la mayor experiencia en la tecnología llamada a modernizar la conectividad en movilidad de todo el mundo. En su caso, realizó un despliegue inicial en seis ciudades españolas: Madrid, Barcelona, Bilbao, Sevilla, Málaga y Valencia, implementando en ellas una mayor cantidad de antenas en terrenos adquiridos para un mejor despliegue de la red 5G. Mientras el resto de los operadores renunciaban a competir en 5G por motivos comerciales y económicos, la filial española del grupo británico fue extendiendo su cobertura de 5G en otras grandes capitales del país. Así lo hizo en Vigo y Coruña, ya un tiempo después dio el salto a San Sebastián, Zaragoza, Vitoria, Logroño, Santander, Pamplona y Gijón. Posteriormente se añadieron

Badajoz, Murcia, Alicante, Palma de Mallorca, Benidorm y Valladolid. En esas 21 ciudades, la red de 5G de Vodafone ya alcanza a la mitad de la población de dichas zonas gracias a sus 600 estaciones base.

Casi año y medio después del movimiento de la entrada en acción del primer 5G español, Movistar anunció al poco tiempo el encendido de sus redes de quinta generación de telefonía en siete ciudades. En su caso se activaron 200 nodos repartidos entre Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Málaga, Zaragoza y Murcia.

Luego de darse cuenta el país que los operadores funcionaron bien con esta banda de frecuencia decidió abrir otro espacio de 200 MHz para las empresas de telecomunicaciones, pues si bien con 40 MHz ofrecían un buen servicio, con el doble iban a poder ser más que excelentes, debido a esto el país decidió abrir la banda de 3.4 – 3.6 GHz. Esta decisión se tomó pensando en que si un operador quería ser el número uno en el mercado ofreciendo el mejor servicio lo podría hacer utilizando un total de 80 MHz o hasta 100 MHz siendo el límite pactado por operador según indicio el gobierno y así este obligaría a los demás operadores a tener que alquilar también más ancho de banda para ofrecer un servicio de la mejor calidad.

El operador [16] también asegura que atesora más espectro continuo que el resto para ofrecer los nuevos servicios 5G, por lo que puede brindar una mayor velocidad en el tránsito de los datos que sus rivales. La gran iniciativa que tuvo Vodafone ha marcado el camino al resto de operadores. Así, en todos los casos, todas las estrategias están cortadas por el mismo patrón, ya sea por razones técnicas o comerciales las cuales se explicarán más adelante en el documento. Por ejemplo, las frecuencias utilizadas por los operadores son las de 3,5 GHz y están basadas en el estándar Non Standalone (NSA), una tecnología permite gran capacidad, baja latencia y velocidad de descarga de 1 Gbps.

Por parte de [6] se obtuvo la información de que la empresa Movistar en la asignación del espectro compro los derechos de transmisión en el canal de frecuencia de 90 MHz de 3,5 GHz, pensando en que sería lo suficiente para exhibir las fortalezas de la tecnología en cuanto a velocidad, capacidad y latencia, entre otras ventajas. En el anuncio que se hizo, la compañía que maneja Emilio G adelantó el compromiso y alcanzó el 75% del territorio nacional a finales de dicho año, para lo que le bastó con actualizar aproximadamente 500 estaciones base de 3G y 4G para acomodarse a la nueva tecnología.

Por otro lado, Orange dio un gran paso y se unió con 100 MHz de la banda de 3,5 GHz, con un despliegue escalonado de 300 estaciones base que comenzaron en las zonas centrales de Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla y Málaga, para alcanzar el 30% de la cobertura en dichas ciudades a través de los barrios más significados.

Gracias a la iniciativa de los operadores que hay en España pudieron agilizar la implementación del 5G, el artículo relatado por parte del observatorio nacional del 5G, [17] informo cual fue todo el procedimiento por parte del país para poder obtener las frecuencias donde se utiliza la nueva red, en este caso como primera instancia para la fecha del 22 de febrero se inició la subasta de 20 megahercios de la banda media de 3.5 GHz. Después de la licitación a la que asistieron los operadores Telefónica y Orange, se procedió a la reorganización de la banda para que todos los operadores pudieran disponer de bloques continuos y así se pudiera hacer un despliegue de la red 5G con una alta velocidad de forma más eficiente que la que había anteriormente.

Para el mes de marzo se subastaron también las frecuencias de 700 MHz, esta subasta con el fin de cubrir otra zona del territorio nacional con redes 5G, pero con menor velocidad. Actualmente Orange tiene asignado 100 MHz, Telefónica y Vodafone tienen asignado 90 MHz cada uno de ellos y MasMovil tiene asignado 80 MHz, todos en la banda de 3.5 GHz, es decir de 3.400 a 3.800 MHz, España decidió coger esta frecuencia porque fue la que se consideró escoger en toda Europa y Asia para la utilización de la red 5G. Esta red fue escogida porque ofrece mejores prestaciones combinadas de velocidad de transmisión y cobertura de señal, luego de la asignación procedieron a subastar otros 20 MHz, en dos bloques de 10 MHz. Al momento de hacer la subasta se unieron Telefónica y Orange, esta subasta tenía un precio de salida por cada 10 MHz tenía un precio de 21 millones de euros, los cuales tienen vigencia hasta diciembre de 2038. Cuando se complete ese tiempo se procederá a reorganizar toda la banda media de frecuencias para que los operadores tengan bloques continuos. Hasta el momento solo Vodafone es el único operador que tiene

bloques continuos, lo cual hizo que se convirtiera en el primer operador en lanzar los servicios de 5G en España.

Por otro lado, la subasta se basó en la división de 5 bloques, los cuales sumaron 30 MHz pareados, se dividieron del bloque A al E con un total de 60 MHz en total y 3 bloques de 5 MHz en un solo sentido descendente, los bloques fueron F, G y H, este se fijó con una concesión de 20 años sin prorrogas ni concesión automática. El bloque más relevante en toda la subasta fue el bloque A, el cual tuvo un precio de salida de 340 millones de euros. En la Tabla 1 se muestra cómo está dividida la subasta.

Tabla 1. Subasta de frecuencia en España [4]

Bloque	Rango de frecuencias	Cobertura geográfica	Ancho de banda por concesión	Precio de salida
A	Bloque abstracto	Estatal	2x10MHz	340 M€
B	Bloque abstracto	Estatal	2x5MHz	200 M€
C	Bloque abstracto	Estatal	2x5MHz	200 M€
D	Bloque abstracto	Estatal	2x5MHz	200 M€
E	Bloque abstracto	Estatal	2x5MHz	200 M€
F	Bloque abstracto	Estatal	5MHz (solo descendente)	10 M€
G	Bloque abstracto	Estatal	5MHz (solo descendente)	10 M€
H	Bloque abstracto	Estatal	5MHz (solo descendente)	10 M€

Para culminar con la asignación de frecuencias en este país tenemos que el precio total de salida de los ocho bloques tuvo un valor de 1.170 millones de euros, lo cual fue un precio que los operadores de este país consideraron muy elevado.

3.2.2 Solución IoT

En cuanto al plan piloto con la ambulancia conectada a 5G, se pudo desarrollar usando cuatro cámaras HD, una de ellas era capaz de acercarse al paciente y hacer zoom, la segunda ofrece un plano general y lleva incorporado un altavoz y un micrófono, las otras dos son exteriores y sirven para grabar imágenes en situaciones de alerta pública, como un atentado terrorista o un grave accidente de tránsito. A continuación, se van a dar ejemplos del internet de las cosas aplicado a la vida real y con funcionamiento ya en el mercado, lo cual se encontró en [18].

Tenemos el ejemplo de aplicación para IoT el cual se basa en las zapatillas inteligentes, las cuales sirven para medir la distancia y el tiempo recorrido, así como las calorías consumidas, estas zapatillas se sincronizan con la app del celular por medio de bluetooth, en esta app se puede almacenar toda la información y el historial que se tiene al momento de utilizar las zapatillas.

Tenemos el ejemplo de los sensores para el jardín por parte de la compañía Parrot, estos sensores registran datos sobre la luz solar, la temperatura, el nivel del fertilizante en el suelo y la humedad. Gracias a estos sensores se puede analizar lo que necesitan las plantas o si lo que se está utilizando es la medida exacta para su proceso, estos datos llegan por medio de bluetooth al dispositivo que estén conectados los sensores. Otro ejemplo que podemos evidenciar de reguladores de luz el cual se llama smartup, desarrollo un regulador de luz inteligente y dos formas de volver los enchufes smart, a través de una aplicación en el celular se puede controlar la electricidad, poner o quitar la luz y regular la intensidad de la misma.

Por último, tenemos el ejemplo del fitbark, este se trata de un collar para mascotas que va conectado directamente con el celular del dueño y sirve para monitorear su actividad, sueño y da detalles del comportamiento que está teniendo, también detecta signos de enfermedad y problemas médicos.

3.2.3 Solución antenas e infraestructura

Por parte de Estados Unidos para la solución del gran reto que tenían con la infraestructura, los operadores T-Mobile y Sprint se pusieron en la tarea de ayudar a implementar sus propias antenas de tamaño de una caja de zapatos, esta implementación se hizo en las zonas donde más productividad hay y donde más recursos tienen para poder desarrollarla, con esto se esperaba que los operadores recogieran ganancias

para seguir en la implementación de más antenas hasta completar la infraestructura requerida para que la red se pueda propagar por todo el país. En esta solución que dieron los operadores ayudo a que gran parte de la gente se cambiara a estos operadores ya que ofrecían mejores beneficios y mayor rapidez en esta nueva red. El reto no fue tanto de dinero ni espacio para implementarlas, sino la aprobación que tardo más de un año para determinar si se podía dar el paso de la instalación de estas antenas, demora que se produjo por estudios, papeleo y autorizaciones para poder seguir con el proceso.

Por el lado de España los operadores se unieron y llegaron a la conclusión que, para no gastar más espacio y dinero en la implementación de nueva infraestructura, iban a pagar cierta cantidad de dinero para poder utilizar las antenas que había puesto el país. De este modo pudieron propagar la red y así cada operador podía prestar sus servicios sin ninguna complicación ni contratiempo ya que todos podían estar al mismo nivel. Se dieron cuenta con el pasar del tiempo que pagando el arriendo de estas antenas era más beneficiario que tener sus propias antenas, ya que iba a ser más largo el tiempo en adecuar una infraestructura totalmente nueva por todo el país, también pensaron que el mantenimiento de las infraestructuras iba a ser más complejo y de más costos, por lo cual esto conlleva a los operadores a pagar un arrendamiento sin tantas preocupaciones. En la Figura 1 se puede observar cómo están distribuidas las antenas de 5G en España.



Figura 1. Distribución de antenas [17]

Gracias a la iniciativa de los operadores que hay en España pudieron agilizar la implementación del 5G, el artículo relatado por parte del observatorio nacional del 5G, [17] informó cuál fue todo el procedimiento por parte del país para poder obtener las frecuencias donde se utiliza la nueva red, en este caso como primera instancia para la fecha del 22 de febrero se inició la subasta de 20 megahercios de la banda media de 3.5 GHz. Después de la licitación a la que asistieron los operadores Telefónica y Orange, se procedió a la reorganización de la banda para que todos los operadores pudieran disponer de bloques continuos y así se pudiera hacer un despliegue de la red 5G con una alta velocidad de forma más eficiente que la que había anteriormente. Para el mes de marzo se subastaron también las frecuencias de 700 MHz, esta subasta con el fin de cubrir otra zona del territorio nacional con redes 5G, pero con menor velocidad.

Actualmente, Orange tiene asignado 100 MHz, Telefónica y Vodafone tienen asignado 90 MHz cada uno de ellos y MasMovil tiene asignado 80 MHz, todos en la banda de 3.5 GHz, es decir de 3.400 a 3.800 MHz, España decidió coger esta frecuencia porque fue la que se consideró escoger en toda Europa y Asia para la utilización de la red 5G. Esta red fue escogida porque ofrece mejores prestaciones combinadas de velocidad de transmisión y cobertura de señal, luego de la asignación procedieron a subastar otros 20 MHz, en dos bloques de 10 MHz. Al momento de hacer la subasta se unieron Telefónica y Orange, esta subasta tenía un precio de salida por cada 10 MHz tenía un precio de 21 millones de euros, los cuales tienen vigencia hasta diciembre de 2038. Cuando se complete ese tiempo se procederá a reorganizar toda la banda media de frecuencias para que los operadores tengan bloques continuos. Hasta el momento solo Vodafone es el único operador que tiene bloques continuos, lo cual hizo que se convirtiera en el primer operador en lanzar los servicios de 5G en España.

3.2.4 Solución reto de telemedicina

Por otro lado, la primera operación de 5G en el mundo fue todo un éxito, por parte de [19] la expectación era enorme en Barcelona, todos estaban muy nerviosos ante el acontecimiento histórico al cual asistió el mobile world congress y fue testigo de este gran éxito, gracias a la primera operación quirúrgica del mundo tele asistida y a la conectividad con 5G. Se trató de una sigmoidectomía, es decir una extirpación quirúrgica de una parte enferma del colon, la cual duro 75 minutos y lo mejor de todo es que fue todo un éxito.

Gracias a la tecnología 5G desplegada por Vodafone, el doctor experimento un salto cualitativo y se podían seguir todas sus indicaciones al pie de la letra sin cometer ningún error y siendo dirigida la operación por doctores experimentados en tiempo real. Para realizar dicha operación Vodafone situó una antena de 5G en el hospital Clinic y otra en el pabellón cuatro de Fira Gran Via para enlazar una óptima comunicación y así llevar a cabo el mejor resultado para una de muchas operaciones de telemedicina a través del 5G. En la Figura 2 se puede observar el primer quirófano con tecnología 5G para ejercer la telemedicina.



Figura 2. Quirófano con tecnología 5G [19]

En la anterior imagen que nos brinda [4] se puede observar el quirófano Optimus, este es único en el mundo y está ubicado en el país de España, esta combina tecnologías como el big data o la iluminación inteligente y es pionero en el mundo. Este quirófano está conectado mediante tecnología 5G y con el despliegue tecnológico asegura una reducción sustancial de las infecciones, también una mayor eficiencia asistencial y la disminución de costos quirúrgicos, así como un mayor rendimiento en el tratamiento. En este quirófano se realizó la primer operación tele asistida en España Barcelona conectado por medio de red 5G que proporciono Vodafone, la cual comando el doctor Antonio de Lacy jefe del servicio de cirugía gastro intestinal.

Este procedimiento se hizo bajo la supervisión de médicos especializados de otros países y también del país residente, el instrumento que se utilizaba para dar las indicaciones era una Tablet con lápiz óptico, en el quirófano recibían las ordenes un equipo de cirujanas que se encontraban en el hospital. El paciente al que se le practicó la operación padecía de una neoplastia en la sigma, es decir en el último trapo del colon o intestino grueso, mientras que se realizaba la cirugía en el quirófano iban ejecutando el paso a paso que el doctor Lacy iba dibujando en su Tablet sobre las imágenes en movimiento que registraban las cámaras en el techo del quirófano.

Estas cámaras evidencian en las pantallas todos los planos audiovisuales para que el o los médicos encargados puedan verificar con gran resolución en sus pantallas donde deben intervenir como si estuvieran físicamente presentes. Esta cirugía se hizo con un ancho de banda de 46 Gb por segundo lo cual hizo que las ubicaciones o distancias a las que estaban no impidieran que se pudiera ver la operación en tiempo real en todo su procedimiento sin falencias.

3.2.5 Solución al reto de dispositivos móviles

Gracias a [20] con la llegada del 5G se tenía previsto que los operadores lanzaran nuevas ofertas o precios especiales para poder adquirir celulares especializados para poder utilizar la nueva red 5G, por lo tanto dispositivos como AT&T decidieron prolongar más tiempo en sus cuotas para las personas que sacan

dispositivos con los planes de datos, anteriormente el máximo plazo de cuotas para pagar un celular en este operados era de 1 año es decir 12 meses, pero ahora decidieron dejar cuotas máximas de 30 – 36 cuotas, esto con el fin de poder ayudar a los usuarios ya que son solo dispositivos de gama alta. Por otro lado, el operador T-Mobile también ofreció a sus usuarios un máximo de cuotas de 30 para adquirir sus celulares especializados para navegar en la red 5G. Estos operadores decidieron dar estas posibles soluciones ya que en la red 5G solo se puede navegar con dispositivos de gama alta tales como Samsung Galaxy S9 y el Note 9, LG G7 ThinQ y el V40 ThinQ, en iPhone está el XS, XS Max y XR.

En China operadores y empresas como Huawei decidieron ayudar a la población con facilidades de pago de cuotas extendidas pagando con la factura de datos, también lanzaron la propuesta de algunos descuentos para dispositivos gama alta de pago inmediato, aparte también lanzaron una de las mejores propuestas para la población la cual fue, que las personas que desearan cambiar su dispositivo actual por uno más actualizado que pudiera navegar en la nueva red, lo podría hacer dando su dispositivo actual como medio de pago y aparte tenía que dar el excedente del otro dispositivo que quisiera adquirir. Fue la opción más escogida y con más éxito en esta población ya que la mayoría de ellos tenían esos celulares que iban a quedar obsoletos por así decirlo, la única condición que tenían la empresa era que el pago excedente debía ser de contado y solo por un pequeño tiempo prolongado.

3.3 Como debería afrontar Colombia estos retos en base a lo que se ha hecho en otros países.

3.3.1 Solución propuesta para el reto de asignación del espectro

Inicialmente se tenía previsto sugerir las frecuencias en las que se están utilizando actualmente las redes 2G y 3G, pero al hacer una pequeña investigación se pudo demostrar que estas no cumplían con el suficiente ancho de banda que se necesitaba para la red 5G, se pensaba usar estas frecuencias por dos cosas importantes, la primera para promover la actualización de tecnología en Colombia, es decir poder actualizar dispositivos móviles o con conexión a internet y la segunda para reutilizar estos anchos de banda y no tener que disponer de otras nuevas frecuencias. Por lo tanto, teniendo en cuenta que anteriormente para la red de 4G, los operadores tenían asignadas en la banda de 700 MHz un total de 80 MHz, es decir que estaban sobrando 10 MHz, en la banda de 2.500 MHz se estaban utilizando 60 MHz en su totalidad. Como resumen para esta subasta, gracias a la información de [21] se puede observar la subasta en la Tabla 2.

Tabla 2. Ofertas por parte de los operadores para 4G

Operadores	Banda de 700 MHz (Ancho de banda asignado)	Banda de 250 MHz (Ancho de banda asignado)
Claro	20 MHz	30 MHz
Tigo	40 MHz	
Telecom	20 MHz	30 MHz

De esta manera se dividieron los anchos de banda por cada operador, según el número de clientes y demanda que tenían para ofrecer sus servicios, en esta subasta participaron operadores como: Claro, Movistar, Tigo y Telecom. En esta participación optaron por subastar cinco bloques de la banda de 700 MHz, un bloque de la banda de 1900 MHz y por último seis bloques de la banda de 2500 MHz. Decidieron tomar estas bandas así para compensar las zonas rurales y las urbanas, ya que en la banda baja de los 700 MHz sirven para conectar las zonas rurales y las bandas altas de 1900 MHz y 2500 MHz sirven para conectar las zonas urbanas, ya que esto ayuda a tener mejores servicios en lugares con mucha densidad de personas.

El total del recaudo de la subasta fue de 5 billones de pesos, es decir que por cada 10 MHz los operadores tendrían que pagar un total de 385 millones de pesos. De este modo la mitad de la ganancia la cual es de 2.5 billones de pesos se utilizaron para la implementación de más cobertura e infraestructura en las zonas rurales y la otra mitad para las zonas urbanas. Por tal motivo se podría evaluar o analizar las frecuencias recomendadas a nivel mundial por la UIT, la cual está en el rango de 3.5 GHz y se sugiere elegir esta ya que en el momento está libre en el país y posee el suficiente ancho de banda para poder implementar la red 5G, de este modo los operadores podrían invertir en la frecuencia para ofrecer un servicio más completo en las zonas rurales y urbanas. Con esto se lograría iniciar todo el proceso de una manera más organizada y con

más conocimiento teniendo en cuenta las falencias que han tenido los otros países. Un punto a favor que tiene el país es que actualmente en estos rangos de frecuencias no hay nada por el momento, solo se está prestando para que operadores como claro y movistar realicen pruebas piloto para la implementación de la red 5G. En la Figura 3 se puede observar las celdas y el medio de propagación para el espectro 5G.

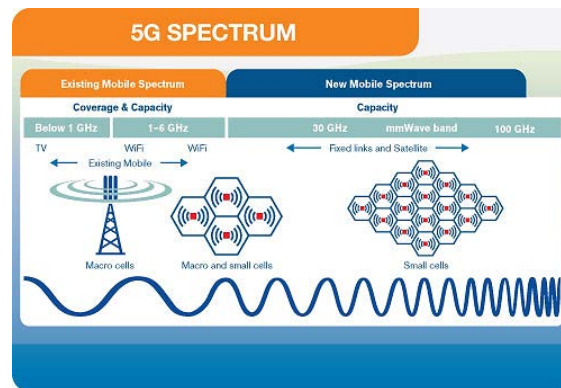


Figura 3. Espectro 5G [22]

3.3.2 Solución propuesta para el reto de infraestructura y antenas

Para este reto con base a los estudios y análisis que se hicieron respecto al reto que tuvieron otros países, se llegó a la conclusión que la mejor solución que puede tener Colombia es la de montar su propia infraestructura por parte del estado y arrendarle a los operadores para que ellos puedan prestar el servicio de la nueva tecnología 5G, esto se puede lograr gracias a la subasta que se hace cada red móvil, en este caso el país tiene derecho a la utilización para zonas urbanas de la mitad de la totalidad que se recoja con la subasta del 5G para ampliación de antenas y mantenimiento de infraestructuras, así como para las zonas rurales también se tiene previsto utilizar la otra mitad del total de la subasta para extensión de cobertura y ampliación de antenas, todo esto será posible gracias a la subasta que se haga con la red 5G.

Un breve ejemplo es el de los postes que tiene Codensa y el arrendamiento que le facilita a los operadores para que puedan colgar la fibra y el coaxial que utilizan para las redes. Este ejemplo que se está dando ya se está desarrollando en otros países y con el pasar del tiempo han observado que es mejor para los operadores pagar un arriendo porque sale más económico que montar toda la infraestructura y segundo porque se puede ahorrar espacio público en todos los terrenos.

3.3.3 Solución propuesta para el reto de los celulares o dispositivos móviles

Como posible solución para este reto los operadores son los que más deben tener la iniciativa, primero porque puede ser un punto a favor para incrementar ventas y segundo para posicionarse mejor en el mercado, algunas soluciones podrían ser ofertas y descuentos en dispositivos celulares que se puedan conectar a la nueva red, recibir los celulares que están utilizando como parte de pago para adquirir un nuevo celular y tercero dar mejores facilidades de pago para adquirirlos por medio del plan pospago sin tanto incremento en las facturas o interés.

Anteriormente, cuando llegó el 4G a Colombia los operadores que había en el momento lanzaron cierto tipo de ofertas y promociones con grandes descuentos para que las personas pudieran adquirir dispositivos compatibles con la nueva red en el mercado. Por un lado, lo que más impulso a la gente fue la adquisición de nuevos dispositivos celulares junto con los planes pospago y así a medida que iba pagando el plan, podían ir cancelando el celular a cuotas. De este modo se corrió una voz a voz porque la gente podía sacar varios planes y celulares al tiempo según la capacidad de pago que tenían con el comportamiento de pago en el operador, por estos motivos también los operadores crecieron y los precios disminuyeron, ya que los operadores al traer más cantidad de celulares, estaban disminuyendo el precio de transporte.

Por otro lado las empresas con más demanda de ventas en teléfonos, ya tenían previsto desde que se empezó a implementar la red 5G, utilizar procesadores compatibles para las redes 4G y 5G, esta medida se

empezó a implementar aproximadamente desde el 2018 gracias a operadores como Samsung, el cual empezó a sacar celulares con procesadores Exynos 990, el cual permite acceder a cualquiera de las dos redes automáticamente, en cuanto a los modem de las casas y empresas también se ha venido incorporando procesadores Exynos 5123, el cual permite también de forma automática conectarse a la red 4G o 5G. En la Figura 4 se puede observar la integración de las redes 4G y 5G con inteligencia autónoma.

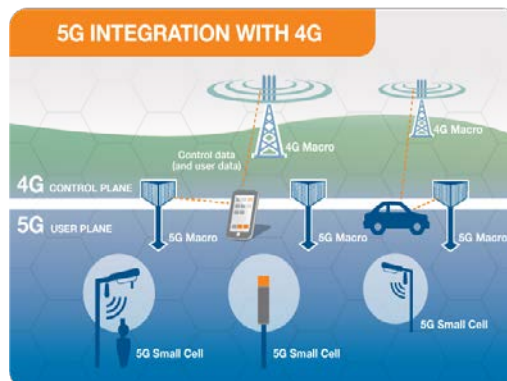


Figura 4. Conectividad con celulares [22]

3.3.4 Solución propuesta para el reto de la telemedicina

Teniendo en cuenta que este reto es basado en la red 5G, para no ser uno de los últimos países en implantar y utilizar la telemedicina, se puede sugerir que el país vaya implementando los quirófanos necesarios en las principales ciudades inicialmente para atender casos de suma importancia teniendo en cuenta que no en todas las partes a nivel nacional se puede brindar la mejor atención medica en cuanto a profesionales de la salud y con una atención más especializada, al momento de implementar estos quirófanos inteligentes conectados con la red 5G se pueden prevenir más muertes y menos gastos para temas de la salud y de la población, así como lo realizó España en la banda de espectro de 3.7 GHz, ya que al requerir una operación con alguna especialidad, la podrían atender conectados en tiempo real sin problema.

3.3.5 Solución propuesta para el reto de IoT

Para este reto se pueden tomar en cuenta los ejemplos que ya se han desarrollado en los otros países como por ejemplo implementar las casas inteligentes manejadas por celulares o tabletas, teniendo en cuenta la implementación de la red 5G para tener un mejor avance, también vehículos inteligentes con sensores para que se manejen solos y a su vez disminuir los accidentes y trancones en las ciudades, hay que tener en cuenta que para poder hacer este proyecto realidad, se deben mejorar las vías e implementar más tecnología en las calles para tener todo el recorrido de los vehículos de una forma segura y más organizada. Las ambulancias conectadas con cámaras como especie de quirófano para que un especialista pueda ir ayudando al paciente en el transcurso hasta el hospital. En la Figura 5 se puede observar la forma en la que se van a comportar las antenas con la red 5G.

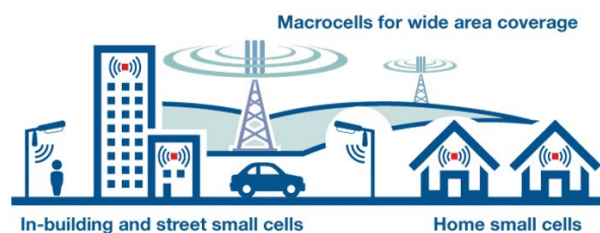


Figura 5. Múltiples conexiones [22]

4. CONCLUSIONES

El reto más grande que se evidencio es lo relacionado con la asignación del espectro, ya que todos los países no podrían usar la frecuencia sugerida por la UIT, por lo tanto, en el caso que los países que no puedan utilizar esta frecuencia deberán buscar una que cumpla las especificaciones necesarias para poder

implementar la nueva tecnología 5G. Por parte de GSMA y de la [23] se están desarrollando normas internacionales para lograr que las redes 5G funcionen de la manera más adecuada, es decir que una vez los dispositivos estén en estas frecuencias la velocidad de navegación y todos los parámetros que espera lograr la red 5G son de 10 Gbps, tasas mínimas de 100 Mbps garantizadas en todo lugar, latencia ultra baja menos a 5ms, baterías con duración mayor a 5 años, un millón de usuarios por km², conectividad con todo, se espera que cumplan y que los dispositivos celulares estén en los siguientes rangos de frecuencia: por debajo de 1 GHz, entre 1-6 GHz y por encima de 6 GHz, esto sería algo clave para brindar una cobertura más amplia y con mejor desarrollo.

Es muy importante analizar que rangos de frecuencia se pueden utilizar para reutilizar alguna frecuencia y desechar algunas que ya no son tan importantes o que prontamente saldrán del mercado, como por ejemplo la red 2G y 3G ya que son redes que muy poco se están utilizando gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y de dispositivos más sofisticados que han salido en el mercado. Por parte de la UIT se lanzaron frecuencias de bandas iniciales para el desarrollo y la propagación de la red 5G, en estas encontramos bandas como: 600-700 MHz, 4GHz, 26-28 GHz y 38-42 GHz, estas fueron adicionales a las frecuencias entre 3.400-3.600 MHz que es la más viable por la mayoría de los países, como por ejemplo la red 2G y 3G ya que son redes que muy poco se están utilizando gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y de dispositivos más sofisticados que han salido en el mercado.

Se sugiere utilizar la frecuencia recomendada por la UIT, para empezar a desarrollar una tecnología más organizada y con mejor visión apoyándose en países donde ya se ha implementado la red 5G, para tener la posibilidad de no cumplir las mismas falencias que han tenido y por el contrario tener una mejor organización en lo general. Se sugiere dejar la red en la frecuencia de los 3.5 GHz ya que la capacidad que tiene para proporcionar cobertura y capacidad la convierten en la mejor opción para ser implementada.

REFERENCIAS

- [1] CRCOM, *Análisis del servicio de acceso a internet en la isla de san Andrés*, Marzo 2021. Recuperado: [https://www.crcom.gov.co/uploads/images/files/2021/Analisis%20del%20servicio%20de%20acceso%20a%20Internet%20en%20la%20isla%20de%20San%20Andres%20\(2\).pdf](https://www.crcom.gov.co/uploads/images/files/2021/Analisis%20del%20servicio%20de%20acceso%20a%20Internet%20en%20la%20isla%20de%20San%20Andres%20(2).pdf)
- [2] ITU, *5G - Quinta generación de tecnologías móviles*, Diciembre 2018. Recuperado: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.
- [3] F. R. Gómez Devia, G. F. Valencia Plata y E. F. Rodríguez Veloza, *Metodologías para la construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia, Desarrollo e innovación en ingeniería*, IAI, 2020, pp. 279-294.
- [4] NationalGeographic, *Practicada la primera operación teleasistida con 5G*, 2020. Recuperado: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/practicada-primera-operacion-teleasistida-5g_13948
- [5] F. Gómez, G. Valencia y E. Rodríguez, *Metodologías para la construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia, Desarrollo e Innovación en ingeniería*, IAI, 2019, pp. 240-250.
- [6] GSMA, *Primer Laboratorio de Internet de las Cosas (IoT LAB) para emprendedores abre sus puertas en Colombia*, Julio 2019. Recuperado: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-Prensa/Noticias/106960:Primer-Laboratorio-de-Internet-de-las-Cosas-IoT-LAB-para-emprendedores-abre-sus-puertas-en-Colombia>
- [7] Portafolio, *Avanzar en 5G, el reto digital durante el 2021*, 2021. Recuperado: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/ane-avanzar-en-5g-el-reto-digital-de-colombiadurante-el-2021-548915>
- [8] Computer, *Queman varias antenas 5G en el Reino Unido porque una conspiración infundada las asocia al coronavirus*, Abril 2020. Recuperado: <https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/queman-varias-antenas-5g-reino-unido-conspiracion-coronavirus-615975>
- [9] CRCOM, *Redes móviles en Colombia* Diciembre 2019. Recuperado: <https://www.crcom.gov.co/uploads/images/files/Documento-Modernizacion-redes-moviles.pdf>.
- [10] ANE, *Informe sobre las respuestas al cuestionario y comentarios recibidos al documento de consulta pública sobre las bandas de frecuencias disponibles para el futuro desarrollo de las telecomunicaciones móviles internacionales (IMT) en Colombia*, 19 agosto 2020. Recuperado: <https://www.ane.gov.co/Documentos%20compartidos/ArchivosDescargables/noticias/DOCUMENTO%20RESPUESTA%20A%20COMENTARIOS%20IMT.pdf>
- [11] MinTIC, *Agencia Nacional del Espectro abre investigación al operador Avantel por presunto uso indebido del espectro*, 2020. Recuperado: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/150032:Agencia-Nacional-del-Espectro-abre-investigacion-al-operador-Avantel-por-presunto-uso-indebido-del-espectro>

- [12] CRCOM, *Redes móviles en Colombia*, Diciembre 2019. Recuperado: <https://www.crcom.gov.co/uploads/images/files/Documento-Modernizacion-redes-moviles.pdf>
- [13] Hospital Militar, *HOMIL y Movistar Empresas presentan segundo piloto 5G*, Febrero 2021. Recuperado: <https://www.hospitalmilitar.gov.co/index.php?idcategoria=69906>
- [14] MinTIC, *Primer Laboratorio de Internet de las Cosas (IoT LAB) para emprendedores abre sus puertas en Colombia*, 30 octubre 2019. Recuperado: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-Prensa/Noticias/106960:Primer-Laboratorio-de-Internet-de-las-Cosas-IoT-LAB-para-emprendedores-abre-sus-puertas-en-Colombia>
- [15] Europapress, *España fue el objetivo del 80% de los ciberataques a dispositivos IoT en la primera mitad de 2018*, Diciembre 2018. Recuperado: <https://www.europapress.es/portaltic/ciberseguridad/noticia-espana-fue-objetivo-80-ciberataques-dispositivos-iot-primera-mitad-2018-20181217175221.html>
- [16] Vodafone, *España dibuja un mapa del 5G exclusivo para urbanitas*, Octubre 2020. Recuperado: <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/10805539/10/20/Espana-dibuja-un-mapa-del-5G-exclusivo-para-urbanitas.html>
- [17] ON5G, *España completa y reordena las frecuencias 5G de alta velocidad*, Febrero 2021. Recuperado: <https://on5g.es/espana-completa-y-reordena-las-frecuencias-5g-de-alta-velocidad/#:~:text=La%20Estrategia%20de%20impulso%20deMHz%20y%2024.250%2D27.500%20MHz>
- [18] IoT, *Internet de las cosas: 10 ejemplos innovadores*, febrero 2021. Recuperado: <https://www.idat.edu.pe/blog/internet-de-las-cosas-10-ejemplos-innovadores>.
- [19] MWC, *La primera operación teleasistida de la historia con 5G*, 2019. Recuperado: <https://www.muyinteresante.es/tecnologia/inteligencia-artificial/articulo/la-primera-operacion-teleasistida-de-la-historia-con-5g-831551351566>
- [20] MobileWorldLive, *Se necesitarán subvenciones para que los dispositivos 5G sean asequibles*, Octubre 2018. Recuperado: <https://www.mobileworldlive.com/spanish/se-necesitaran-subvenciones-para-que-los-dispositivos-5g-sean-asequibles>
- [21] MinTIC, *Estudios de Disponibilidad de espectro para IMT*, 2019. Recuperado: https://www.mintic.gov.co/micrositios/asignacion_espectro-imt/742/w3-channel.html
- [22] MIMO, *Explicando el 5G ¿Qué es el 5G?*, 2021. Recuperado: <http://www.emfexplained.info/spa/?id=25916#:~:text=La%20dimensi%C3%B3n%20f%C3%ADsica%20total%20de,en%20el%20mismo%20espacio%20f%C3%ADsico>
- [23] ITU, *5G — Quinta generación de tecnologías móviles*, Noviembre 2018. Recuperado: <https://www.itu.int/web/pp-18/es/backgrounder/5g-fifth-generation-of-mobile-technologies>

Diseño de un convertidor boost cuadrático controlado mediante el algoritmo de perturbar y observar

Jairo Alberto Cuéllar-Guarnizo¹

Carlos Andrés Torres-Pinzón²

Edwin Francisco Forero-García³

¹ *Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*

^{2,3} *Universidad Santo Tomás*
Colombia

En este trabajo se estudió el comportamiento del convertidor de potencia tipo Boost cuadrático sometido a perturbaciones en la fuente y controlado por un algoritmo de seguimiento al punto de máxima potencia MPPT. El diseño y evaluación del circuito se realizó mediante simulaciones en el software para electrónica de potencia PSIM. El algoritmo de seguimiento permite modificar la señal PWM y controlar la conmutación del transistor de potencia utilizado en el convertidor conmutado de CC/CC. Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento del convertidor y el algoritmo MPPT con un panel solar en un ambiente controlado, y simulando una fuente de radiación solar. El algoritmo de seguimiento programado es el de Perturbar and Observar P&O y fue codificado en un microcontrolador Arduino Nano. Los resultados mostraron que el circuito es viable para aplicaciones más complejas, tanto en electrónica de potencia como en control avanzado, debido a que el convertidor conmutado fue sometido a perturbaciones en la carga y la fuente, y se observó que responde de forma eficiente a las perturbaciones, haciendo posible la estabilización de la señal de salida. También se evidenció, en las simulaciones y en el entorno experimental, que se comportan de manera similar pese a algunas diferencias en las cargas utilizadas. El producto de esta investigación se convierte en un insumo para trabajar con estrategias de control modernas y/o clásicas, además de otros algoritmos MPPT que se pueden adaptar al convertidor Boost cuadrático o a cualquier otro convertidor. De esta forma se busca mejorar el desempeño de los generadores fotovoltaicos y contribuir al desarrollo de energías alternativas y electrónica de potencia, área de la ingeniería que impacta positivamente ayudando a mitigar el daño ambiental causado por los medios de generación de energía eléctrica convencional.

¹ Ingeniero Electrónico y Magíster en Ingeniería, profesor ocasional.

Contacto: jairo.cuellar.1982@gmail.com

² Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería y Doctor en Ingeniería Electrónica. Profesor tiempo completo.

Contacto: carlostorresp@usantotomas.edu.co

³ Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería Eléctrica, profesor tiempo completo.

Contacto: edwinforero@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En su gran mayoría los seres humanos han utilizado para satisfacer sus necesidades básicas y comodidades sistemas energéticos tradicionales que suelen ser costosos, de poca eficiencia e insostenibles desde todo punto de vista ambiental y ecológico. A todo esto se suma que los combustibles fósiles derivados del petróleo continúan afectando negativamente al planeta debido a su quema indiscriminada y a la forma tradicional de generación y distribución de la energía eléctrica que no aporta significativamente a la disminución del impacto negativo [1, 2]. De igual manera, las energías renovables y limpias dejaron de ser una innovación y se han convertido en una necesidad para la humanidad de acuerdo con lo expuesto por algunos autores quienes han sugerido que la búsqueda de alternativas de generación de energía beneficiará a las generaciones futuras pues se espera que se reduzca el impacto negativo y se empiece a cambiar la mentalidad de consumismo y de forma de vida [3, 4]. El desarrollo de este trabajo contribuye enormemente a la búsqueda de soluciones tecnológicas que mejoren la eficiencia de los generadores fotovoltaicos y que permitan aprovechar el máximo de energía que los paneles solares reciben rastreando continuamente el punto óptimo de operación.

Un generador fotovoltaico involucra comúnmente un controlador de carga, el cual opera con un algoritmo MPPT, que se encarga de encontrar el mejor punto de operación de la fuente (panel solar). Los convertidores conmutados de potencia (controlador de carga) son dispositivos versátiles a la hora de estabilizar una señal de salida, particularmente cuando el fenómeno natural que produce la energía eléctrica no es uniforme ni constante [5]. La electrónica de potencia ha evolucionado desde emplear los elementos semiconductores en baja, media y alta tensión, hasta crear dispositivos que permiten mejorar la eficiencia del sistema de generación, tal como lo hacen los convertidores conmutados de potencia CC/CC [1, 6, 7].

Todos los sistemas fotovoltaicos dependen de la cantidad de radiación que llega a los paneles solares y de la temperatura que se alcanza en dichos dispositivos [8]. Teniendo en cuenta que ni la radiación solar, ni la temperatura, se mantienen constantes en el tiempo, es necesario un dispositivo que mantenga estable el nivel de potencia de la señal de salida, ante pequeñas perturbaciones en la fuente o en la carga misma (sombras parciales, nubes, etc.) [9, 10]. En la actualidad, existen técnicas que permiten encontrar el punto de máxima potencia MPP en generadores fotovoltaicos.

Por otra parte, existe un gran número de convertidores conmutados de potencia con diferentes aplicaciones y configuraciones [11]. La mayoría de estos desarrollos son dispositivos de complejidad matemática importante, sobre todo para el modelamiento, la simulación y construcción [12, 13] y, en el entorno local y nacional poco estudiados y desarrollados, dejando un vacío del conocimiento en este entorno y que trabajos como el aquí presentados pretenden subsanar [14]. En la Tabla 1, se observa una relación de los algoritmos comercialmente más utilizados para el seguimiento al punto de máxima potencia.

Tabla 1. Principales técnicas de MPPT [7, 15]

Técnica MPPT	Variable de Control	Costo	Factor de Seguimiento	Complejidad
Perturbar y Observar	Tensión, Intensidad	Alto	Bueno	Alta
Oscilación Forzada	Tensión, Intensidad	Alto	Aceptable	Alta
Conductancia Incremental	Tensión, Intensidad	Muy Alto	Bueno	Medio
Realimentación de variables	Tensión o Intensidad	Bajo	Malo	Simple

Para el caso de la técnica de Perturbar y Observar P&O, se puede mejorar en cuanto al factor de seguimiento, disminuyendo el paso de la perturbación de potencia, lo que ocasiona menor oscilación alrededor del punto de potencia máxima [5, 16]. El costo de los dispositivos comerciales es un aspecto a mejorar en casi todos los casos [7, 17]; este aspecto se encuentra muy relacionado con la complejidad de la implementación, por lo que se programó el algoritmo en un microcontrolador de hardware libre (Arduino Nano), haciendo que el dispositivo implementado en este trabajo tuviese un costo bajo y una complejidad moderada respecto de la programación del algoritmo y del ensamble del dispositivo electrónico.

Para evaluar el comportamiento del sistema ante perturbaciones y simular distintos escenarios, es necesario un modelo matemático del convertidor de potencia [18, 19]. El trabajo desarrollado tiene como objetivo documentar el comportamiento del convertidor de potencia tipo Boost Cuadrático, mediante simulaciones en el software PSIM del modelo y ensayos de laboratorio controlados. Tanto en las simulaciones como en el laboratorio se trabajó sobre un controlador MPPT que permite manipular la señal PWM y que controla el convertidor de potencia tipo Boost Cuadrático, disminuyendo la oscilación alrededor del punto de máxima potencia MPP.

2. MÉTODO

El trabajo de diseño y construcción del convertidor conmutado de potencia tipo Boost Cuadrático, se realizó en varias fases, esto debido a que es una investigación experimental, descriptiva y cuantitativa, la cual arrojó resultados medibles, comparables y verificables para facilitar la posibilidad de reproducir el experimento en condiciones experimentales similares. Para el desarrollo metodológico de este proyecto se propusieron distintas fases y actividades, en los apartados siguientes se describe en detalle cada una de las fases que dan respuesta a los objetivos planteados en la investigación.

2.1 Diseño del convertidor Boost cuadrático

Los convertidores conmutados de potencia CC/CC, tienen múltiples configuraciones que se utilizan para diferentes aplicaciones en la electrónica de potencia [10]. La configuración tipo Boost Cuadrático se puede observar en la Figura 1 y es la configuración que se utilizó dentro del ensayo experimental y las simulaciones a implementadas.

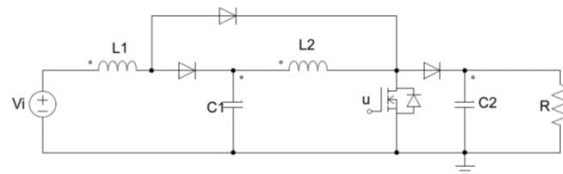


Figura 1. Convertidor Boost Cuadrático

En el circuito del convertidor se puede observar que el transistor mosfet es controlado por la señal $u(t)$, señal binaria y de control con modulación por ancho de pulso PWM) y que se conecta en la compuerta del transistor. Analizando el circuito de la figura anterior, las variables de estado corresponden a las magnitudes eléctricas en los elementos almacenadores de energía. Para el caso de las bobinas, la magnitud es la intensidad (i_{L1} , i_{L2}) para el caso de los capacitores, la magnitud es el voltaje (v_{C1} , v_{C2}) y se entiende cada una de estas como las variables de estado del convertidor conmutado en estudio [20]. El modelo conmutado del convertidor se obtuvo, luego de un análisis matemático del circuito electrónico utilizando las leyes de análisis de circuitos como la Ley de Voltajes y Corrientes de Kirchhoff, dicho modelo está definido por el conjunto de la ecuación (1), que son la agrupación de las variables de estado y la señal de conmutación $u(t)$.

$$\begin{aligned} \frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{v_i}{L_1} - \frac{v_{C1}}{L_1} (1 - u) \\ \frac{di_{L2}}{dt} &= \frac{v_{C1}}{L_2} - \frac{v_{C2}}{L_2} (1 - u) \\ \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{i_{L1}}{C_1} (1 - u) - \frac{i_{L2}}{C_1} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} &= \frac{i_{L2}}{C_2} (1 - u) - \frac{v_{C2}}{RC_2} \end{aligned} \quad (1)$$

Las ecuaciones diferenciales del modelo conmutado permitirán encontrar los valores de las constantes eléctricas del convertidor, tales como las inductancias, y los capacitores, así como el ciclo de trabajo y una frecuencia para la señal de conmutación $u(t)$, además de definir las ecuaciones de diseño de régimen estacionario o de estado estable, donde las derivadas son cero y las funciones alcanzan un valor específico [10]. Agrupando las componentes de DC se puede obtener las variables de estado en régimen estacionario, dichas expresiones matemáticas permiten el diseño estático del convertidor conmutado y se pueden detallar en la ecuación (2).

$$\begin{aligned}
V_{C1} &= \frac{V_i}{1-D} \\
V_{C2} &= \frac{V_i}{(1-D)^2} \\
I_{L1} &= \frac{V_i}{R(1-D)^4} \\
I_{L2} &= \frac{V_i}{R(1-D)^3}
\end{aligned}
\tag{2}$$

Para obtener una expresión de diseño, se analizaron las formas de onda de las variables de estado mostradas en la Figura 2, en la que observan las señales de corriente, tensión y la señal de control $u(t)$.

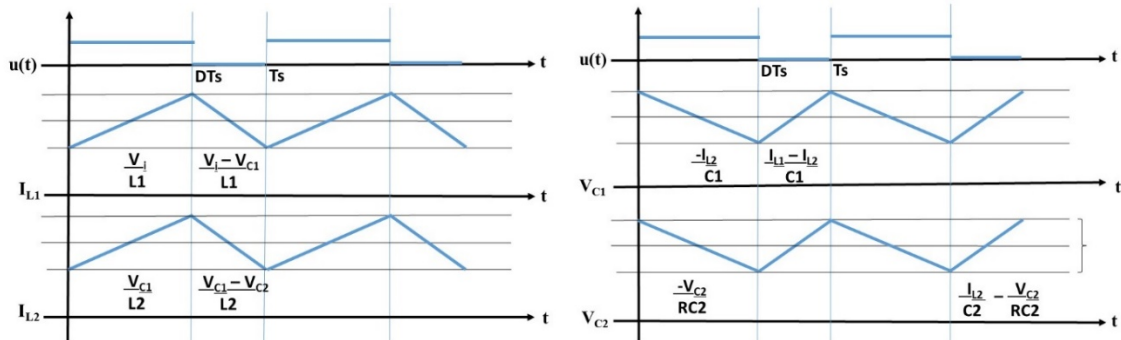


Figura 2. A) Corrientes de los inductores y B) Voltaje de Capacitores

Una vez analizadas cada una de las gráficas, es posible obtener una expresión para la razón de cambio de cada una de las variables, tomando dicho cambio en la señal como el porcentaje de rizado. Utilizando las ecuaciones de estado estacionario para diseño de convertidores y algunos criterios de diseño adicionales, se procede a calcular los valores de las inductancias y capacitancias del convertidor [21], los cálculos se realizan empleando la ecuación (3).

$$\begin{aligned}
\Delta I_{L1} &= \frac{DV_i}{2fL_1} \\
\Delta I_{L2} &= \frac{DV_i}{2fD'L_2} \\
\Delta V_{C1} &= \frac{DV_i}{2fRD'^3C_1} \\
\Delta V_{C2} &= \frac{D^2V_i}{2fRD'^3C_2}
\end{aligned}
\tag{3}$$

Los valores del rizado de cada uno de los elementos se definen a criterio propio, se realizan todos los cálculos para una frecuencia de operación de 62KHz, esto debido a que el microcontrolador a utilizar tiene un PWM configurable a dicha frecuencia. El voltaje de entrada en condiciones de estado estable debe ser de 17,5 V, de acuerdo con las especificaciones del panel solar. Los resultados para los elementos del convertidor son los mostrados a continuación en la ecuación (4).

$$\begin{aligned}
L_1 &= \frac{DV_i}{2f\Delta I_{L1}} = \frac{0.5 \cdot 17.5}{2 \cdot 62K \cdot 0.2} \approx 250 \mu H \\
L_2 &= \frac{DV_i}{2fD'\Delta I_{L2}} = \frac{0.5 \cdot 17.5}{2 \cdot 62K \cdot 0.5 \cdot 0.5} \approx 250 \mu H \\
C_1 &= \frac{DV_i}{2fRD'^3\Delta C_1} = \frac{0.5 \cdot 17.5}{2 \cdot 62K \cdot 80 \cdot 0.5^3 \cdot 0.15} \approx 47 \mu F \\
C_2 &= \frac{D^2V_i}{2fRD'^3\Delta C_2} = \frac{0.5^2 \cdot 17.5}{2 \cdot 62K \cdot 80 \cdot 0.5^3 \cdot 0.075} \approx 47 \mu F
\end{aligned}
\tag{4}$$

2.2 El Algoritmo de Perturbar y Observar P&O

El algoritmo de Perturbar y Observar toma muestras de corriente y voltaje a través de un sensor; luego evalúa el valor de la potencia eléctrica; acto seguido se procede a alterar el valor del voltaje obtenido y se evalúa el

comportamiento de la potencia, si es mayor que el dato inmediatamente anterior, se debe incrementar nuevamente el voltaje, si es menor se debe perturbar en la dirección contraria el valor del voltaje y evaluar de nuevo la potencia eléctrica. En la Figura 3, se puede observar el algoritmo de seguimiento al punto de máxima potencia P&O que se ha implementado.

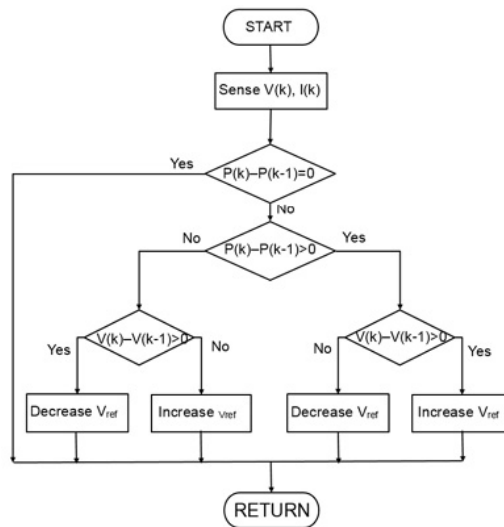


Figura 3. Algoritmo MPPT - P&O [22]

2.3 Simulaciones realizadas

Para verificar el comportamiento del circuito, se ha empleado el software de simulación PSIM con múltiples aplicaciones de electrónica de potencia. Utilizando esta herramienta informática se construyó el circuito del convertidor conmutado de configuración Boost Cuadrático. La simulación incluye un bloque de código de programación en el cual se escribió el algoritmo de Perturbar y Observar. En la figura 4, se puede observar la simulación implementada.

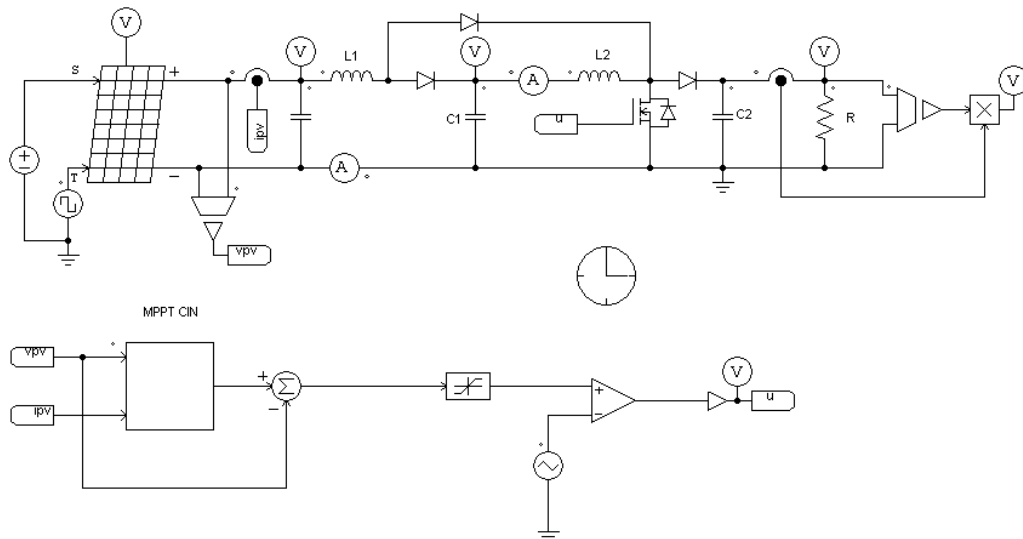


Figura 4. Boost Cuadrático - PSIM

En la simulación se incluyó el bloque de panel fotovoltaico que está incluido en el software, se configuró dicho módulo a 20W de potencia eléctrica debido a que el panel experimental que se va a utilizar en el experimento es de 20W también. Para las simulaciones se utilizó una carga de 80Ω, la carga a utilizar en la experimentación es una resistencia de potencia 1 KΩ.

Adicionalmente, la señal triangular que origina el PWM en la simulación tiene una frecuencia de 62 KHz, igualando la frecuencia del microcontrolador Arduino Nano. En la Figura 5 se evidencia parte del código incluido en la simulación.

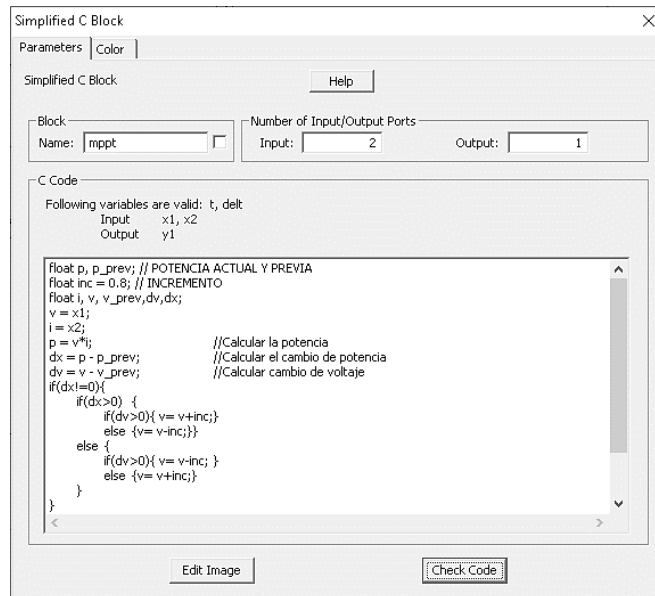


Figura 5. Código algoritmo P&O

El bloque de código para el algoritmo de seguimiento al punto de máxima potencia (MPPT), recibe las muestras de voltaje y corriente del panel solar (x_1 , x_2), a la salida entrega un voltaje perturbado (y_1) y lo compara con el voltaje del panel, generando una señal de error. La simulación implementada permite que dentro del bloque de código se implemente cualquier otro algoritmo para MPPT y por lo tanto se transforma dicha simulación en una herramienta para futuros desarrollos y trabajos adicionales relacionados con convertidores conmutados y generadores fotovoltaicos.

2.4 Construcción del convertidor

Para poder realizar el trabajo de investigación, así como la implementación y ensamble del circuito se requirió de una serie de materiales eléctricos y electrónicos, cuyos valores nominales se calcularon de acuerdo con los criterios de diseño del convertidor conmutado en los apartados anteriores y que se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales utilizados

Materiales electrónicos	Cantidad
Microcontrolador Arduino Nano	1
Sensor de corriente (ACS 712 – 20A)	1
Transistor de Potencia MOSFET (IRFP150N)	1
Transistor TIP	3
Diodos rectificadores de alta velocidad	3
Inductores de potencia	2
Capacitores de potencia	2

Además de eso, en la etapa de construcción del dispositivo, se elaboró un circuito impreso utilizando un software apropiado de simulación y diseño, este circuito contiene la etapa de potencia y la etapa de control electrónico. El microcontrolador utilizado es el Arduino Nano, dispositivo programable y de configuración sencilla, este dispositivo embebido utiliza una fuente externa de 12 V para funcionar, sin embargo, los puertos operan a niveles de tensión de máximo 5 V.

Este aspecto obliga a la construcción de un circuito driver que conmute los 5 V a 12 V como mínimo para lograr que el transistor mosfet entre en conducción, esto debido a que el voltaje mínimo de conmutación es 12 V. El mosfet utilizado es el IRFP150N, en la Figura 6 se puede evidenciar una imagen del producto final del diseño junto a una descripción de las partes principales del circuito.

El circuito incluye una entrada de potencia en donde se conecta el panel solar, y adicional a todo esto, una salida para conectar una carga resistiva de potencia. Adicionalmente y para adquirir la muestra de voltaje

del panel solar se utilizó un divisor de tensión simple, y para la muestra de corriente se requirió de un sensor ACS712 de 20A de corriente máxima. Este sensor electrónico arroja una señal de tensión de valor 0 a 5V de acuerdo con el nivel de intensidad que detecte en su entrada. Una vez completado el diseño y construcción del convertidor, se sometió el circuito a la validación mediante pruebas de laboratorio y simulaciones. En el siguiente apartado de este documento, se presentan los resultados de la experimentación, frente a las simulaciones realizadas.

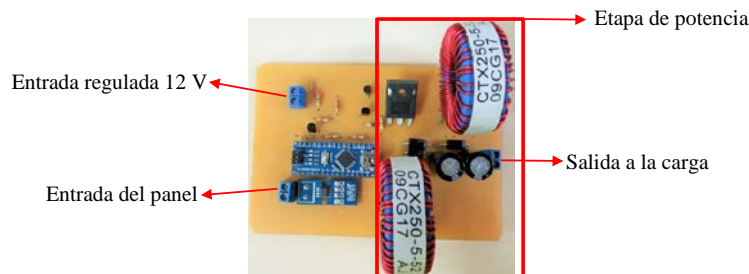


Figura 6. Convertidor Boost Cuadrático

Para poder recolectar la información y dar uso al convertidor de potencia implementado, fue necesario utilizar unos equipos de laboratorio que se relacionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Equipos utilizados

Equipos utilizados	Cantidad
Panel fotovoltaico de 20 W	1
Osciloscopio Digital de 2 canales	1
Fuente regulada dual	1
Lámpara de alta potencia (1000 W)	1

El producto de este trabajo está enmarcado dentro del proyecto de grado de la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás y fue desarrollado en cooperación con varios profesores del programa, la universidad facilitó los equipos de laboratorio necesarios para el desarrollo e implementación del experimento realizado y descritos en la tabla anterior.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que se presentan en este apartado fueron obtenidos desde el software de simulación PSIM y también desde el circuito implementado del convertidor conmutado de potencia y su etapa de control donde el algoritmo principal es el de Perturbar y Observar, programado en el microcontrolador Arduino Nano. Los resultados se resumen en resultados de simulación y de experimentación y al final de este apartado se confrontan los resultados obtenidos.

3.1 Resultados de las simulaciones

Tomando en cuenta la implementación realizada en el software de simulación y de acuerdo con los valores obtenidos para los inductores y capacitores, así como la frecuencia de oscilación del PWM, se procedió a emular las condiciones de un sistema de generación fotovoltaico, se ha simulado variaciones tanto en la radiación solar incidente al panel como la temperatura del mismo, el software PSIM permite modificar estos valores que en algunos casos, podrían ser constantes pero en otros casos se presentan variaciones en dichos valores ocasionadas por sombras de nubes, árboles, animales y otros elementos presentes en el entorno. Inicialmente se trabajó sobre el montaje hecho en el software PSIM, los resultados de dichas simulaciones se pueden observar a continuación en la Figura 7.

Se puede observar que los voltajes mantienen la relación que indican las ecuaciones de estado estable presentadas por el conjunto de mostrado en la ecuación (2). Por otra parte, la potencia de salida del convertidor conmutado sigue a la potencia de entrada proveniente del módulo del panel solar incluso frente a las perturbaciones simuladas por variaciones continuas en las señales de entrada, estas oscilaciones de

potencia pueden observarse detalladas en la Figura 7c. El rizado del voltaje de salida es grande según se puede observar en la Figura 7a, esto se debe al porcentaje de rizado utilizado para encontrar los capacitores, sin embargo, permanece oscilando alrededor del punto de estabilización indicado por las ecuaciones. Las corrientes en los inductores representadas en la Figura 7b muestran oscilación amplia alrededor del punto de equilibrio debido al amplio porcentaje de rizado con el que se calcularon los valores de los inductores con los que el circuito se ha construido, sin embargo, se comportan según los criterios de diseño que se emplearon en el apartado.

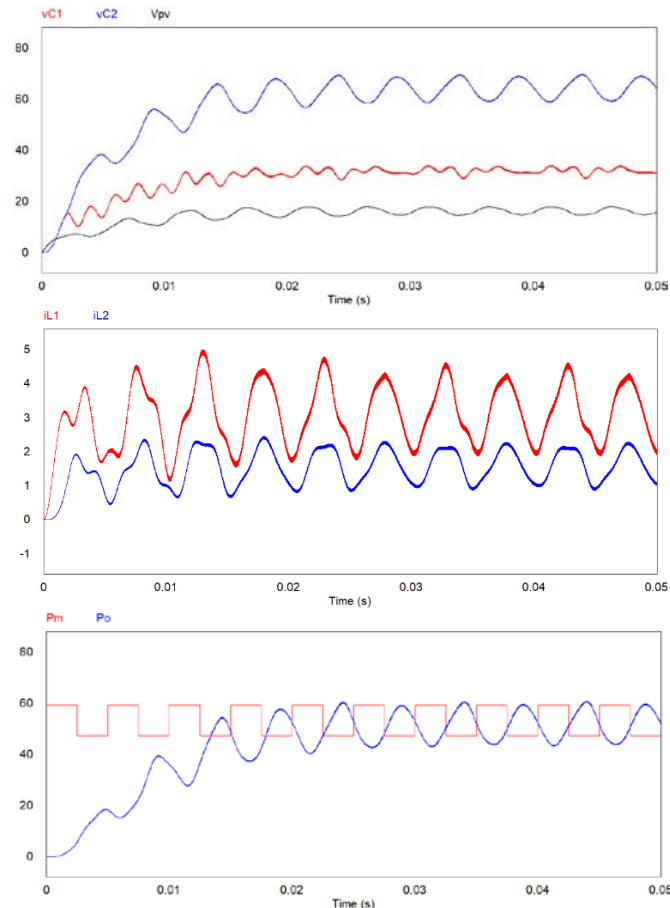


Figura 7. Algoritmo P&O con perturbaciones en la entrada: A) Voltajes, B) Corrientes, y C) Potencias

3.2 Resultados experimentales

Para corroborar los resultados simulados obtenidos y descritos en el apartado anterior, se realizó un trabajo experimental en el laboratorio de electrónica de la Universidad Santo Tomás en la ciudad de Bogotá - Colombia. Se procedió a comprobar el algoritmo implementado de Perturbar y Observar, conectando como fuente de potencia un panel solar de 20W y observando las señales en el sistema, como la señal de control PWM, los voltajes de salida y entrada del dispositivo implementado.

Al utilizar en el dispositivo implementado un sistema con microcontrolador, el código programado en el Arduino puede modificarse para continuar con los ensayos utilizando otras estrategias de control digital y control moderno que permitan optimizar aún más los resultados obtenidos. Para simular la fuente lumínica de entrada se utilizó una lámpara de 1000W para simular la radiación solar y sus posibles variaciones de una forma sencilla. El montaje experimental realizado se puede observar en la Figura 8.

Como parte del desarrollo del proyecto se programó el microcontrolador Arduino Nano con el algoritmo P&O implementado, se procedió a capturar las señales asociadas a este ensayo experimental. El programa implementado es simple y basado en el diagrama de flujo observado con anterioridad en la Figura 3. Para analizar el comportamiento del circuito construido y del algoritmo de Perturbar y Observar implementado, se tomaron las muestras de voltaje de entrada y salida del convertidor Boost Cuadrático controlado por el algoritmo de seguimiento al punto óptimo de potencia.

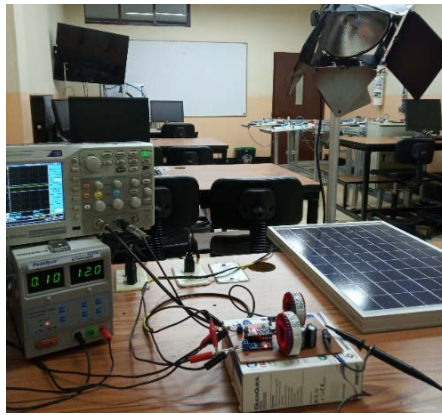


Figura 8. Experimentación en laboratorio

En las imágenes que encontrarán en la Figura 9, se evidencia el resultado obtenido y que es posible comparable a las simulaciones empleadas. Respecto a la implementación real y los resultados obtenidos, en la imagen de la Figura 9a, se puede observar claramente la señal de voltaje de salida y entrada cuando la carga es de circuito abierto, esa situación implica que el sistema intente compensar la ausencia de corriente aumentando el voltaje al máximo posible para mantener el nivel de la potencia, provocando que para una tensión de entrada de 17V, el voltaje a la salida esté cercano a los 100V. En la Figura 9b, se ha colocado en la salida del circuito una carga de 1000Ω que, si bien es elevada, provoca que las señales de voltaje disminuyan a casi al mismo valor de la entrada, es evidente que, para una carga presente, la señal de salida es más sensible a las perturbaciones de la entrada.



Figura 9. Voltajes de entrada y salida: A) circuito abierto, B) con carga de 1000Ω

4. CONCLUSIONES

El convertidor de potencia CC/CC Boost Cuadrático y los modelos obtenidos pueden ser utilizados para estudiar diferentes estrategias de control que apunten a la búsqueda del punto de máxima potencia. Dichos trabajos pueden ser posgraduales, o proyectos de investigación ejecutados en las Universidades y para beneficio directo de la comunidad científica y la sociedad puesto que las energías renovables han llegado

para transformar el sistema de distribución y la forma de generación mediante métodos alternos a la quema de combustibles fósiles. La estrategia de control implementada (Perturbar y Observar) puede ser utilizada con convertidores de distintas topologías (Buck, Boost, etc.), debido a esto es posible que otros trabajos de investigación se realicen a partir de los resultados expuestos en la discusión, convirtiendo este trabajo en una base experimental de desarrollo para otros proyectos de investigación. Adicional a todo lo expuesto, las posibles combinaciones son muchas pues se podría combinar un solo algoritmo MPPT con todas las topologías de convertidores o viceversa.

Los algoritmos de seguimiento al punto de máxima potencia pueden ser programados fácilmente en un microcontrolador o en un procesador digital de señales DSP, o incluso podrían ser construidos de forma analógica mediante amplificadores operacionales y transistores, lo cual implica facilidad a la hora de implementar y construir este tipo de circuitos electrónicos de potencia. Cabe añadir que el modelo matemático del convertidor de potencia se encuentra listo para adaptarle cualquier estrategia de control moderno o clásico, y evaluar el comportamiento de este circuito tanto experimental en entornos controlados o reales y en simulaciones como las presentadas en este trabajo.

Los convertidores conmutados de potencia CC/CC continuarán haciéndose un lugar en la electrónica de potencia, dado que su aplicación es múltiple y en distintos aspectos de la disciplina. En este trabajo, se utilizó para adaptar las condiciones de carga de un panel solar y realizar el control del máximo nivel de potencia a la salida del convertidor conmutado, sin embargo, las aplicaciones van desde los vehículos eléctricos hasta las grandes turbinas eólicas, cabe agregar que Colombia es una nación en la que este tipo de tecnologías recién empiezan a aparecer en el abanico de posibilidades y de ahí la importancia de la realización de mayores aportes en estos temas y del desarrollo de trabajos que aporten directamente a los métodos no convencionales de generación de energía.

Los resultados obtenidos con las simulaciones implementadas para el convertidor de potencia Boost Cuadrático, permitió evidenciar que los modelos estudiados, se comportan equivalentemente a los convertidores reales, lo que convierte el producto de este proyecto en el insumo para simular e implementar cualquier estrategia MPPT que mejor se adapte y que mayor robustez le brinde al sistema de control de carga. El circuito implementado en el simulador se utilizó para evaluar el comportamiento en ambientes controlados y respondió notablemente permitiendo recolectar importantes datos y arrojar conclusiones de investigación.

El diseño en estado estable del circuito del convertidor arrojó como resultado un circuito electrónico que fue la planta utilizada para implementar los algoritmos MPPT. Dichos algoritmos son muy relevantes a la hora de controlar y establecer niveles de potencia constante en los controladores de carga para paneles solares. El algoritmo de Perturbar y Observar implementado en este trabajo se comprobó en ambientes simulados y en un entorno experimental de laboratorio.

Las señales de voltaje que se encuentran presentes en los capacitores del circuito presentaron un comportamiento similar en todos los casos implementados de simulación, esto se puede observar en los resultados y por lo tanto no serían un factor concluyente a la hora de seleccionar una estrategia de control pertinente. En los casos estudiados, se observó que la potencia de salida se comporta según lo esperado, es decir, realiza un seguimiento de la potencia que presenta el panel solar ante las perturbaciones simuladas. Para el caso del algoritmo de conductancia incremental, la potencia de salida del convertidor se mantiene en el rango de la variación de la potencia del panel solar, por lo que dicho algoritmo tiene un comportamiento satisfactorio a comparación del P&O.

El comportamiento del convertidor es aceptable, siempre y cuando la perturbación no suprima totalmente la fuente de energía. Se observó en el caso implementado experimentalmente, que el circuito conmutado se comporta según lo esperado. Los valores para el ciclo de trabajo y las señales de salida obedecen lo indicado por las ecuaciones de estado estacionario. Se ha verificado cada uno de los algoritmos mediante condiciones normales, lo que da como resultado las señales mostradas en el apartado de resultados. Por otra parte, se procedió a verificar el comportamiento mediante una variación en la fuente de tensión, arrojando como resultado, que el algoritmo logra estabilizar la tensión y potencia de salida.

REFERENCIAS

- [1] C. S. Murdoch and S. N. Reynoso, "Design and Implementation of a MPPT Circuit for a Solar UAV," *Ieee Lat. Am. Trans.*, vol. 11, no. 1, pp. 108–111, 2013.
- [2] L. J. Ruiz C, J. A. Beristáin J, I. M. Sosa T., and H. Hernández, "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar," *Rev. Ing. Eléctrica, Electrónica Y Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 17–23, 2010.
- [3] N. Castellanos, "Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía," *Rev. Inven.*, no. 15, pp. 35–40, 2013.
- [4] R. Mejía, N. Moreno, Á. A. Rodríguez, J. Chica, J. A. Figueredo, and J. Rodríguez, "Diagnóstico uso racional del consumo de energía en hogares del municipio de Chocontá (cundinamarca) y en los barrios de cooviprof y el troncal (valle del cauca) en Colombia," *Ingenio Magno*, pp. 152–166, 2020.
- [5] C. Robles, "Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa," *Rev. Electrónica Estud. Telemáticos*, vol. 10, no. 2008, p. 16, 2011.
- [6] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "Implementación de un sistema de regulación para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles solares," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015.
- [7] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," *Sustain. Energy, IEEE Trans.*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2013.
- [8] Á. A. Rodriguez and J. A. Figueredo, "Selección e implementación de un prototipo de estación meteorológica aplicando IoT y herramientas Google," in *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, Instituto Antioqueño de Investigación, Ed. Medellín, 2016, pp. 341–352.
- [9] J. C. Gonzales Arispe and A. B. Ponce Vasquez, "Wind and PV Farms Integration within Power Systems Using Static and Dynamic Simulations," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 1, pp. 148–154, 2018.
- [10] C. A. Torres Pinzón, "Control Robusto de convertidores conmutados CC/CC mediante desigualdades lineales matriciales," *Universitat Rovira I Virgili*, 2012.
- [11] R. Haroun, A. El Aroudi, A. Cid-Pastor, G. Garcia, C. Olalla, and L. Martinez-Salamero, "Impedance Matching in Photovoltaic Systems Using Cascaded Boost Converters and Sliding-Mode Control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2014.
- [12] V. V. R. Scarpa, S. Buso, and G. Spiazzi, "Low-complexity MPPT technique exploiting the PV module MPP locus characterization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1531–1538, 2009.
- [13] M. Ricco, P. Manganiello, E. Monmasson, G. Petrone, and G. Spagnuolo, "FPGA-Based Implementation of Dual Kalman Filter for PV MPPT Applications," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 176–185, 2017.
- [14] D. A. Mejía, I. Torres, and J. L. Diaz, "Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos," no. 45, pp. 44–55, 2014.
- [15] M. A. G. De Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. De Azevedo Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2013.
- [16] M. Killi and S. Samanta, "Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5549–5559, 2015.
- [17] F. M. Serra *et al.*, "IDA-PBC Controller of a DC-DC Boost Converter for Continuous and Discontinuous Conduction Mode," *Ieee Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 1, pp. 52–58, 2018.
- [18] D. A. M. A. el Motaleb, "Seguimiento del punto de máxima potencia en Sistemas Fotovoltaicos," pp. 1–18, 2010.
- [19] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5th ed. Madrid, 2010.
- [20] H. Abid, A. Toumi, and M. Chaabane, "MPPT Algorithm for Photovoltaic Panel Based on Augmented Takagi-Sugeno Fuzzy Model," *ISRN Renew. Energy*, vol. 2014, pp. 1–10, 2014.
- [21] D. W. Hart, *Electrónica de Potencia*. Madrid, 2001.
- [22] Mathworks, "MPPT Algorithm - MATLAB & Simulink," 2000.

Análisis a la fiabilidad y el rendimiento de la transmisión de datos digitales sobre una red eléctrica

Lizeth Dayane Cortés Hernández¹

Verena de Jesús Mercado Polo²

Alonso de Jesús Retamoso Llamas³

Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

En Colombia no es muy popular la implementación de las redes de Comunicación Powerline PLC, lo cual puede ser debido a la desconfianza existente en utilizar la red eléctrica para la transmisión de datos. Este capítulo se basa en un trabajo de investigación de profesores del programa de Ingeniería Eléctrica que analizan la fiabilidad y el rendimiento de la transmisión de datos digitales sobre la red eléctrica de las Unidades Tecnológicas de Santander, con el fin de tener una opción de conectividad interna dentro de la Institución.

¹ Ingeniera Electrónica y Magíster en Ingeniería Electrónica. Profesora de tiempo completo.

Contacto: lizethcortes@correo.uts.edu.co

² Ingeniera Electricista y Especialista y Magíster en Automatización e Informática Industrial. Profesora de tiempo completo.

Contacto: verenadejesus@correo.uts.edu.co

³ Ingeniero Electricista y Magíster en Potencia Eléctrica. Profesor de tiempo completo.

Contacto: alonsoretamoso@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las redes informáticas cada vez se han hecho un elemento indispensable en la vida de las personas. Es raro encontrar un hogar en cualquier población del mundo que no tenga un dispositivo capaz de conectarse a una red, en búsqueda de conexión a la Internet o acceso a compartir medios como impresoras o dispositivos multimedia. De igual manera, en muchos lugares, cada vez son más comunes la aparición de cableados estructurados o sistemas que permitan distribuir información (fotos, videos, archivos, etc.) desde un lugar de la casa hasta cualquier extremo de ella.

El método más común para extender una red por un espacio físico determinado es el cableado, lo cual representa el uso de canaleta, romper estructuras y luego resanarlas para colocar ductos internos o en el peor de los casos estéticos, simplemente atravesar el cable y dejarlo a la vista, lo cual resulta ser algo estéticamente mal visto.

Otro método es usar un sistema inalámbrico, el cual realmente representa una buena opción para lugares pequeños y con pocos obstáculos hacia las ondas electromagnéticas. Si las distancias se extienden suelen aparecer interferencias o pérdidas de señal, la solución suele ser a veces amplificar la señal, pero no está de más recordar que señales muy potentes son reguladas por el ministerio de comunicaciones al cual tendríamos que solicitarle un permiso para realizar dicha transmisión.

Se hace necesario conseguir un método de transmisión a distancias medias que no sufra de pérdidas de señal como en el inalámbrico y que no necesiten remodelación de inmobiliario para su implementación. Una solución puede ser modular la señal y repotenciarla a través de un cableado, que normalmente ya existe en cualquier casa como lo es el cableado eléctrico. Este tipo de transmisión por medio de la red eléctrica es conocido como PLC.

Durante años ha sido una gran discusión la implementación de estos dispositivos PLC ante quienes defienden a toda costa el uso de dispositivos WiFi sabiendo que está última es susceptible a interferencias electromagnéticas, pero aduciendo que las redes eléctricas poseen demasiados obstáculos que impiden una buena transmisión de datos.

Al final se desea saber si es posible implementar de soluciones de comunicación de datos a través del uso de la red eléctrica como medio de transmisión sobre edificaciones. Como referencia del estudio se tomó la red eléctrica de las Unidades Tecnológicas de Santander en la sede de Bucaramanga, Colombia.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Tecnología PLC

El Power Line Communication PLC [1] es un tipo de tecnología que usa el cableado de la red eléctrica como medio de comunicación para la transmisión de información digital. La estrategia utilizada es aprovechar el ancho de banda total disponible en dicho cableado eléctrico para la transmisión de datos, y por medio de filtros separar la señal eléctrica de 120VAC que en el caso colombiano es de 60Hz y por las frecuencias superiores transmitir información digital en banda angosta o ancha según sea la necesidad. El tendido eléctrico generalmente es de cobre, el cual puede soportar la transmisión de señales superiores a 30MHz, dependiendo el valor del calibre y la calidad de instalación de dicho conductor.

Los primeros trabajos de investigación en temas de PLC fueron creados para transmisión datos en banda angosta, esto fue entre los años 1976 a 1978, en Escocia, por los ingenieros de la empresa Pico Electronics Ltda. y de la empresa de sistemas de audio BSR[3]. Estos estudios tenían el propósito de controlar el encendido y apagado de dispositivos electrónicos de forma remota.

Como resultado de estos estudios apareció en 1978 un protocolo denominado X-10 el cual se convirtió en un estándar internacional para transmisión de señales para el control. Las señales de control en el protocolo X10 usaban la transmisión de ráfagas de pulsos con radiofrecuencia inferiores a 150KHz que representaban

información digital. Con el tiempo esto se empezó a utilizar en el campo de la domótica para el control a distancia de dispositivos domésticos.

Durante muchos años se inició el trabajo en transmisión de datos en banda ancha, sin embargo, tan solo hasta finales del 2010 la IEEE aprueba el estándar P1901 [2], el cual consiste en la normatividad para las transmisiones de datos con velocidades superiores a 100 Mbps por medio de las líneas eléctricas de potencia. El P1901 agrega el concepto de BPL (Broadband Power Line para referirse al PLC exclusivo de banda ancha. De acuerdo con [4], el estándar P1901 se enfoca principalmente en:

- Estrategias para la calidad de servicio y buen ancho de banda.
- El uso eficaz del canal como medio de comunicación.
- Sistemas de seguridad.

Las características [2] más significativas que permiten describir un sistema PLC son:

- Tecnología usada para la banda ancha.
- Simetría en el ancho de banda.
- Velocidades de transmisión de hasta 1Gbps
- Instalación sencilla y rápida.
- No interrumpe el sistema eléctrico
- El Enchufe eléctrico se convierte en una toma de energía, voz y datos.)
- No requiere cableado adicional.
- El modem PLC es el equipo de conexión
- Conexión de datos continua.

Uno de los principales objetivos del protocolo P1901 es unificar a nivel mundial el uso del BPL y con esto lograr una coexistencia e interoperabilidad entre todos los dispositivos BPLs y con esta manera lograr la compatibilidad de equipos sin importar la marca, tanto de primera milla como de última milla [2].

El estándar define cómo realizar la modulación de las señales desde la capa física y la organización de las tramas de datos en la capa de enlace de datos MAC existente en el modelo de referencia OSI. Para la modulación, se establece el uso de frecuencias de transmisión entre 1MHz y 30MHz. El equipo encargado de modular y demodular se denomina modem PLC. [2]

Los módems PLC son los encargados de realizar la modulación y demodulación de la señal y a la vez deben llevar el filtrado de la señal eléctrica de 120VAC a 60Hz con el fin de evitar daños eléctricos dentro de los equipos de comunicación. El filtro utilizado es un filtro pasa altos.

La señal de datos puede tener atenuaciones durante el trayecto de la red eléctrica para lo cual se requiere el uso de equipos repetidores PLC, los cuales se encargan de repotenciar la señal a través del trayecto por el cable eléctrico. En la Figura 1 se visualizan los elementos típicos de una red PLC.

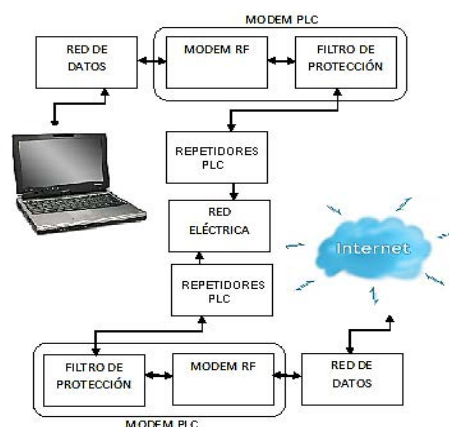


Figura 1. Elementos típicos de la tecnología PLC

Los inconvenientes típicos en las redes PLC son [3]:

- Solo transmite entre enchufes que se encuentren dentro de la misma fase eléctrica.
- La señal de datos no es capaz de atravesar transformadores, como consecuencia a esto, la señal no pasa entre alta tensión, media tensión y baja tensión, para tal objetivo se requiere realizar saltos de la señal mediante dispositivos adaptadores.
- No se recomienda utilizar multi tomas pues estas generan capacitancias parásitas que a su vez actúan como filtros.

Otro factor importante a tener en cuenta es la impedancia [4] del cableado eléctrico, el cual puede genera atenuación en ciertas frecuencias de la señal de datos y por consecuencia una disminución en la distancia de transmisión. En casos críticos podrían presentarse eventos donde exista una pérdida total de los datos. Un caso de gravedad es el paso entre transformadores, los cuales atenúan al 100% la señal de datos ya que se comportan como filtros pasa bajos [5].

3. MÉTODO

Para el desarrollo de la investigación se planteó una metodología epistémica positivista, mediante la medición de datos tomados a partir de experimentos realizados dentro de los edificios de las Unidades Tecnológicas de Santander. Se plantearon una seria de actividades a desarrollar para el cumplimiento de las metas las cuales se plantean de manera general a continuación:

1. Seleccionar puntos para realizar las pruebas de rendimiento bajo el software especializado.
2. Realizar las medidas del ruido sobre la red eléctrica.
3. Realizar la medida de la impedancia de la red eléctrica.
4. Hacer pruebas de rendimiento de transmisión de datos bajo la implementación de equipos de red inalámbricos.
5. Analizar los resultados.

3.1 Aspectos técnicos para la toma de medidas

3.1.1 Medición del ruido en una línea de potencia eléctrica

Para la medición del ruido se utiliza un analizador de espectros en la zona implicada (Figura 2).

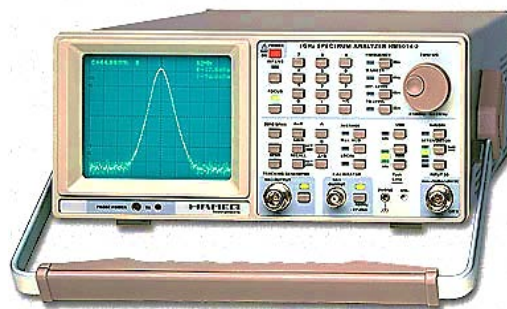


Figura 2. Analizador de espectros

3.1.2 Medición de impedancia del cableado eléctrico.

Este valor no se puede medir directamente, pero se puede utilizar la estrategia de medir el voltaje y la corriente que se encuentran en la red utilizando ecuación (1) de la impedancia (Z) [4].

$$Z = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (1)$$

Este valor podría ser imaginario, pero si se analiza la parte real resultante se podría aplicar directamente la ecuación (2) de la ley de ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

En el caso del experimento a realizar se debe remplazar el valor de V por la diferencia entre la tensión de referencia colocada con una fuente de voltaje en el punto fijo de la red (Primer piso del edificio B de las UTS) y la tensión medida en el punto variable (Séptimo piso del edificio B de las UTS), la corriente medida será la hallada en el punto de variable (Séptimo piso del edificio B de las UTS), así se genera la ecuación (3).

$$R(\text{red eléctrica}) = \frac{V(\text{generador}) - V(\text{medido})}{I(\text{medida})} \quad (3)$$

Este proceso se realiza varias veces con diferentes frecuencias, para conseguir un diagrama de Bode, tal y como se observa en la Figura 3, que represente la respuesta en frecuencia de la red [4].

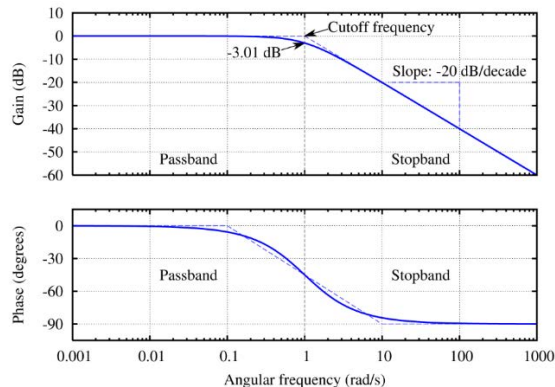


Figura 3. Diagrama de Bode [6]

3.1.3 Medición de rendimiento

Para poder calcular eficientemente el rendimiento de un medio de transmisión datos conocer los conceptos de ancho de banda y de tasa de transferencia efectiva [7].

- *Ancho de banda BW.* El ancho de banda representa la capacidad de un medio de transmisión para transmitir diferentes rangos de frecuencias y se puede definir como la diferencia entre la frecuencia máxima menos la frecuencia mínima. Ver Ecuación (4).

$$BW = F_{max} - F_{min} \quad (4)$$

La unidad de medida esta dad en Hz. Este término fue adaptado por el área de la informática para medir la capacidad máxima de transferencia de datos o bits que pueden viajar por un medio físico la cual está representada por la máxima velocidad posible en bits por segundo (bps) dentro de un canal de datos [5].

- *Tasa de transferencia efectiva.* Es prácticamente imposible que un canal de datos mantenga una velocidad máxima constante. Esta velocidad se puede ir afectando por la cantidad de tráfico de datos dentro de la red. Si se toma la velocidad de transmisión en un instante, esta podría oscilar entre cero y el ancho de banda dado en bits por segundo. Esta velocidad instantánea es conocida como la tasa de transferencia efectiva y depende de varios aspectos [5, 6]:

- Condiciones del medio de transmisión.
- Calidad de los equipos de red.
- Tráfico de datos.
- Ruidos e impedancias del medio de transmisión utilizado.
- Tipos de datos transmitidos.
- Topología física de la red.
- Tipos de dispositivos de los usuarios.
- Cantidad de usuarios transmitiendo.
- Tipos de servidores utilizados.

- *Medición de capacidad de ancho de banda.* Para poder medir la capacidad del ancho de banda se requiere implementar la red en el edificio B de las UTS, usando el esquema de la Figura 4; después, mediante una herramienta software de medición se toman las tasas de transferencia efectivas y se tomad de allí los datos más altos. Para que este valor sea aproximado al ancho de banda, se debe configurar la herramienta de medición con paquetes de datos pequeños. Dado que la conexión es punto a punto solo existen dos usuarios, por lo que se garantiza que no hay congestión por tráfico de datos.

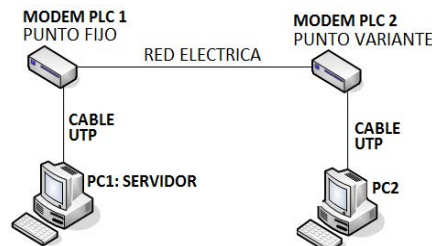


Figura 4. Topología de red para la toma de datos

La velocidad esperada debe ser de 1Gbps, por tal motivo los módems PLC utilizados deben cumplir con el estándar P1901 y garantizar según sus especificaciones una velocidad de transmisión de 1Gbps. Los 2 equipos de cómputo utilizado deben tener una tarjeta de red Giga Ethernet y el cable UTP usado mínimo debe ser de categoría 6. Este cable será solo usado entre el módem PLC y los equipos de cómputo, por lo tanto, deben presentar una longitud no mayor a un metro.

El protocolo P1901 recomienda manejar distancias inferiores a 100 metros, teniendo en cuenta esto, se escogió un punto fijo y seis puntos variantes, cada uno de ellos en un piso diferente, pero garantizando que estuvieran en dentro de la misma fase eléctrica. Como se escogieron puntos eléctricos cercanos a la zona de distribución entre pisos se logró que entre el primer piso y el séptimo piso no se superara la distancia aproximada de 70 metros de cableado.

Como herramienta de medición de desempeño, se implementó el software IPERF [8] el cual es una herramienta de análisis punto a punto que permite medir retardos, jitter, ancho de banda y tasa de error de bit (en porcentaje). Fue desarrollado para OS Windows Y Linux, se maneja por medio de comandos de texto, soporta TCP y UDP; y permite el establecimiento de una conexión de modo cliente-servidor.

Para la investigación desarrollada, IPERF, realizará la medida y entregará como resultado la tasa de transferencia promedio efectiva. Esta herramienta es configurada en un equipo como punto fijo y en el otro equipo como punto variable, tal y como se tiene planificado para la toma de medidas. Todo este proceso es automatizado mediante programación dado que IPERF permite líneas de comandos, en dicha programación, como se recomendó usar paquetes de datos pequeños, se configuraron paquetes de 64Kbps los cuales pueden transitar libremente por el canal de datos y de esta forma poder calcular mejor el ancho de banda de la red.

Se realizan medidas en las diferentes franjas de ocupación de la Institución. Las 9:00am para la franja de la mañana, las 3:00pm para la franja de la tarde y las 7:00pm, esto se realizó durante los 5 días hábiles de la semana por 2 semanas. Cada medida tomará muestras durante un tiempo de 60 segundos, de aquellas muestras el valor a tomar será el más alto, lo cual dará una aproximación al ancho de banda.

- *Modem PLC Utilizado.* Para el experimento se utilizó el PLC Belkin modelo F5D4076-S v2 de la Figura 5.



Figura 5. TPL-401E

El adaptador Powerline BELKIN F5D4076-S v2 presenta una velocidad de transmisión de 1Gbps, utiliza cualquier toma eléctrica para crear un entorno seguro en todo el edificio de la red de alta velocidad. Se conecta un adaptador a la red y otro adaptador a cualquier toma eléctrica en el sistema de acceso instantáneo a la red de alta velocidad.

Se pueden conectar varios adaptadores rápidamente gracias al práctico botón de sincronización. Se puede lograr utilizar un máximo de 16 adaptadores a dispositivos de red en diferentes habitaciones sin tener que instalar nuevos cables. Un puerto Gigabit Ethernet de alto rendimiento mantiene conexiones con cable. Este adaptador es ideal para su uso en edificios que interfieren con las señales de red inalámbrica. Las especificaciones del equipo [9] se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones PLC Belkin F5D4076-S v2

Marca	Belkin
Estándares utilizados	IEEE 1901, HomePlug®, IEEE 802.3, IEEE 802.3x, IEEE 802.3u, IEEE 802.3ab
Interfaz	100/1000Mbps Auto-MDIX RJ-45 Port
Frecuencia de banda	2 ~ 50 MHz
Modulación	QAM, QPSK, OFDM, BPSK, ROBO
Protocolo	TDMA, CSMA/CA
Velocidad	Powerline: Máximo 1Gbps; Ethernet: Máximo 2Gbps
Sistema operativo	Windows 10, 8, 7, Vista y XP (32/64-bit).

4. RESULTADOS

4.1 Selección de puntos para pruebas

Para realizar las pruebas se seleccionó la red eléctrica del edificio B de la sede principal de las Unidades Tecnológicas de Santander en el municipio de Bucaramanga, lugar en el cual se puede presentar un alto índice de ruido eléctrico por la cantidad de equipos de cómputo distribuidos entre oficinas y salas de informática. Por cada piso se escogió una toma eléctrica para realizar la prueba, durante diferentes horas del día. En el primer piso se ubicó el punto fijo y en el resto de pisos (7 pisos en total) se manejaron los puntos variables con el objetivo de manejar diferentes distancias.

4.2 Medición de ruido eléctrico

Para el experimento se seleccionaron 3 horas diferentes acorde a las franjas de estudio en las UTS (mañana, tarde y noche) para de esta manera poder identificar los diferentes ruidos dentro de la red eléctrica en un día cotidiano dentro de la Institución. Con esta medida se puede identificar el ruido dentro de la red eléctrica y de esta manera conocer previamente las limitantes que se pueden tener al intentar realizar el experimento. Los valores obtenidos son tabulados para poder graficarlos y de esta manera realizar su respectivo análisis. En la Figura 6 se muestra el valor pico de ruido tabulada en los 7 pisos del edificio B de las UTS y se visualiza cada hora por separado.

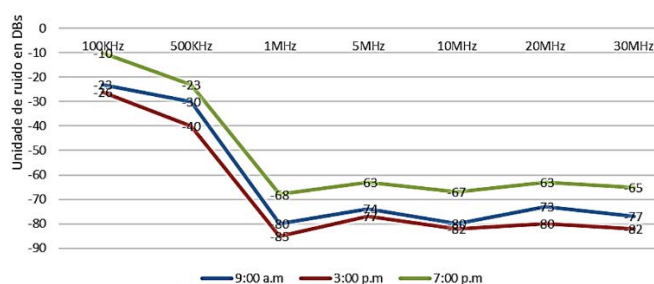


Figura 6. Ruido eléctrico del edificio B de las UTS

4.3 Medición de la impedancia de la red eléctrica

Para medir la impedancia se coloca una señal de voltaje en un punto denominado punto fijo del primer piso del edificio B de las UTS y se realizan las medidas en un punto eléctrico del séptimo piso del mismo edificio. El resultado del experimento se puede visualizar en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de impedancia de la red eléctrica entre el piso 1 y piso 7 del edificio B de las UTS sede Bucaramanga

Frecuencia	Tensión de prueba aplicada [Vpico]	Potencia medida en decibeles [dBm]	Potencia expresada en vatios [W]	Valor de corriente despejado [A]	Impedancia (Ω)
100KHz	1.0	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
500KHz	1.0	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
1MHz	1.0	-40	0.1	0.1	10
5MHz	1.2	-40	0.1	0.08333333	14.4
10MHz	1.3	-40	0.1	0.07692307	16.9
15MHz	1.3	-40	0.1	0.07692307	16.9
20MHz	1.4	-40	0.1	0.07142851	19.6

4.4 Medición de rendimiento mediante anchos de banda y tasas de transferencia

Se tomaron mediadas desde el primer piso como punto de referencia hasta el séptimo piso, logrando distancias de 1 piso, 2 pisos, 3 pisos, 4 pisos, 5 pisos y 6 pisos en 3 diferentes horas de lunes a viernes en jornada de la mañana, la tarde y la noche. La Figura 7 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el segundo piso, es decir, una para una distancia de 1 piso en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

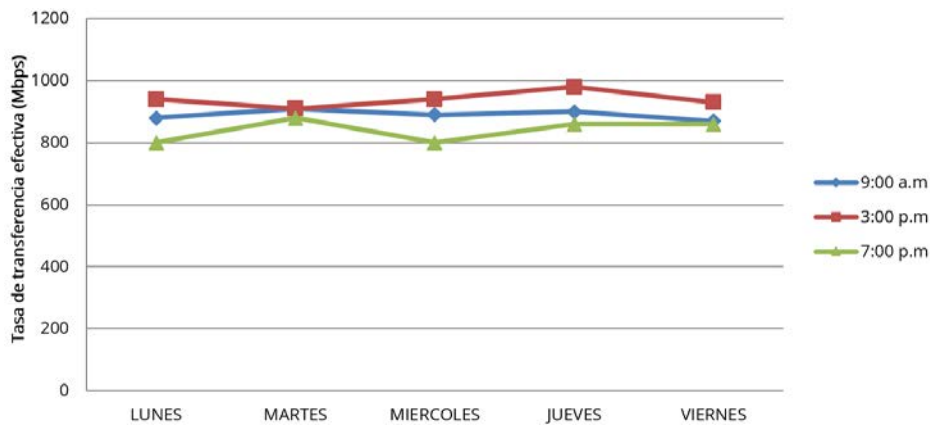


Figura 7. Toma de datos a 1 piso de distancia

La Figura 8 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el tercer piso, es decir, una para una distancia de 2 pisos en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

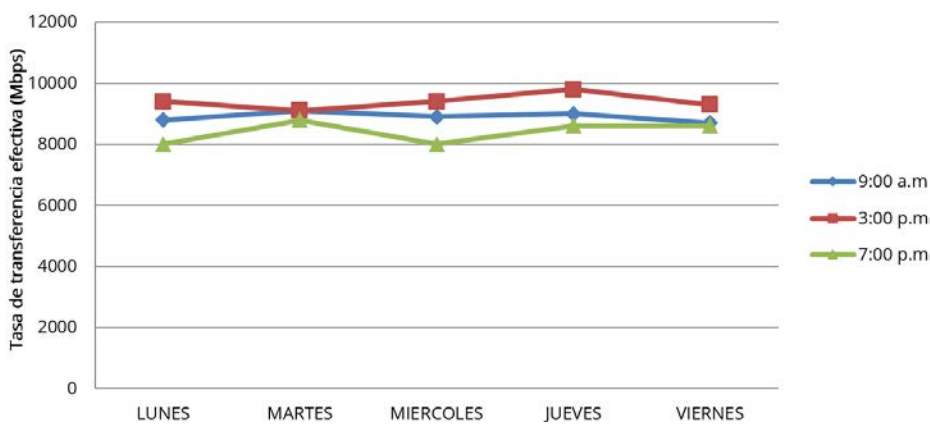


Figura 8. Toma de datos a 2 pisos de distancia

La Figura 9 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el cuarto piso, es decir, una para una distancia de 3 pisos en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

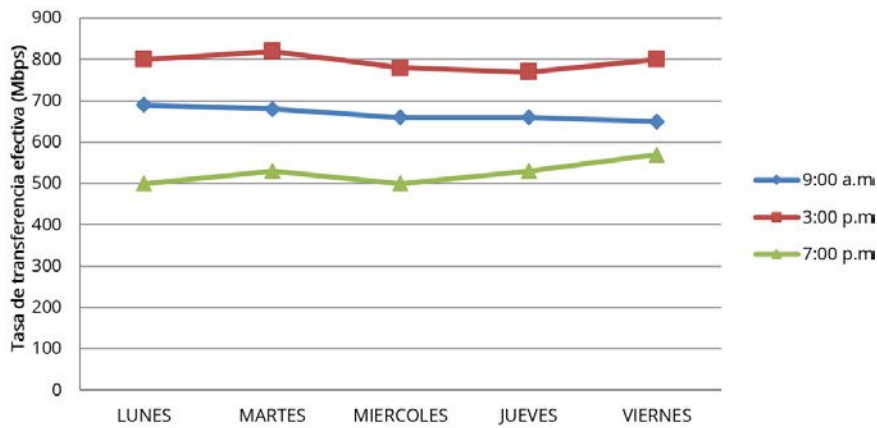


Figura 9. Toma de datos a 3 pisos de distancia

La Figura 10 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el quinto piso, es decir, una para una distancia de 4 pisos en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

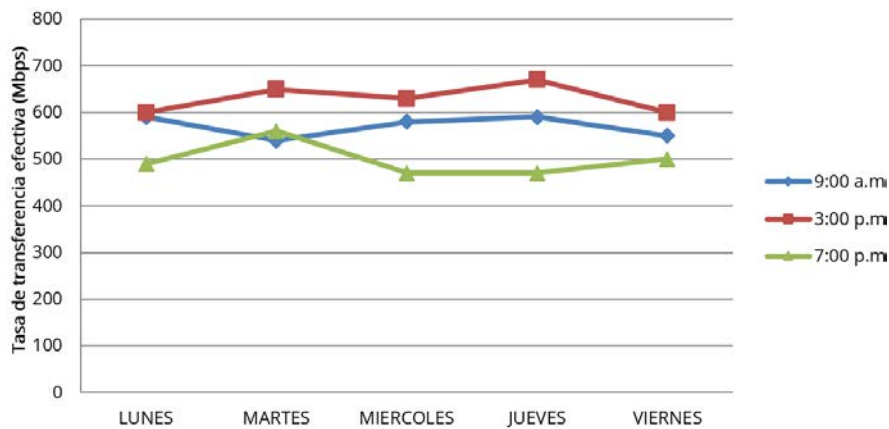


Figura 10. Toma de datos a 4 pisos de distancia

La Figura 11 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el sexto piso, es decir, una para una distancia de 5 pisos en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

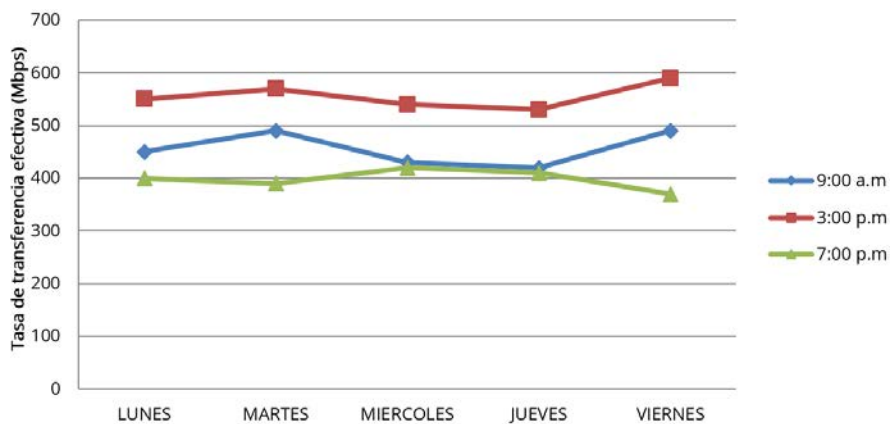


Figura 11. Toma de datos a 6 pisos de distancia

La Figura 12 presenta el resultado mayor obtenido de las tasas de transferencia medidas durante las dos semanas de experimento. En ella se aprecia una aproximación del ancho de banda entre el primer piso y el séptimo piso, es decir, una para una distancia de 6 pisos en tres horarios diferentes que representan las franjas de la mañana, la tarde y la noche de las UTS.

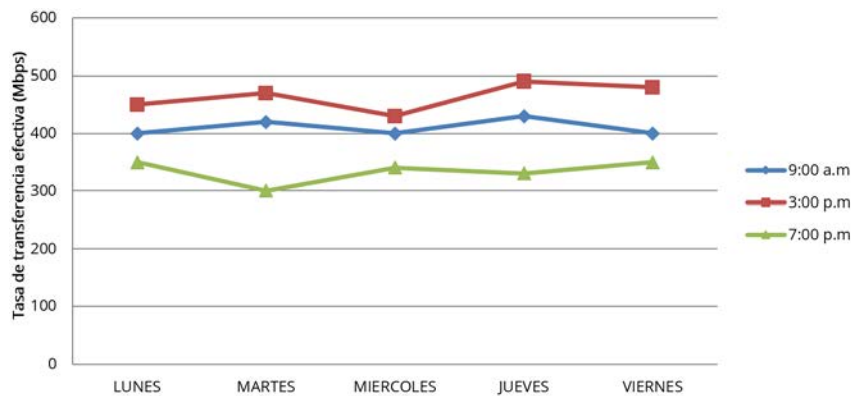


Figura 12. Toma de datos a 6 pisos de distancia

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En cuanto al ruido eléctrico del edificio, se puede apreciar un común denominador y es el alto nivel de ruido para frecuencias inferiores a 1MHz. La franja de trabajo de los módems PLC se encuentra entre 1MHz y 30MHz, allí se puede observar que en la franja de la tarde existe un menor ruido con respecto a la franja de la mañana. Esto se puede explicar dado que en el horario de la tarde hay menos estudiantes, por tal motivo muchos equipos y luminarias pueden mantenerse apagados.

En el horario de la noche se aprecia un incremento del ruido dado que la población estudiantil aumenta y toda la luminaria de la institución se encuentra encendida. A pesar de lo anterior se puede afirmar a nivel general que el ruido en las 3 franjas en este rango de frecuencias entre 1MHz y 30MHz es relativamente bajo con respecto a la señal transmitida por los módems, por lo que se puede considerar que se puede realizar la transmisión de datos.

En cuanto a la impedancia de la red, otro factor importante que puede limitar la distancia de transmisión, se puede observar que los valores medidos son inferiores a $1K\Omega$, lo cual es una medida pequeña y con esto se puede garantizar un poco probabilidad de pérdidas provocadas por la impedancia de la red.

Se esperaba 1Gbps como máxima capacidad en el ancho de banda debido a los equipos utilizados, el peor caso sucede en la distancia de 6 pisos, el cual presenta una tasa de transferencia igual a los 290Mbps la cual representa con una caída en rendimiento del 71%. Sin embargo, se puede considerar un éxito debido a que qué en la actualidad para poder llevar señal de datos en el edificio se requirió el uso de dos Access Point por cada piso conectados mediante cableado UTP, Ya que con un solo equipo Wifi desde el primer piso fue imposible dar señal al edificio completo, las pérdidas inalámbricas son mayores al intentar atravesar muros.

El horario de en la franja nocturna es la que presenta un valor más bajo en todas las gráficas resultantes, esto tiene sentido dado que según se aprecia, el ruido eléctrico se incrementa en el horario de la noche ya que en esta franja la institución tiene mayor cantidad de estudiantes, lo que representa un mayor número de dispositivos encendidos en las salas de informática. Además, las luminarias se encuentran encendidas.

Al medio día se encuentran las tasas de transferencias más altas debido a que el uso de equipos eléctricos en ese horario es más bajo, logrando en el peor de los casos, es decir, desde el primer piso hasta el séptimo piso, una velocidad de 400Mbps, lo cual representa una pérdida de señal del 60%.

6. CONCLUSIONES

Es posible utilizar la red eléctrica del edificio B de las Unidades Tecnológicas de Santander para la transmisión de datos.

El hecho de haber demostrado el funcionamiento de la tecnología PLC en banda ancha en un edificio de una Institución de educación superior con un alto índice de usuarios, sobre todo en las franjas de la noche, puede generar una confianza para utilizar esta tecnología en edificios domiciliarios, los cuales en teoría deberían presentar un menor nivel de ruido eléctrico.

El experimento determinó un valor de 290Mbps en el peor de los casos para una distancia de 70 metros, esto representa que el PLC puede ser implementado en la Institución para suministrar el servicio de Internet el cual en la actualidad no supera los 50Mbps.

La investigación realizada refuerza el estándar P1901, el cual garantiza el trabajo de esta tecnología en cualquier ambiente para distancias menores a 100 metros bajo las condiciones de conectividad establecidas, tales como, no utilizar regletas, ni utilizar más de una fase eléctrica.

Las redes eléctricas en Colombia están subutilizadas ya que constituyen un medio de transmisión de datos en potencia que ha sido poco utilizado en la región.

Con esta investigación realizada se puede confirmar que dentro de las Unidades Tecnológicas de Santander se puede contar con un medio de transmisión de datos que por lo menos en este caso puede interconectar puntos dentro de todo el edificio B, sin invertir en una adecuación especial, sino tan solo, en un par de módems PLC disponibles en la actualidad por medio de envíos internacionales comprados a bajo costo fácilmente por medios electrónicos. Lo anterior debido a que se comercializan muy poco en el país por desconocimiento de la tecnología.

REFERENCIAS

- [1] M. K. Lee, «"HomePlug 1.0 powerline communication LANs—protocol description and performance results",» Recuperado: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/dac.601>
- [2] IEEE, «"IEEE 1901-2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications",» Recuperado: <https://standards.ieee.org/standard/1901-2010.html>
- [3] C. Bravo, «"Diseño de un ISP, basado en la tecnología Broadband Power Line Communications, para la Empresa Eléctrica Quito S.A.",» 2006. Recuperado: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5051>
- [4] De la Fuente, «"Sistema PLC de banda angosta para la caracterización de la impedancia de la red eléctrica,» Recuperado: <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/253>
- [5] Schwager, «"Powerline Communications : Significant Technologies to become Ready for Integration",» Recuperado: https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico_mods_00022425
- [6] Omegatron, «"Butterworth filter bode plot",» Recuperado: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Butterworth_filter_bode_plot.png
- [7] L. Motta, «"Análisis comparativo entre tecnologías Power Line Communication en el contexto de sistemas de medición remota de energía en baja tensión",» 2018. Recuperado: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1643>.
- [8] K. MAEDA, «"Implementation of a Performance Measurement Tool for IP Streaming Using Two Definitions of Jitter",» 2006. Recuperado: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10018583365/>
- [9] Belkin, «"Gigabit Powerline HD Starter Kit",» Recuperado: <https://www.belkin.com/us/support-product?pid=01t80000001zIAEAA2>

Determinación del efecto de un sistema micro controlado de riego por goteo en la fertilización y cultivo del ají

Jorge Luis González¹

Delvis Mejía Álvarez²

Jairit Garavit Garavit³

María Inés Mantilla Pastrana⁴

¹ *Universidad Popular del Cesar*

^{2,3} *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*

⁴ *Red latinoamericana de enfermería informática*
Colombia

La presente investigación tiene por objetivo determinar el efecto del sistema micro controlado de riego por goteo para la fertilización y cultivo de ají en la Finca Saradila, en el Municipio Molino del Departamento la Guajira, Colombia. El estudio para la variable sistema micro controlado de riego por goteo se apoyó en los postulados de [6, 10, 18, 19]. La investigación se tipificó como un estudio investigación descriptiva, de campo experimental, con un diseño pre-experimental; la población estuvo constituida por diversas fuentes de información bibliográfica y relacionada con la Finca Saradila a partir de la Unidad de Análisis del sistema de riego por goteo. La técnica de recolección de datos que se utilizó fue el sistema fólder-observación; y como instrumento la ficha 2 bibliográfica, así como la ficha resumen. La validez de estos instrumentos se llevó a cabo por medio del método de triangulación y la confiabilidad se realizó a través de la triangulación de la información obtenida. Se concluyó que el sistema micro controlado de riego por goteo es efectivo, debido a que permite, particularmente, ahorrar el agua a partir del control del riego y la fertilización del cultivo.

¹ Magister en Control y Automatización de Procesos.

Contacto: jgonzalez@unicesar.edu.co

² Magister en Educación en Línea.

Contacto: delvis.mejia@unad.edu.co

³ Especialista en Educación Superior y a Distancia.

Contacto: jairit.garavit@unad.edu.co

⁴ Doctora en Educación, Magister en enfermería.

Contacto: mariainesmantilla@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La constante necesidad del hombre de mejorar procesos, reducir tiempo además de los costos, ha llevado a lograr avances importantes en materia tecnológica, como se aprecia en los sistemas micro-controlados, sistemas de comunicación y transmisión de datos. En este sentido, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [8], dada la creciente escasez del agua en el planeta, originada por los cambios climáticos aunado a la mayor demanda de los escasos recursos hídricos; se hace indispensable el uso eficiente de las aguas superficiales y subterráneas disponibles a partir del uso adecuado de sistema de tecnología.

Pero, según [18], a pesar del esfuerzo el desarrollo de los pueblos está ligado estrechamente a la agricultura y ésta, al suelo y al agua, lo que obliga a potenciar la investigación y desarrollo de técnicas que permitan conservar las tierras, así como administrar utilizando también en forma eficiente el agua desde la captación y conducción. De esa forma, a través de la aplicación de las nuevas tecnologías electrónicas desarrolladas en los últimos tiempos, podría establecer posibles según [10] formas que permitan el control de riego, así como también fertilización por goteo de una producción agrícola necesaria para el suministro humano ya que esta forma de riego optimiza el uso del agua.

Esta realidad conlleva a la necesidad de hacer uso al manejo de la información de manera rápida y almacenable. En ese sentido, se tiene que el alto desarrollo industrial junto a la evolución de la tecnología, han llevado a los productores agrícolas a plantearse nuevos enfoques para proyectarse en el mercado competitivo de manera que puedan maximizar sus recursos con satisfacción de las necesidades de los usuarios, para lograr este propósito el uso del micro-control electrónico automático se presenta como la mejor alternativa con que las industrias cuentan, siendo estos consideradas como una herramienta indirecta que reduce de los costos de los procesos existentes.

De allí que cuando el tema de sistemas micro-controlados se introduce en la producción empresarial se deben entender los microcontroladores tal como lo describen en [9], para quienes constituyen una de las principales áreas de la Electrónica Aplicada porque facilitan la introducción de los procesadores digitales en numerosos productos industriales. Además, consideran los microcontroladores son en sí mismos una tecnología compleja en la que coexisten numerosos conceptos interrelacionados que requieren el establecimiento de normas que garanticen tanto la fiabilidad de como la mantenibilidad de los mismos para sus prestaciones a lo largo del proceso productivo industrial.

Así, en el mundo competitivo de los negocios de hoy, las empresas agrícolas requieren mantener un enfoque centrado tanto en sus productos, como en sus procesos. Para ello, se necesita de una tecnología que aproveche al máximo el sistema, en este caso para [20] plantean que el microcontrolador de riego por goteo, hacen más eficientes los controles de los procesos de producción agrícola mediante los sistemas micro controlado de riego por goteo.

Con relación a este sistema partiendo de diversos autores, entre ellos [15], el control debe estar enmarcado dentro de un conjunto de mecanismos (tales como: estándares y medios para comparar el desempeño), los cuales aumentan las probabilidades de que las actividades que afectan los objetivos de la producción se lleven a cabo en forma apropiada. El control también permite detectar, así como notificar cuales actividades de los procesos no se están realizando.

Por ende, se tiene que un sistema micro controlado de riego por goteo dentro de la producción agrícola, y de acuerdo con [1], pasan a sustituir tareas tradicionalmente manuales realizadas de manera automática por máquinas, robots o cualquier otro tipo de automatismo. De esa forma, el sistema micro controlado de riego por goteo tiene ventajas muy evidentes en los procesos industriales en la agricultura, entre las que se pueden enunciar: 1) se mejora en costes, tanto en servicio, como en calidad, 2) el trabajo es más rápido, no necesitando de una cantidad determinada de operarios, que antes eran necesarios, entre otras.

En este sentido, el proceso del riego por goteo permite aplicar irrigación controlada y automatizada, mediante cálculos matemáticos en función de la humedad, el clima además de otras variables medidas

manejadas a base de datos, así mismo permite el control remoto de válvulas, bombas y otros dispositivos de campo. De las líneas anteriores, se desprende la idea de que el sistema micro controlado puede verse en términos de procedimientos, contenido, auditoría y responsabilidad, todos estos elementos enfocados hacia el manejo de los datos, así como de las variables.

Por lo tanto, el desarrollo de un eficiente control de los procesos aunado a un excelente sistema de información se plantea como necesario a sí mismo, no sólo en términos de costo/beneficio sino también en términos del valor que agregan a la producción agrícola. Por otra parte, debido a que por medio del crecimiento acelerado de la población. Se ha venido disminuyendo la calidad de vida de las personas, esto por la destrucción de los recursos naturales como el agua, bosques, entre otros recursos; los cuales son necesarios para el sustento diario de la sociedad en general.

Dicho aumento, igualmente ha traído como consecuencia la disminución de la proporción de tierras agrícolas dada la no incorporación de sistemas que optimicen los recursos hídricos y minimicen del desperdicio de los fertilizantes que al no ser dispensados de manera exacta pueden convertirse en elementos contaminantes del medio ambiente; con consecuencia graves en la producción agroalimentaria. También, con relación a los sistemas de tecnología agropecuaria se debe indicar que la tendencia mundial en el proceso del riego consiste en aplicar no solamente el riego tecnificado sino también el riego controlado y automatizado, de allí que se utilizan sistemas monitoreados por computadora, se desarrollan aplicativos para controlar además de observar el proceso de riego de los campos de cultivo, con el software de telecontrol, cuadros tanto de mando como de protección los cuales llevan a tener el control remoto de los elementos de campo como válvulas, compuertas, sensores entre otros.

Dentro de este software especializado de diseño de riego está el WCADI PRO que, de acuerdo con [17], permite realizar el riego mediante cálculos matemáticos en función a la humedad, al clima y otras variables medidas, manejados a base de datos, así mismo permite el control remoto de válvulas, bombas y otros dispositivos de campo.

Otro problema atribuible a lo ya mencionado, son los cambios climáticos los cuales se presentan por diferentes factores como la lluvia, luz solar, vientos, temperatura, entre otros; que podrían llegar a ser muy severos. Por lo que el verano ha venido provocando sequías, o el aumento de lluvias, causando inundaciones en tierras cultivables, trayendo como consecuencia grandes pérdidas en la producción. Además, se tiene que, al evaporar agua, la planta se refresca consiguiendo bajar su temperatura; siendo este grado de humedad en el aire, determinando así el grado de transpiración. Esto llevado por lo que, en un ambiente seco, las plantas deben incrementar la transpiración, absorbiendo esta mucha agua del suelo; asimismo, se desprende entonces que un ambiente muy húmedo, vendría a reducir la transpiración de las plantas, provocando sequía en muchos de los casos.

Asimismo, el viento o las corrientes de aire secan el agua de las hojas de la planta, obligando esto a una mayor transpiración, al igual a la temperatura elevada, evaporando el agua de la superficie de la planta con mayor velocidad. De allí, que la mayor cantidad de luz produce la obertura de las estomas por los cuales la planta expulsa más agua. Los altos niveles de humedad ambiental producen una reducción en la transpiración por lo que una planta no adaptada puede asfixiarse al aumentarse demasiado su temperatura.

Por otro lado, según [3], se encuentra que la producción de plántulas con el uso de sustratos bajo ambientes controlados ha sido una alternativa útil para cultivos de alta importancia como el ají, ya que ha permitido incrementar la productividad, además de obtener un producto de mejor calidad, el cual puede ser obtenido con un uso tanto más racional, como reducido de los insumos, trayendo como consecuencia, un menor daño ambiental así también los medios controlados de riego-fertilización permiten el aprovechamiento y minimización de desperdicios de fertilizantes con reducción de costos ya que se pueden realizar en ambientes controlados abiertos.

En este sentido, se debe indicar que, de acuerdo con la Organización Mundial de Agricultores OMA, ente adscrito a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, se llegó a

concluir que el negocio de las hortalizas es un gran generador de divisas; cuyo rubro debe explotarse en Latinoamérica para dar respuesta al compromiso global y a la comprensión de la relación entre nutrición y sistemas alimentarios.

Sobre esta perspectiva, Colombia como parte de los pueblos latinoamericanos, es considerada desde el [8] como una nación cuya actividad agrícola, caso del sector hortofrutícola es promisorio; donde el cultivo del ají presenta inmejorables condiciones para ser tenido en cuenta tanto por agricultores como exportadores nacionales. Pero, a pesar de las ventajas agrícolas de Colombia, existe rezago en la explotación de este rubro, esto expuesto por la Corporación Colombia Internacional CCI, al destacar dicha instancia que la producción del ají, siendo muy atractiva debido a que su tasa de crecimiento y su valor es superior al promedio de los demás; solo se llega a cultivar tan solo cinco especies de las 30 que incluye aproximadamente de la representatividad colombiana.

Lo anterior, queda sustentado con los resultados del Plan Nacional de Transformación Productiva del País desarrollado entre 2007 y 2014, donde la producción del ají solo llegó alcanzar tan solo un 3,8%; lo deja poca competitividad a Colombia, ya que la poca producción se traduce de acuerdo a los resultados del mencionado plan en bajos rendimientos tanto para el consumo que es de 45%; y rendimiento muy bajo en relación a los principales países competidores o referentes de la producción del ají que alcanza a un 65%.

Dicha baja productividad de este producto agrícola, de acuerdo a especialistas representantes del Programa de Formación Exportadora de Bogotá, al hecho de que el campesino al sembrar las semillas de ají, cuando éstas germinan, elige las mejores plantas para trasplantarla al campo, perdiéndose en diversas oportunidades algunas plantas; dado que la cantidad de agua suministrada no es regulable, como tampoco, la cantidad de fertilizante necesario, afectando éstos factores la cantidad de elementos de absorción.

A lo anterior se debe agregar, otro elemento climático como es el caso del fenómeno del niño que es un evento de naturaleza marina y atmosférica que consiste en un calentamiento anormal de las aguas superficiales en el pacífico tropical central y oriental; que de acuerdo a [5] ha identificado efectos perjudiciales a diferentes niveles en lo relacionado con la reducción de la oferta agrícola, a causa de las menores precipitaciones y de su impacto sobre la baja de producción de alimentos agrícolas.

Por otra parte, el Instituto de Hidrografía, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, señaló que uno de sus efectos de referido fenómeno es la reducción de las lluvias entre un 30% y 50% en la Costa Caribe y de entre 20% y 30% en la zona andina colombiana; y desde el punto de vista de la inflación, el más sobresaliente es el relacionado con la reducción de la oferta agrícola de productos dentro de estos el ají, a causa de las menores precipitaciones y de su impacto sobre los precios de los alimentos.

Otros problemas que causa la baja producción del ají, según [5] es que existe un desperdicio de insumos y además no se sabe con certeza la cantidad del componente aplicado, causando un alto costo en la aplicación de agua, de electricidad, así como también, de mano de obra en la asistencia de las plantas, aumentando los costos de producción, y por ende la cantidad de mano de obra, insumos, entre otros. Esto, hace importante implementar tanto en la infraestructura como en el proceso, medios automatizados que aseguren el buen manejo y uso seguro de los insumos agrícolas con el fin de preservar el medio ambiente al reducir desperdicios químicos como los fertilizantes y preservar con un mejor aprovechamiento del agua.

El uso de sistemas automatizados económicos como los micro controlados, llevaría a evitar el uso indiscriminado de estos productos químicos y de los recursos hídricos además de forma económica; de igual manera el ají es una de las hortalizas preferidas por todas las cadenas de almacenes o mercados de los vegetales en el país. En ese sentido, se tiene que la formulación de modelos controlados de riego permite predecir el comportamiento de diferentes variables que integran el agro sistema en la producción de plantas de cultivo de este producto básico del régimen alimenticio de la población nacional y a pesar de todo lo planteado no existen desarrollos de este tipo de tecnología de manera endógena.

En el mismo sentido, por las condiciones climáticas específicas de la región; y sus interacciones se requieren desarrollos de propuesta de sistema como el micro control de riego por goteo para la fertilización en cultivos

tan importantes como el de ají, motivado a las características del ambiente físico en Colombia, donde estas tecnologías de producción son relativamente nuevas, por lo que hay una gran necesidad de generarlas y donde el optimizar el uso del agua como también el de fertilizantes es evidente.

Al automatizar con micro control el proceso de fertilización y cultivo de ají, se consumiría el agua necesaria para las plantas, se le proporcionaría el fertilizante que las plantas que requieran, se disminuirá la mano de obra ya que el operador trabajaría de su zona de control, contribuyendo a la conservación de los recursos y las condiciones ambientales de los campos colombianos. Así, un sistema micro controlado de riego por goteo según [10] es el proceso que determinar a través de unos captadores de señales propiedades física alrededor de la planta para permitir suministrarle los recursos hídricos, fertilizante, humedad relativa, necesaria para alimentar de manera eficiente el cultivo de ají en la Finca Saradila en el Municipio Molino del Departamento La Guajira. De esta manera, tomando en consideración lo antes expuesto, se destacan los siguientes síntomas de la situación:

Existen limitaciones que enfrentan actualmente la fertilización para el cultivo de ají en la Finca Saradila, en el Municipio Molino del Departamento de la Guajira, Colombia, debido a la falta de los recursos hídricos y energéticos. Igualmente, hay restricciones como: expansión del área cultivada, riego insuficiente, deterioro del cultivar. También, uso restringido del suministro eléctrico como uno de los síntomas más destacado que afecta la producción.

Por otra parte, el agua destinada al riego agrícola no se utiliza con cuidado y sin derroches, considerando que este recurso es escaso en los valles pre-cordilleranos. Las situaciones antes descritas, podría estar causada por los siguientes factores: Las fincas dependen en gran medida de la extracción de agua subterránea para efectuar el riego de sus cultivos de ají, donde el gasto de energía utilizado para bombear agua desde el subsuelo se convierte en el principal punto de interés ya que incrementa los costos operativos de producción por tanto se requiere del control en su utilización en el riego.

También, se puede destacar que cualquier mejora en el uso del agua, repercute inmediatamente en la rentabilidad de los negocios, tanto por ahorro energético como por aumento del área cultivada, donde el clima lleva a una gran demanda hídrica de la atmósfera y una baja precipitación, llegando la utilización de sistemas de riego a cumplir una tarea importante para el desarrollo de los cultivos, esto debido a que el riego por goteo es un recurso tecnológico interesante a la hora de reducir el consumo de agua.

Asimismo, la inadecuada programación en la aplicación del riego y la cantidad de agua disponibles juegan un rol muy importante en base a cubrir las necesidades y requerimientos del cultivar, donde los procesos desarrollos e intentos por mejorar el riego y su aplicación, han sido orientados solamente a solucionar problemas tecnológicos de los sistemas de riego, dejando de lado el diseño de controladores remotos que operen el riego a malla cerrada, en base a la realimentación de información actual o pasada, como ser la humedad del suelo, variables climáticas u otras. De las evidencias anteriores se pronostica que, con un sistema de riego automático bien diseñado, en la Finca Saradila se podrá aplicar las dosis de agua necesaria logrando el adecuado crecimiento de los cultivos de ají.

Así, mediante el riego por goteo extensamente empleado en la fertilización para el cultivo de ají, se podría optimizar el consumo del agua, la cual en los actuales momentos está siendo muy racionada en el municipio Molino; debido a las bajas precipitaciones que se han registrados en la zona; que de acuerdo al IDEAM en el año 2015 han bajados en un 85% en la citada región, así por la poca pluviometría se hace imprescindible que el agua destinada al riego agrícola, en la Finca Saradila se utilice con cuidado y sin derroches, considerando que este recurso es escaso.

Todo ello, al hacer un uso racional de un recurso vital y escaso, como lo es el agua, tendrá evidentes ventajas desde la óptica ambiental y social, de allí surge la necesidad de lograr el uso eficiente del agua, lo que se traduce en regar solamente lo que la planta requiere reduciendo o eliminando las pérdidas que se puede lograr con la implementación en campo del sistema diseñado mediante la aplicación de diferentes tratamientos de riego, se podría favorecer el ahorro de agua al momento de cumplir tales procedimientos. Pero para controlar el pronóstico citado en el párrafo anterior se requiere un continuo monitoreo de los

niveles de humedad en el suelo, el seguimiento del estado hídrico del cultivo y la eficiente programación del riego, son acciones que los agricultores deben poner en práctica, a fin de programar en línea los periodos de riego y dosis de agua necesarios. Así, como un desarrollo tecnológico, en los sistemas de riego por goteo, podría permitir en gran medida mejorar el uso de recursos hídricos y sin embargo no se cuenta con uno.

Lo anterior, pudiera ser efectivo a partir de las aplicaciones locales de sistemas micro-controlados, pudiéndose a la vez lograr la disminución de las pérdidas por evaporación superficial, e incluso permitiría la fertilización adecuada, al confiar en que los avances tecnológicos enfocados particularmente en mejorar la eficiencia de los terminales de riego (emisores, aspersores, goteros, difusores) y en los materiales empleados en la instalación del sistema de riego (cañerías, filtros, bombas, fertirrigación).

En este sentido, se considera pertinente realizar una investigación que busque proponer un sistema micro controlado de riego por goteo para producción de plántulas de cultivo de ají, puesto que un sistema de riego por goteo presenta las características necesarias y al ser desarrollado con micro control además posee un bajo costo de implementación y sin embargo se desaprovecha este tipo de sistemas de allí que se consideró interesante realizar la siguiente formulación del problema.

2. MÉTODO

En toda investigación según [19] Las técnicas, se derivarán de los métodos científicos que se consideran de la investigación. Representa las etapas operacionales limitadas, unidas a unos elementos prácticos, concretos, adaptados a un fin definido. También, las técnicas de recolección de datos están definidas por [2] como las distintas formas y medio utilizados por el investigador para recopila la información necesaria a fin de realizar el trabajo.

También las definen como las herramientas o medios que se emplean para obtener y registrar los datos. Por su parte, [13] señalan que las técnicas de recolección de datos es una etapa que consiste en recolectar datos pertinentes sobre los atributos, conceptos, cualidades o variables de los casos, sucesos, comunidades u objetos involucrados en la investigación.

En este sentido, para recoger la información se hace necesario hacer uso de una técnica específica, esto porque de acuerdo con [16] permiten la recolección de los datos ya que son las distintas formas o maneras de obtener la información. De igual manera, según [14] esta tiene que ver con los procedimientos utilizados para la recolección de los datos, es decir el cómo, y pueden ser de revisión documental, observación, encuesta y técnica socio-métrica.

Partiendo de lo referido, se utilizará en primer lugar por tratarse de una investigación descriptiva con bases en la revisión de documentos se hizo uso de la técnica del sistema Fólder que, de acuerdo con [16], dicho sistema permite recabar la información en hojas sueltas, las cuales se agregan en una carpeta con ganchos o anillos, y se estructuran en base al esquema de contenido.

También se aplicará la técnica de la observación que para [2] la observación es una técnica que se puede aplicar tanto a documentos como ambientes o contextos específicos. En este sentido, la técnica de observación directa, la cual como establece [4] es una técnica que conecta al investigador con la realidad, es decir, al sujeto con el objeto o problema.

Los instrumentos de investigación son definidos por [12] como aquellos para registrar datos observables que representan verdaderamente los conceptos o las variables que el investigador tiene en mente. En términos cuantitativos captura la realidad que se desea capturar. Así, un instrumento de investigación es el medio que lleva a la obtención de los datos necesarios para poder evaluar las características de un hecho o realidad.

También [2] considera que el instrumento es un recurso material que se emplea para recoger datos, y de los cuales existen diversos modelos, entre estos la entrevista no estructurada como uno de los instrumentos

más utilizados cuando de investigación en la investigación También, el autor considera que los instrumentos son un recurso, dispositivo o formato (papel o digital) que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información. Por tal motivo el presente estudio se vale de instrumentos como la ficha bibliográfica y ficha resumen dado que se realizarán revisiones teóricas para la recolección de datos.

Dicha técnica es necesaria, ya que se debe palpar directamente para formarse una idea precisa y amplia del problema en la búsqueda de los datos que se necesitan para resolverlo; y se recurre a la misma por el carácter de campo que tiene el estudio de realizar la observación directa de la finca Saradila en el Municipio Molino del Departamento La Guajira de Colombia; a fin de obtener los datos característicos de la misma.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se presenta los aspectos automáticos del sistema, comenzando por el plano de instrumentos que se tomará en cuenta para los diversos elementos que compondrán este novedoso riego por goteo. Entre los elementos se mencionan: sensores, Actuadores y Controladores PIC que tendrán la función de establecer las bases de un automatismo dentro de la finca objeto de estudio. A continuación, en la Figura 1 se presenta un diagrama esquemático con el sistema propuesto de riego por goteo:

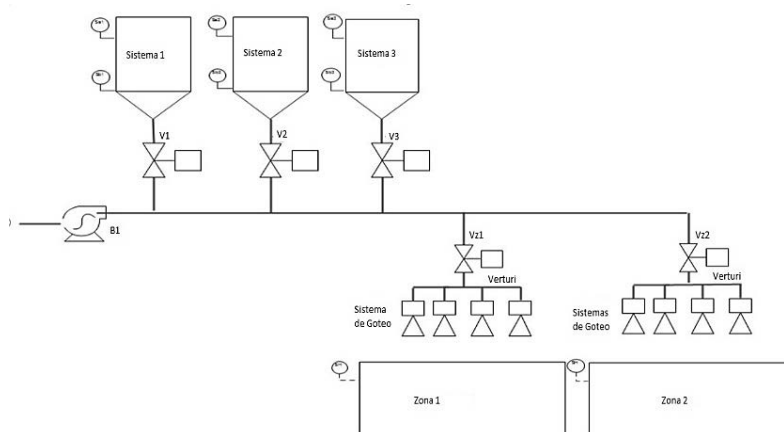


Figura 1. Esquemático del sistema automático de riego por goteo

El plano de instrumentación que se presentó da la visión del sistema instalado el mismo está conformado por tres tanques que contienen los fertilizantes cada uno de estos tanques está conectado a sensores de alto o bajo (SA1 sensor alto uno y SB1 sensor bajo uno), nivel para garantizar que el sistema tenga fertilizante en todo momento. Por otra parte, en la salida de cada tanque se tienen válvulas eléctricas que activan según lo requerido por el operador, al estar activas una de esta válvula el fertilizante llega a la línea principal de riego que es alimentada con agua e impulsada por una bomba

Estas dos, últimos son las válvulas de zona uno y dos (VZ1-VZ2), que restringen el flujo de agua a cada uno de las zonas; los aspersores son símbolos para hacer mención al riego por goteo; por último, la zona 1 o 2 poseen sensores de humedad que emiten una señal eléctrica al controlador que decide cuanto es el momento idóneo para aplicar el riego a cualquiera de las zonas que lo amerite. Una vez caracterizado el sistema automático, se muestra en la Figura 2, un diagrama general de proceso por el cual se regirá el circuito automático de programación respectivamente.

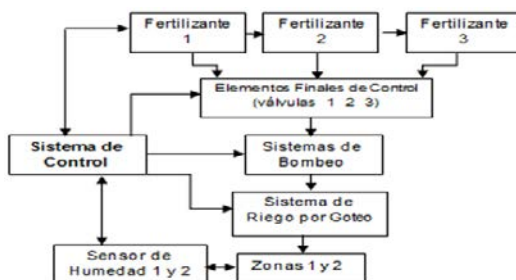


Figura 2. Diagrama Esquemático general del proceso de riego por goteo y fertilización

El diagrama general del proceso muestra como es el funcionamiento en bloque de todo el sistema, se observa como el sistema de control es quien regula todo el proceso con la información. Este sistema siembre se ve censando el estado de los tanques de fertilización y los estados de los tanques fertilizante toma de decisiones sobre los elementos finales de control (válvulas de cada tanque Fertilizantes); Así mismo, este sistema está ligado al riego de la zona uno o dos más el sistema de riego por goteo es totalmente independiente, es decir se puede hacer un riego por goteo, pero no necesariamente deberá estar el proceso de fertilización activo.

3.1 Programación del sistema micro controlado de riego por goteo

Todo proceso de control posee un sinnfín de etapas que al hacer un compendio de las mismas se genera la automatización y en control, el diagrama de flujo es una herramienta que permite visualizar muy detalladamente cada parte que se debe codificar en un lenguaje de programación requerido por el sistema a controlar, por tal razón se muestra a continuación el diagrama de flujo de la presente investigación en el cual se detallaran las rutinas y Sub rutinas para vaciar en el Software Proteus® esta codificación necesaria para el establecimiento del sistema automatizado y micro controlado de riego por goteo y fertilización en esta comunidad norteña del municipio la guajira en Colombia, visualizado de la Figura 3.

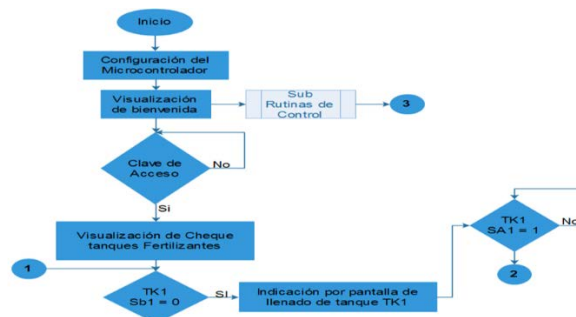


Figura 3. Rutinas principales de programación del sistema de control de riego por goteo y fertilización

Inicialmente se hacen todas las configuraciones pertinentes al microcontrolador: configuración de puertos, registros de propósito general, interrupciones, declaración de librerías entre otros aspectos, para continuar con la visualización por pantalla LCD, de mensaje de bienvenida como la solicitud de clave para dar ingreso al sistema automatizado de riego por goteo, (existe un campo de sub-Rutina de control que será abordado posteriormente)

Luego de permitir el acceso al sistema se procede a chequear el estado de nivel de los tanques de fertilización uno, dos y tres, en dado caso que alguno de los tanques posea niveles bajo será avisando por pantalla la necesidad de llenar el tanque específico (Figuras 4 y 5). Es importante mencionar que si ninguno de los tanques está por debajo del nivel bajo o este ya está en nivel alto se procederá a enlazare con el flujo de diagrama dos.

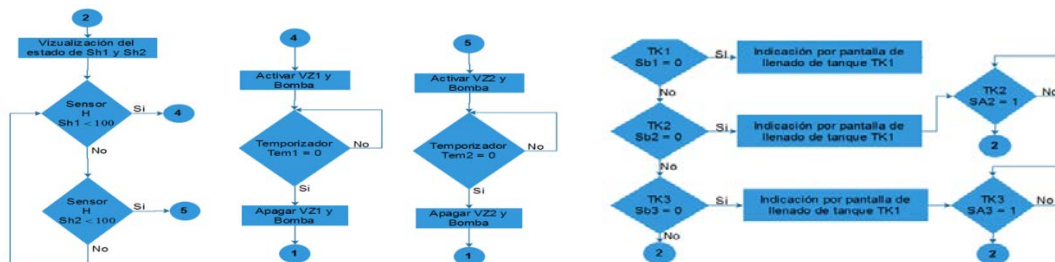


Figura 4. Diagrama de Programación de las Sub rutinas número 1 del sistema

El flujo de programa dos consta de la rutina principal del programa el cual se enfoca en comprobar en todo momento los estados de humedad de la zona uno así como la zona dos, con la finalidad de garantizar la misma en cada una de las zonas; por tal razón si existe baja humedad en la zona uno el flujo de la lógica se desvía al flujo de control cuatro donde este procede activar la bomba que transporta el agua adicionalmente activa la válvula VZ1 que es la válvula encargada de restringir el agua a la zona 1.

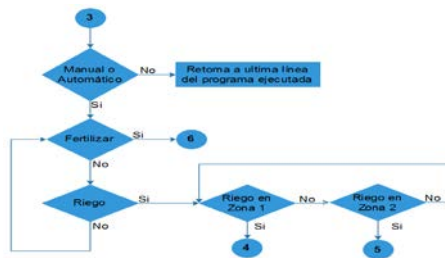


Figura 5. Diagrama de Programación de las Sub rutinas número 1 del sistema

En la Figura 6, una vez culminada la rutina anterior, se procede a esperar un tiempo prudencial para que se pueda regar toda la zona uno, finalizado el tiempo del temporizador 1 se apaga tanto válvula como bomba y se retornar al flujo de programa uno. Para el flujo de programa cinco cumple exactamente la misma función que el flujo cuatro la única diferencia es que la activación es para la válvula de la zona 2 VZ2.

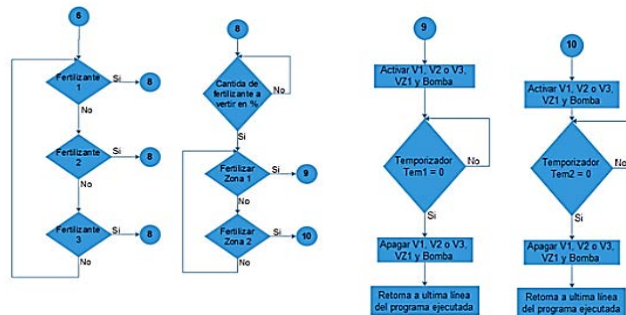


Figura 6. Programación de las Sub rutinas número 3 del sistema

El flujo de control 6 se procede a elegir con que fertilizante se requiere trabajar, fertilizante uno, fertilizante dos o fertilizante tres, posteriormente se le pregunta al operador que porcentaje de fertilizante se surtirá en la red de riego finalmente a que zona se va aplicar el fertilizante si será a zona uno o zona dos, finalmente se activara la bomba, la válvula de la zona uno o la zona dos y la válvula del fertilizante seleccionado, de esta manera es la lógica de trabajo del sistema.

3.2 Programación del microcontrolador PIC 16f877

Los Microcontroladores son pocos flexibles en cuanto a leguajes de programa se refiere ya que son cerrados a escasamente tres o cuatro tipos de lenguaje, el más usado en casi la totalidad de los PIC sería el lenguaje assembler, hoy en día el uso de lenguaje C es relativamente nuevo sin embargo es de poco usos si bien es sabido que la sintaxis es más entendible por su comodidad en los comando de programación posee la gran desventaja que utiliza mucho de los recurso de memoria del microcontrolador es por ello que para la presente investigación se utilizó como lenguaje de programación el *assembler*. La lógica indicada en el diagrama de flujo es traducida con una serie de comandos para la configuración, así como el correcto funcionamiento de las entradas y salidas. A continuación, se presenta el diagrama circuital diseñado en la herramienta proteus (Figura 7), para su validación en la siguiente fase.

El diagrama del circuito está constituido principalmente con un micro controlador PIC 16F877, que se encarga de controlar todo el sistema, tanto entradas como salidas, también es apreciable un teclado y pantalla LCD, opto-acopladores, potenciómetros, diodos Leds, resistencias. En la Tabla 1 se especifican las entradas y salidas de datos.

Tabla 1. Entradas y salidas del Microcontrolador PIC 16F877

Entrada	Definición	Puerto	Salida	Puerto	Definición
SH1	Sensor de Humedad 1	RA0	V1	D0	Válvula de Fertilizante 1
SH2	Sensor de Humedad 2	RA1	V2	D1	Válvula de Fertilizante 2
RA4	Pulsador	RA4	V3	D2	Válvula de Fertilizante 3
SA1	Sensor Alto1	C0	VZ1	D3	Válvula de la Zona 1
SB1	Sensor Bajo 1	C1	VZ2	D4	Válvula de la Zona 2

SA2	Sensor Alto 2	C2	Bomba	C6	Bomba General
SB2	Sensor Bajo 2	C3	Pantalla	Puerto B	Visualizador de Mensajes
SA3	Sensor Alto 3	C4	RS	RE0	Control de la Pantalla
SB3	Sensor Bajo 3	C5	RE	RE2	Control de la Pantalla
Teclado	Ingreso de datos	Puerto B	Alarma	C7	Alarma

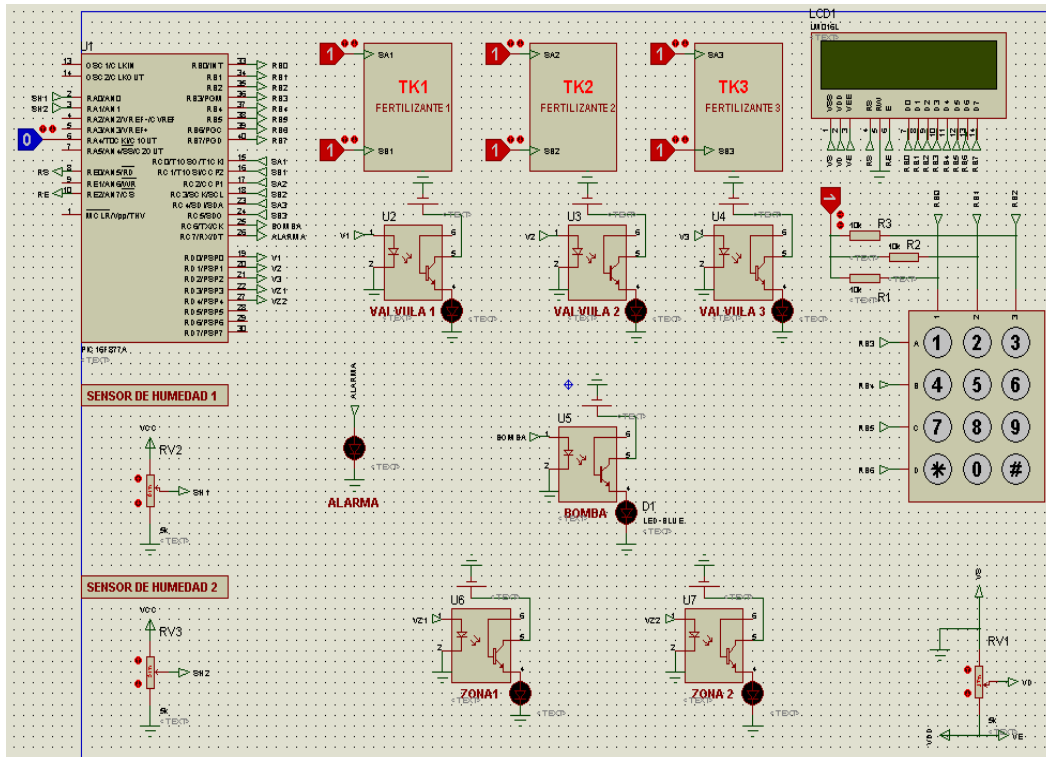


Figura 7. Diagrama General del Circuito del sistema

En la Figura 7 se representó el diagrama lógico circuital, se puede apreciar que el microcontrolador PIC 16F877 el cual es el encargado de procesar todos los datos de entradas y salidas del sistema, la lógica de programación está basada en el diagrama de flujo desqueto anteriormente, junto con el micro controlado apreciamos dos potenciómetros de 5 kilo ohmios conectado un estrenó a tierra así como otro a la alimentación esta configuración crea un simulador de entrada analógica (Figura 8), en este caso particular simulara al sensor de humedad uno y dos vitales para la toma de decisiones en cuanto a sistema de riego se refiere.

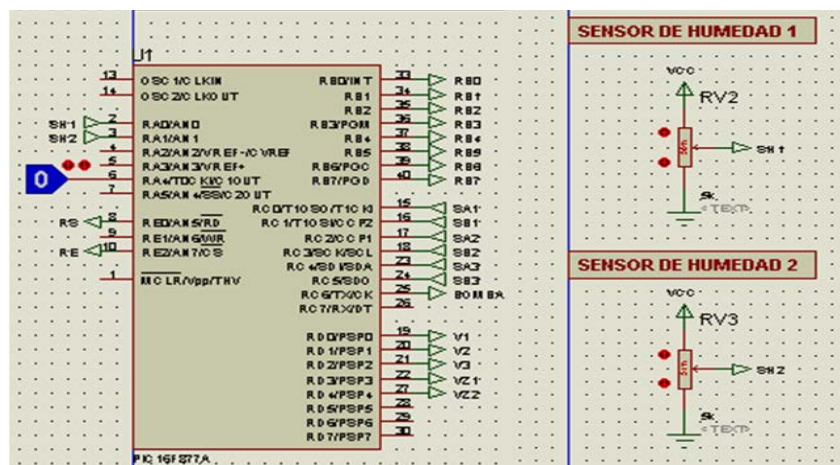


Figura 8. Sistema de control y sensores de humedad

En la Figura 9 se aprecian tres tanques en cada uno de estos existe dos señales que van al controlador con la finalidad de tomar decisiones cuando cualquiera de los tanques este en alto o bajo nivel, seguidamente se tiene una serie de opto-copladores que activan diversas señales; estos optcos son usados para proteger al microcontrolador de corrientes parasitas o voltajes altos, también conforman la etapa de potencia.

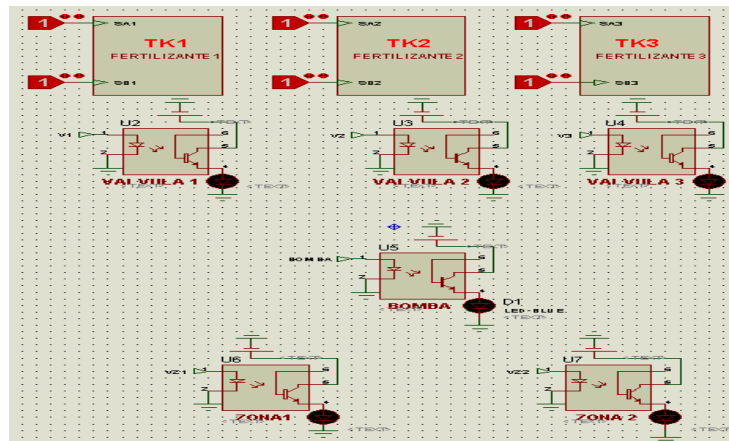


Figura 9. Etapa de potencia y censado de nivel

La última imagen del circuito consta de los periféricos más usados por el usuario el cual son pantalla y teclado, cada evento relacionado a todos los procesos del sistema son visualizados por la pantalla LCD, adicionalmente interactúa con el operador para la toma de decisiones al darle una serie de opciones al operador al momento de fertilizar o realizar un riego, el teclado a su vez permite que el usuario ingrese datos al micro controlador necesarios para la ejecución de las selecciones del sistema, como se aprecia en la Figura 10. Finalmente, se aprecia un potenciómetro que ayuda al funcionamiento de la pantalla LCD.

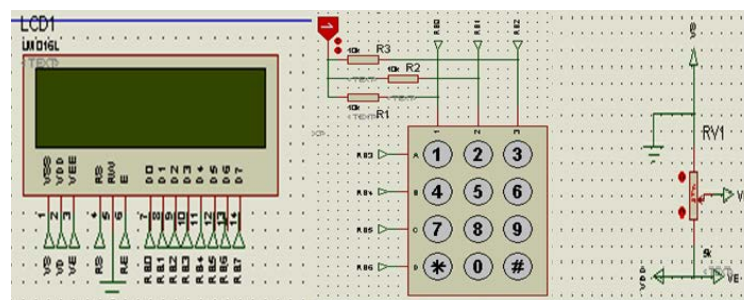


Figura 10. Interfaz Humano-Maquina HMI del sistema de riego por goteo y fertilización

Todo el sistema trabaja de manera integrada cada parte del mismo es vital para que este operativo todo el sistema, para todo sistema de riego por goteo es vital el censado de la humedad, se deberá garantizar que el sembrado de ají dulce, tengas las condiciones óptimas, por ende, uno de los dispositivos más utilizados serán los sensores de humedad. Adicional a esto el diseño existente en la Finca Saradila en el Municipio Molino del Departamento La Guajira de Colombia del sistema hidráulico permitirá una versatilidad a la hora de instalar el sistema propuesto como alternativa sostenible al ahorro del vital líquido, al aumento en la productividad de ají, entre muchas otras ventajas que contiene este diseño automático.

3.3 Validación del sistema micro controlado

Para la validación del sistema se necesitó de un software de simulación donde se lograra reflejar cada etapa descrita en el diagrama de flujo pero desde el punto de vista práctico inicialmente se el sistema de control refleja por la pantalla LCD una serie de mensajes (Figura 11), donde el primero es el nombre del sistema, el segundo será la solicitud de clave con la única intención de que este proceso sea puesto en marcha por el operador del equipo y no por cualquier personal, de no poseer la clave del sistema se emitiría un mensaje negado el acceso al mismo, el sistema solo avanzara cuando la clave sea la correcta.



Figura 11. Mensajes de inicio al sistema

Cuando el operador del sistema ingresa la clave correcta el primer reconocimiento del sistema es a los tanque que contienen los fertilizante, si alguno de estos está por debajo del nivel bajo se emitirá un mensaje por pantalla, adicionalmente se activara una alarma indicando la falta de fertilizante, cabe destacar que el mensaje en la pantalla indica el fertilizante exacto faltante y la alamar es de tipo sonora para que el operador se acerque al panel a revisar el sistema, como se muestra en la Figura 12.

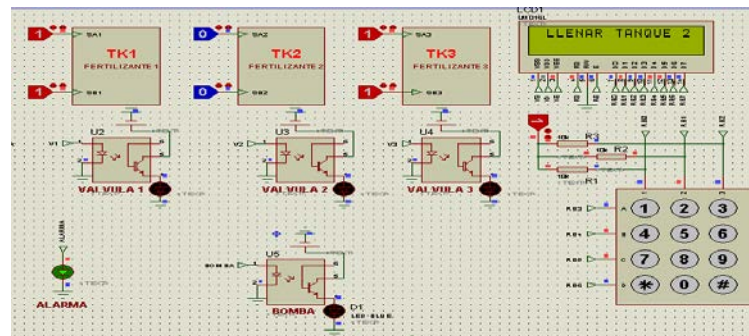


Figura 12. Sistema de llenado de tanque

Cuando el sistema percibe que el tanque de fertilizante está en nivel óptimo (Figura 13), apaga la alarma y refleja por pantalla que el tanque está lleno, posteriormente se realizara el chequeo de la humedad en la zona uno y dos, esta operación conforma la rutina principal del programa es decir chequear tanques fertilizantes y humedad en las dos zonas, cuando el nivel de humedad es inferior a 500 (que en equivalencia con un sensor real de humedad serian 50), se activa el proceso de riego por goteo por espacio prudencial para que el suelo se logre hidratar correctamente.

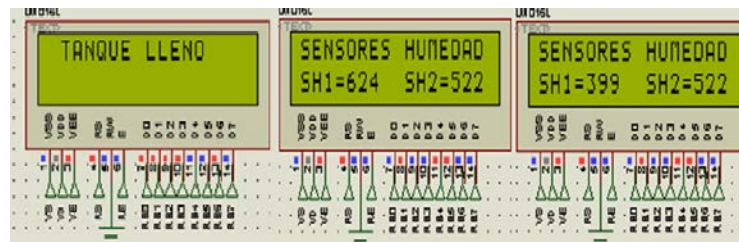


Figura 13. Llenado de tanque y chequeo de humedad en zona 1 y zona 2

En la Figura 13 se puede notar como el sensor de humedad de la zona uno está por debajo del límite permitido (ver figura anterior), por tal razón aparecerá por pantalla LCD la indicación de activación de riego en la zona uno, así como la bomba y válvula de la zona unos están activas. Esta condición sería similar si el sensor de humedad de la zona dos estaría por debajo de los límites permitidos, a continuación, se presenta la Figura 14, que representa el sistema de riego activo de la zona 1.

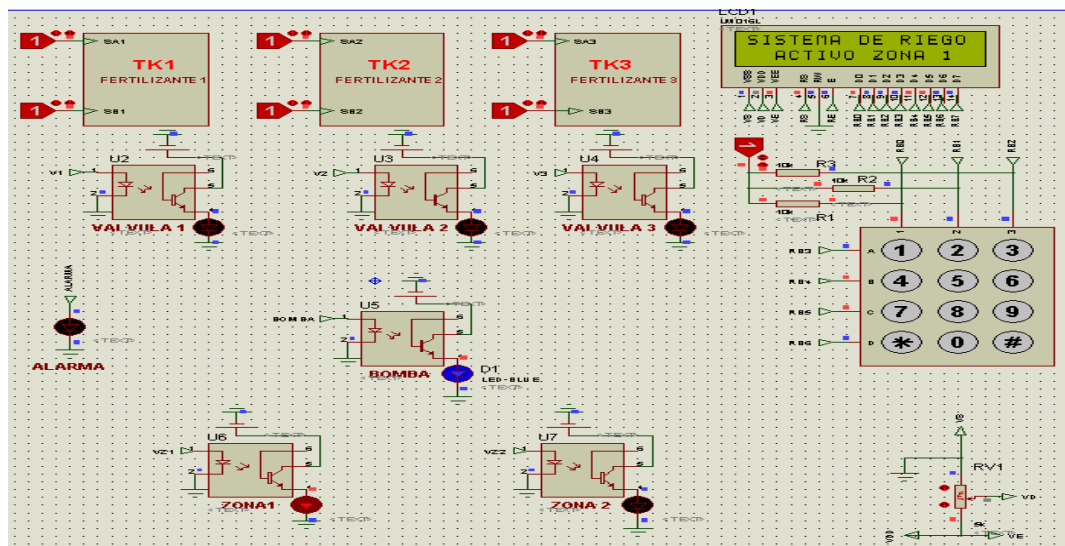


Figura 14. Sistema de riego activo en zona 1

Las explicaciones anteriores estaban enfocadas a la rutina principal del Micro controlador PIC 16F877, de la misma manera se realizaron una serie de descripciones a cada etapa de la rutina principal del software de simulación para dar el mayor entendimiento al proceso sin embargo la etapa de fertilización corresponde a un evento explicar como lo son las interrupciones. Para el presente control (Figura 15), se realiza una interrupción presionando un push Button el cual está situado en RA4 el cual a su vez genera el desbordamiento del TMR0, esto crea una serie de condiciones que permitirán fertilizar o activar el sistema de riego. Al solicitar la interrupción se observa como automáticamente la pantalla LCD requiere de una toma de decisiones para poder seguir avanzado, el operador deberá de elegir con el teclado entre fertilizar o activar el sistema de riego.

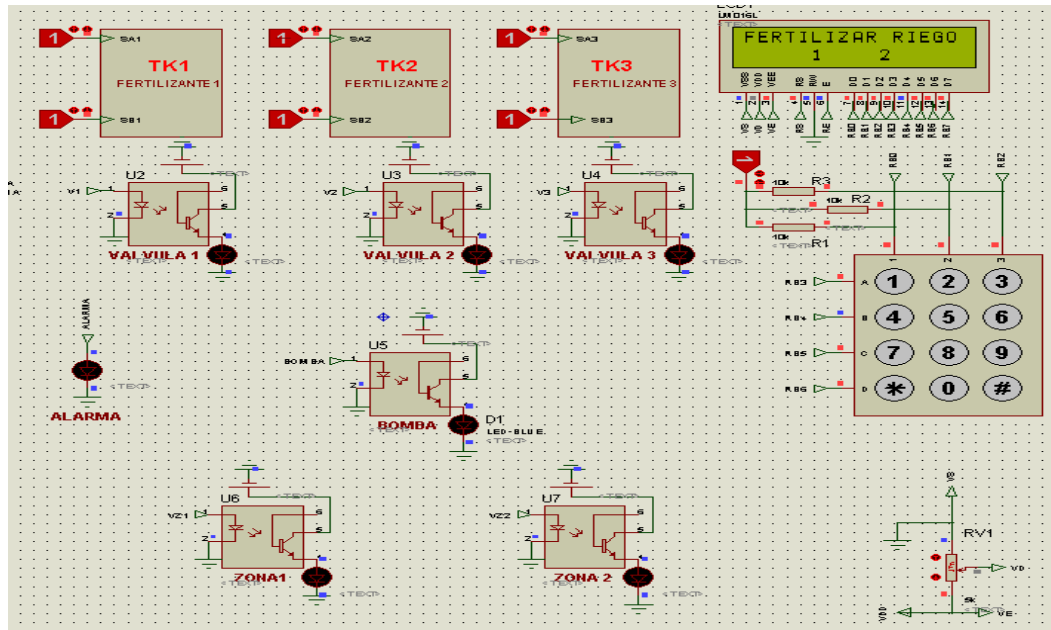


Figura 15. Solicitud de Interrupción vía RA4

Por otra parte, si la opción escogida es fertilizar (Figura 16), surge una serie de preguntas para selección del tipo de fertilizante a usar, el porcentaje que este tendrá y en qué zona se aplicará la fertilización, cabe destacar que las condiciones ofrecidas son manipuladas exclusivamente por el operador del sistema, la pantalla LCD ayuda al usuario a la toma de decisiones que las transmitirá al microcontrolador vía teclado alfanumérico.



Figura 16. Solicitud de fertilización

Cuando los datos solicitados por el sistema son ingresados la pantalla LCD envía un mensaje alegórico a la zona que se está fertilizando, adicionalmente en la Figura 17 se aprecia cómo se activan las diferentes etapas de potencia, lo cual sería válvula del fertilizante escogido (para el ejemplo se tomó a fertilizante dos), bomba de activación de riego por goteo, ya que la fertilización no es más que la activación del riego pero combinado con alguno de los fertilizantes así como la activación de la válvula según la zona elegida, para este caso objeto de estudio sería la zona dos respectivamente.

Si el operador de la finca necesita hacer un riego preventivo evadiendo las señales indicadas por los sensores de humedad puede elegir la opción de riego a su vez deberá elegir la zona donde desea aplicar el riego, para el ejemplo se aprecia la opción de riego en zona uno, se nota la activación de la bomba y la válvula de la zona uno. Partiendo de lo anterior, a continuación, (Figura 18) se presenta el proceso de riego activo en la zona 1 respectivamente para la comprobación de los estados.

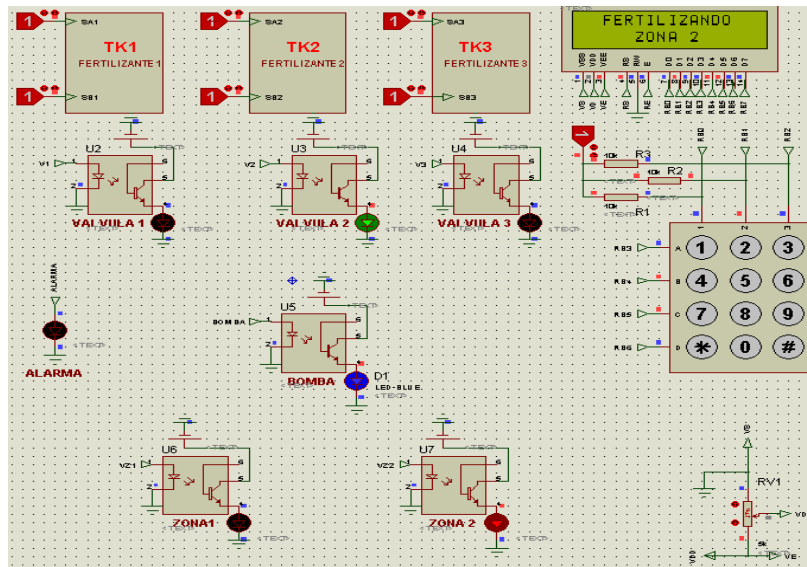


Figura 17. Proceso de fertilización

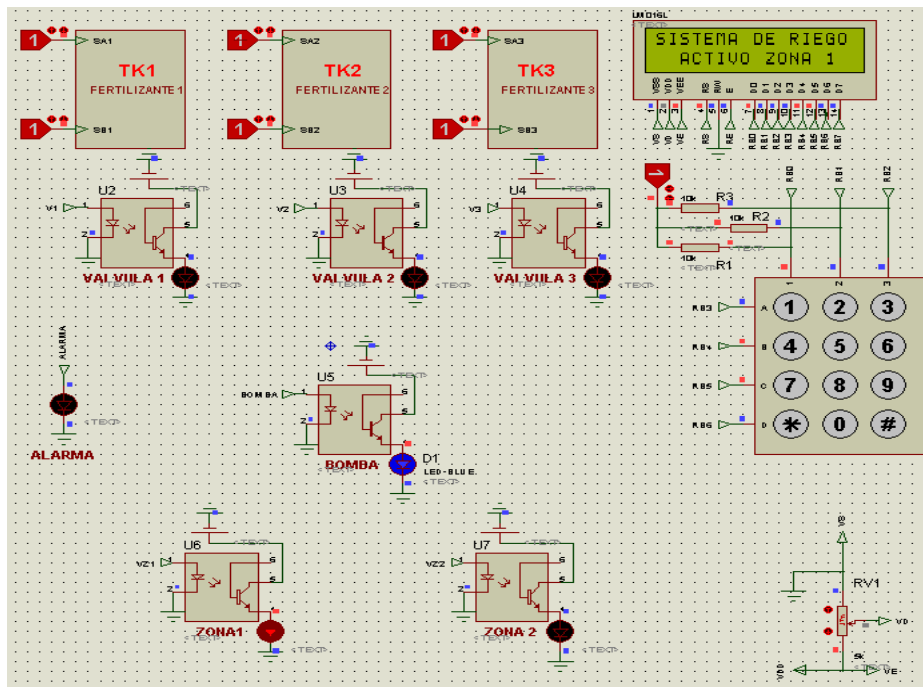


Figura 18. Proceso de riego en zona 1

4. CONCLUSIONES

De esta manera se está ejecutando todas las secuencias de control en el sistema de riego por goteo, la simulación refleja cada etapa del proceso, a su vez hay una concordancia con el diagrama de flujo, el cual fue llevado a lenguaje *assembler* para programar el microcontrolador, es de notar la clara intervención del usuario para con el equipo en la toma de decisión tanto en las conclusiones como recomendación se hablara a profundidad la razones por las cuales el sistema está diseñado de esa manera.

Se tiene que el plano de instrumentación es una propuesta que optimiza la actual configuración, por parte del diagrama general del proceso se plantea una posible solución óptima de cómo controlar el proceso también se apreció que el diagrama de flujo aplicado en el circuito electrónico está enfocado a controlar todo el proceso con solo un usuario que esté capacitado para manejar el sistema.

Finalmente, la simulación del sistema micro controlado de riego y fertilización por goteo para el cultivo de ají en la Finca Saradila, mostró claramente como un Microcontrolador es capaz de automatizar un proceso de tal manera que se obtengan los mejores beneficios en pro de solventar la problemática

REFERENCIAS

- [1] R. A. Allen; J. P. Pereira y C. A. Raes. "De la Diversidad a la Unidad en la Investigación Cualitativa". Valencia, Venezuela. Editorial Vadell Hermanos, 2008.
- [2] M. A. Arias. "El Proyecto de Investigación. Guía para su Elaboración". Editorial Epiferre. Venezuela, 2006.
- [3] G. A. Bracho. "Control Automático para un Bombeo de Agua Fría". Universidad Autónoma de Occidente Colombia, 2005.
- [4] J. E. Bavaresco. "Introducción a la Investigación Educativa". Caracas, 2006
- [5] K. A. Caicedo. "Automatización de un sistema de control de flujo para la transferencia de producto vinícola hacia envasado". Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín, Maracaibo, Venezuela, 2015.
- [6] H. A. Clement y Galand. "Automatización de Procesos Agrícolas". Editorial Prentice Hall. México, 2009.
- [7] FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012. Recuperado: <http://www.fao.org/about/es/>
- [8] E. A. Fernández y R. S. López. "Operación y Mantenimiento de los Sistemas de Riego". Instituto Internacional de Recuperación y Mejora Técnicas de Tierras, 2012
- [9] E. A. Fernández y J. E. Camacho. "Introducción al Riego y Siembra". Editorial Marcombo, España, 2008.
- [10] A. F. Gómez. "Diccionario de la Investigación Científica". Editorial Limusa. México, 2009.
- [11] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista. "Metodología de la Investigación". México McGraw-Hill, 2010.
- [12] J. Hurtado Barrera. "Metodología de la Investigación, una Comprensión Holística". Caracas, 2007.
- [13] Klir. "Instrumentación 1", Universidad de Guadalajara, 2005.
- [14] M. Méndez. "Metodología Formal de la Investigación Científica". Editorial Limusa. México, 2008.
- [15] E. M. Millán. "Microcontroladores PIC. Sistema Integrado para el Aprendizaje". Marcombo, España, 2006.
- [16] Ogata. "Ingeniería de Control Moderna". Editorial Prentice Hall, México, DF, 2006.
- [17] A. A. Ramírez. "Automatización y Telecontrol de Sistemas de Riego". Marcombo, España, 2015.
- [18] A. Ruiz y J. M. Molina. "Automatización y Telecontrol de Sistemas de Riego". Marcombo, España, 2010.
- [19] Soutter. "Introducción a la Agricultura de Precisión". Editorial Prentice Hall, México, 2007.

Creación de una herramienta de software libre para aplicación en el campo de los sistemas eléctricos de potencia

Alonso de Jesús Retamoso LLamas¹

Verena de Jesús Mercado Polo²

Lizeth Dayane Cortés Hernández³

Unidades Tecnológicas de Santander
Colombia

La simulación del flujo de potencia ha demostrado ser una herramienta valiosa en la enseñanza de los fundamentos del diseño de sistemas eléctricos de potencia. Sin embargo, los paquetes comerciales son difíciles de utilizar debido a su alto costo, complejidad y restricciones de tipo legal. En este documento se presenta una herramienta de software libre para aplicación en el campo de los sistemas eléctricos de potencia, con el objetivo de abordar la simulación de flujos de carga a través de herramientas computacionales de software libre, tales como: Ngspice, Python y Ngspyce. Los resultados de este trabajo les permitirán a los estudiantes y profesores de los programas de ingeniería eléctrica, tener una herramienta computacional de fácil acceso y uso en el desarrollo de su aprendizaje en el campo de los sistemas eléctricos de potencia.

¹ Ingeniero Electricista y Magíster en Potencia Eléctrica. Profesor-investigador del grupo GIE.

Contacto: alonsoretamoso@correo.uts.edu.co

² Ingeniera Electricista, Especialización y Maestría en Automatización e Informática Industrial. Profesora-investigadora del grupo GIE.

Contacto: verenadejesus@correo.uts.edu.co

³ Ingeniera Electrónica y Magíster en Ingeniería Electrónica. Profesora-investigadora del grupo GIE.

Contacto: lizethcortes@correo.uts.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis SPICE es un simulador de electrónica analógica de propósito general desarrollado en los años 70 en la Universidad de California, Berkeley por Laurence Nagel y otros [1]. Este software se utiliza para revisar la integridad, predecir el funcionamiento y diseñar circuitos integrados de gran escala.

Las primeras versiones comerciales aparecieron en los años 80 entre las cuales se cuenta con: PSPICE desarrollado por CADENCE Design Systems y HSPICE cuya propiedad le pertenece a Synopsis. A pesar del extendido uso del software comercial, también se cuenta con versiones de código abierto desarrolladas en su gran mayoría por el mundo académico y público en general entre las cuales están: XSPICE [2], NGSPICE [3], LTSpice y TinySpice [4].

Ngspice es un simulador de circuitos integrados de código abierto cuya base es la versión SPICE3F5. En esta herramienta se realizan análisis de estado estable, de frecuencia y transitorio. Además, incluye un pequeño lenguaje de programación (script) en el cual se elaboran procesos de simulación altamente complejos [3].

Python es un lenguaje de programación de alto nivel orientado a objetos y semántica dinámica. Fue creado por Guido Von Rossum. Este lenguaje tiene las siguientes características: fácil uso, código abierto y especialmente fácil de leer como un lenguaje natural. Dentro de las aplicaciones más importantes desarrolladas en Python se encuentran las siguientes: desarrollo web e internet (Django), juegos (Battlefield), educación, interfaces gráficas de usuario (Wxwidgets) y computación numérica y científica (sciPy).

La librería Ngspyce es el enlace de comunicación entre el software de simulación ngspice y el lenguaje programación Python. Esta librería de software realiza el control de ngspice a través de una aplicación externa creada con el lenguaje de programación Python. El análisis de flujo potencia de una red interconectada se basa en ecuaciones no lineales de potencia real y reactiva, las cuales se solucionan a través de métodos numéricos iterativos como el algoritmo Newton-Raphson, para obtener la magnitud del voltaje y el ángulo de fase de cada barra (nodo) que compone un sistema eléctrico de potencia [5].

Esta forma de solucionar el problema del flujo de potencia ha sido el principal cuello de botella para que programas de simulación, bien establecidos en la industria electrónica como lo es Spice, puedan llevar a cabo una solución de estado estable del mismo 5. Para resolver la incompatibilidad entre el algoritmo de flujo de potencia y el algoritmo de Spice, se emplea una técnica en la que se utilizan las componentes real e imaginaria de los voltajes y las corrientes como las variables de estado en lugar de la magnitud del voltaje y el ángulo de fase del algoritmo tradicional [5].

Con este trabajo se pretende dar la cuota inicial, para lograr un software de libre uso y código libre que le permita tanto a estudiantes como profesores de una facultad de ingeniería eléctrica, llevar a cabo las tareas de diseño y nuevas aplicaciones en el campo de los sistemas eléctricos de potencia.

2. MÉTODO

Para el desarrollo de este trabajo se usa la adaptación de la metodología design thinking. Esta metodología es usada para desarrollar trabajos de investigación e implementación en diferentes áreas, en [6] se propone una secuencia de tres pasos como se muestra en la Figura 1.

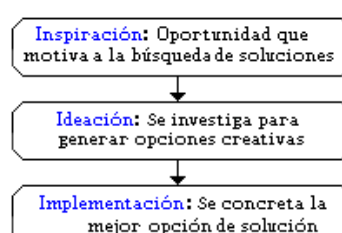


Figura 1. Actividades para la metodología *design thinking* [6]

La inspiración para la realización de este trabajo se generó en las jornadas del semillero de Alternativas de Generación de Energía AGE de las Unidades Tecnológicas de Santander, en el desarrollo de la charla *Simuladores en software libre: aplicaciones en los sistemas eléctricos*. Este trabajo surgió a través de una pregunta realizada por un estudiante sobre el aprovechamiento de las ventajas del software libre en los sistemas eléctricos de potencia.

Con esta inquietud se inició la idea de combinar el Ngspice y Python para la creación de un software que le permita al programa de ingeniería eléctrica el desarrollo de aplicaciones propias con base en el software de código abierto. La implementación se realiza combinando los algoritmos de flujo de potencia tradicionales con el algoritmo de solución de circuitos ejecutado en Spice, utilizando la técnica de voltajes y corrientes en su forma compleja como variables de estado final.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Definición del problema del flujo de potencia

El flujo de potencia se define como el cálculo de los voltajes y posteriormente de los flujos de potencia activa y reactiva, en la red interconectada de transmisión eléctrica. Desde el punto de vista estrictamente matemático se debe resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas, no lineales y diferenciables cuyo orden dependerá del tipo de formulación empleada. Se considera el sistema elemental de dos barras de la Figura 2. para hacer el conteo de variables, necesario en la solución del flujo de potencia [7].

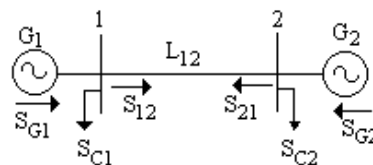


Figura 2. Red de interconexión de dos barras

Donde:

SG_i es la potencia compleja generada en la barra i ,

SC_i es la potencia compleja demandada por la barra i

S_{ij} es la potencia compleja que fluye por la línea L_{ij} .

El esquema de flujo de potencias se visualiza de mejor manera al incluir el equivalente eléctrico de la línea que se muestra en la Figura 3 [7].

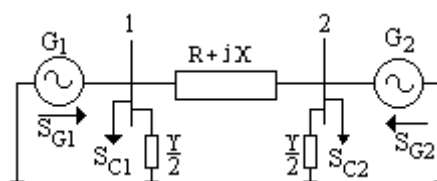


Figura 3. Interconexión de dos barras incluyendo el modelo eléctrico de una línea de transmisión

A partir del circuito de la Figura 3 y empleando la ley de Kirchoff se obtienen las ecuaciones (1) y (2).

$$\left(\frac{S_1}{V_1}\right)^* = \frac{V_1 Y_1}{2} + \frac{V_1 - V_2}{R + jX} \quad (1)$$

$$\left(\frac{S_2}{V_2}\right)^* = \frac{V_2 Y_2}{2} + \frac{V_2 - V_1}{R + jX} \quad (2)$$

Estas ecuaciones tienen 12 incógnitas:

P_{G1}, Q_{G1} : Potencia activa y potencia reactiva que fluye hacia la barra 1.

P_{G2}, Q_{G2} : Potencia activa y potencia reactiva que fluye hacia la barra 2.

P_{C1}, Q_{C1} : Potencia activa y potencia reactiva de la carga conectada en la barra 1.

P_{C2}, Q_{C2} : Potencia activa y potencia reactiva de la carga conectada en la barra 2.

V_1, θ_1 : Magnitud y ángulo de fase del voltaje en la barra 1.

V_2 y θ_2 : Magnitud y ángulo de fase del voltaje en la barra 2.

El sistema planteado mediante las ecuaciones (1) y (2), no tiene solución factible a menos que se conozcan algunas de las variables. Para su solución se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se deben conocer las características de la carga de cada barra, valores de P_{C1}, Q_{C1}, P_{C2} y Q_{C2} .
- Se escoge la magnitud del voltaje en la barra 1 (V_1) igual a 1 en por unidad y el ángulo (θ_1) igual a 0° .

Con estas condiciones iniciales el sistema original de 4 ecuaciones y 12 variables, pasa a uno de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, las cuales son: P_{G2}, Q_{G2}, V_2 y θ_2 [7]. En cada barra (nodo) de un sistema eléctrico de potencia se tienen cuatro incógnitas P_P, Q_P, V_P y θ_P , donde el subíndice P se refiere a la barra del sistema interconectado. En la Tabla 1 se muestra una clasificación de las barras de un sistema de potencia eléctrico, donde se utiliza (X) para lo conocido y (-) para lo desconocido, relacionado con las variables descritas previamente [7, 8].

Tabla 1. Clasificación de las barras de un sistema de potencia eléctrico

Tipo de barra	P_P	Q_P	V_P	θ_P
Carga	X	X	-	-
Tensión controlada	X	-	X	-
Flotante	-	-	X	X

En las barras de tensión controlada se necesita la presencia de una fuente que regule el flujo de potencia reactiva. En la barra flotante (slack) se necesita un generador que suministre la diferencia entre la potencia compleja inyectada al sistema en el resto de las barras y la carga total más las pérdidas [7, 8]. El sentido de las corrientes eléctricas que fluyen hacia P y Q de un sistema de potencia se ilustran en la Figura 4.

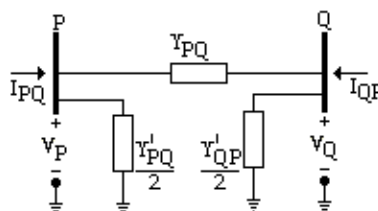


Figura 4. Corrientes en las barras P y Q de un sistema interconectado de dos barras

A partir de la Figura 4 y con base en la ley de corrientes de Kirchoff y la ley de Ohm se obtiene la ecuación (3) para la corriente I_{PQ} .

$$I_{PQ} = Y_{PQ}(V_P - V_Q) + \frac{V_P Y_{PQ}}{2} \quad (3)$$

Las ecuaciones (4) y (5) representan las potencias complejas (S) que fluyen desde la barra P hacia la barra Q y desde la barra Q hacia la barra P, respectivamente.

$$S_{PQ} = V_P I_{PQ}^* = V_P^2 \left(Y_{PQ}^* + \frac{Y_{PQ}^*}{2} \right) - V_P V_Q^* Y_{PQ}^* \quad (4)$$

$$S_{QP} = V_Q I_{QP}^* = V_Q^2 \left(Y_{QP}^* + \frac{Y_{QP}^*}{2} \right) - V_Q V_P^* Y_{QP}^* \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) indican que la solución del problema del flujo de potencia necesita el valor de las tensiones en todas las barras del sistema de potencia eléctrico. Recurriendo al análisis nodal en forma matricial se obtiene ecuación (6) [7, 8].

$$I_i = [Y_i] \times [V_i] \quad (6)$$

Las ecuaciones (7), (8) y (9) corresponden al vector de corrientes (I_i) inyectadas en las barras, la matriz de admitancias (Y_i) de las barras y el vector de voltajes (V_i) en las barras respectivamente.

$$I_i = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (7) \quad V_i = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (8) \quad Y_i = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & \dots & Y_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Si se reemplaza cada uno de los elementos que componen el vector I_i , utilizando la fórmula de la potencia compleja S_i , entonces se obtiene el sistema matricial de la ecuación (10).

$$\begin{bmatrix} \frac{S_1^*}{V_1^*} \\ \frac{S_2^*}{V_2^*} \\ \frac{S_3^*}{V_3^*} \\ \dots \\ \frac{S_n^*}{V_n^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & \dots & Y_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Las ecuaciones (11) y (12) se obtienen al realizar la multiplicación de la matriz de admitancias con el vector de voltajes. Con base en estas se desarrolla el algoritmo para solucionar el problema del flujo de potencia eléctrico.

$$P_i = V_i \sum_{v_j \rightarrow red} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (11)$$

$$Q_i = V_i \sum_{v_j \rightarrow red} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (12)$$

3.2 Modelos de circuitos desacoplados

El sistema de potencia de tres buses de la Figura 5a, se reemplaza por un circuito equivalente (dos fuentes de voltaje, dos líneas de transmisión y la impedancia de carga) de la Figura 5b [5].

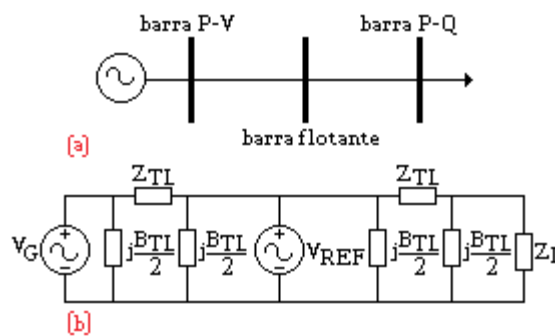


Figura 5. a. Sistema de potencia con tres barras; b. circuito equivalente con fuentes de voltaje e impedancias.

En la Figura 5b se observa como el voltaje de la barra P-V es función de la corriente compleja y el voltaje de la barra de carga P-Q es una función compleja de la corriente que circula por la misma. Al aplicar directamente el algoritmo de Newton-Raphson al circuito de la Figura 5b, se llega a un punto en donde la función compleja conjugada del voltaje en la barra no es diferenciable ya que no es analítica. Si una función compleja es diferenciable o no lo es, se demuestra acercándose al punto del espacio en mención desde diferentes trayectorias. Si por lo menos dos límites no coinciden, entonces se puede decir que la función no es analítica y por ende no diferenciable [5].

Es por esta razón que el algoritmo de Newton-Raphson base del Spice, no se puede aplicar de forma directa. Una función compleja tiene una parte real y una parte imaginaria, las cuales se pueden independizar y relacionar entre sí a través de las fuentes de voltaje y corriente dependientes, que se obtienen para cada

elemento que compone el sistema eléctrico de potencia 5. A continuación, se obtiene las representaciones de los circuitos real e imaginario para los elementos fundamentales de un sistema de potencia eléctrico.

3.2.1 Barras de generación

Las ecuaciones (13) y (14) representan el voltaje complejo y la corriente compleja en las terminales de un generador eléctrico de potencia.

$$V_G = V_{RG} + jV_{IG} \quad (13)$$

$$I_G = I_{RG} + jI_{IG} \quad (14)$$

La ecuación (15) representa la potencia compleja del generador en función de las componentes reales e imaginarias del voltaje y la corriente.

$$S_G = V_G \times I_G^* = (V_{RG}I_{RG} + V_{IG}I_{IG}) + j(V_{RG}I_{IG} - V_{IG}I_{RG}) \quad (15)$$

Las ecuaciones (16) y (17) representan las cantidades conocidas en una barra de generación: la magnitud del voltaje en la barra y la potencia activa.

$$P_G = V_{RG}I_{RG} + V_{IG}I_{IG} \quad (16)$$

$$|V_G|^2 = V_{RG}^2 + V_{IG}^2 \quad (17)$$

Las ecuaciones cuadráticas (18) y (19) representan las componentes real e imaginaria del voltaje en una barra, al ser despejadas utilizando las ecuaciones (16) y (17).

$$V_{RG}(I_{IG}^2 + I_{RG}^2) - 2V_{RG}I_{RG}P_G + (P_G^2 - V_G^2I_{IG}^2) = 0 \quad (18)$$

$$V_{IG}(I_{IG}^2 + I_{RG}^2) - 2V_{IG}I_{IG}P_G + (P_G^2 - V_G^2I_{RG}^2) = 0 \quad (19)$$

Las ecuaciones (20) y (21) son las raíces de las ecuaciones (18) y (19).

$$V_{RG}(I_{RG}, I_{IG}) = \frac{P_G I_{RG} \pm I_{IG} \sqrt{V_G^2(I_{IG}^2 + I_{RG}^2) - P_G^2}}{I_{RG}^2 + I_{IG}^2} \quad (20)$$

$$V_{IG}(I_{RG}, I_{IG}) = \frac{P_G I_{IG} \pm I_{RG} \sqrt{V_G^2(I_{IG}^2 + I_{RG}^2) - P_G^2}}{I_{RG}^2 + I_{IG}^2} \quad (21)$$

La raíz correcta depende del signo de la potencia reactiva Q, es decir, si Q entra o sale de la barra. La Tabla 2 muestra la raíz en función del signo de la potencia reactiva.

Tabla 2. Raíces de los voltajes V_{RG} y V_{IG} en función de la potencia reactiva (Q)

Potencia reactiva Q	Raíz V_{RG}	Raíz V_{IG}
+	-	+
-	+	-

La ecuación (22) muestra la expansión en serie de Taylor de primer orden para una función con dos variables.

$$f(x^{K+1}, y^{K+1}) = f(x^K, y^K) + \left[\frac{\partial f}{\partial x}(x^K, y^K) \right] \times (x^{K+1} - x^K) + \left[\frac{\partial f}{\partial y}(x^K, y^K) \right] \times (y^{K+1} - y^K) \quad (22)$$

Al aplicar la ecuación (22) en las funciones de dos variables de las ecuaciones (20) y (21), se obtienen las ecuaciones (23) y (24) que representan el modelo iterativo buscado para las componentes real e imaginaria del voltaje en una barra de generación.

$$V_{RG}(I_{RG}^{K+1}, I_{IG}^{K+1}) = V_{RG}^K + \left[\frac{\partial V_{RG}}{\partial I_{RG}}(I_{RG}^K, I_{IG}^K) \right] \times (I_{RG}^{K+1} - I_{RG}^K) + \left[\frac{\partial V_{RG}}{\partial I_{IG}}(I_{RG}^K, I_{IG}^K) \right] \times (I_{IG}^{K+1} - I_{IG}^K) \quad (23)$$

$$V_{IG}(I_{RG}^{K+1}, I_{IG}^{K+1}) = V_{IG}^K + \left[\frac{\partial V_{IG}}{\partial I_{RG}}(I_{RG}^K, I_{IG}^K) \right] \times (I_{RG}^{K+1} - I_{RG}^K) + \left[\frac{\partial V_{IG}}{\partial I_{IG}}(I_{RG}^K, I_{IG}^K) \right] \times (I_{IG}^{K+1} - I_{IG}^K) \quad (24)$$

Las ecuaciones (23) y (24) se traducen en los circuitos desacoplados real e imaginario de la Figura 6.

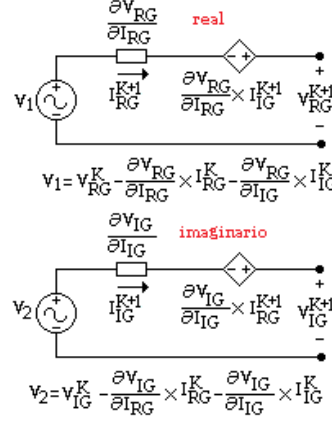


Figura 6. Circuitos desacoplados real e imaginario para las barras de generación

3.2.2 Barras de carga

Las ecuaciones (25) y (26) representan los componentes real e imaginario de la corriente y el voltaje en las barras de carga.

$$V_L = V_{RL} + jV_{IL} \quad (25)$$

$$I_L = I_{RL} + jI_{IL} \quad (26)$$

Utilizando la ecuación de potencia compleja se obtienen las ecuaciones (27) y (28) que representan la potencia activa y la potencia reactiva en la barra de carga en función de las componentes reales e imaginarias del voltaje y la corriente.

$$S_L = V_L I_L^* \rightarrow$$

$$P_L = V_{RL} I_{RL} + V_{IL} I_{IL} \quad (27)$$

$$Q_L = V_{IL} I_{RL} - V_{RL} I_{IL} \quad (28)$$

Si las ecuaciones (27) y (28) representan un par de ecuaciones con dos incógnitas I_{RL} e I_{IL} , entonces las ecuaciones (29) y (30) son la solución de dicho sistema de ecuaciones.

$$I_{RL} = \frac{Q_L V_{IL} + P_L V_{RL}}{V_{IL}^2 + V_{RL}^2} \quad (29)$$

$$I_{IL} = \frac{P_L V_{IL} - Q_L V_{RL}}{V_{IL}^2 + V_{RL}^2} \quad (30)$$

Se aplica la expansión de una función de dos variables en serie de Taylor de primer orden para las ecuaciones (29) y (30), lo cual genera las ecuaciones iterativas (31) y (32).

$$I_{RL}(V_{RL}^{K+1}, V_{IL}^{K+1}) = I_{RL}^K + \left[\frac{\partial I_{RL}}{\partial V_{RL}}(V_{RL}^K, V_{IL}^K) \right] \times (V_{RL}^{K+1} - V_{RL}^K) + \left[\frac{\partial I_{RL}}{\partial V_{IL}}(V_{RL}^K, V_{IL}^K) \right] \times (V_{IL}^{K+1} - V_{IL}^K) \quad (31)$$

$$I_{IL}(V_{RL}^{K+1}, V_{IL}^{K+1}) = I_{IL}^K + \left[\frac{\partial I_{IL}}{\partial V_{RL}}(V_{RL}^K, V_{IL}^K) \right] \times (V_{RL}^{K+1} - V_{RL}^K) + \left[\frac{\partial I_{IL}}{\partial V_{IL}}(V_{RL}^K, V_{IL}^K) \right] \times (V_{IL}^{K+1} - V_{IL}^K) \quad (32)$$

En la Figura 7, las ecuaciones (31) y (32) se transforman en los circuitos desacoplados equivalentes real e imaginario, con los cuales se modelan las barras de carga 5.

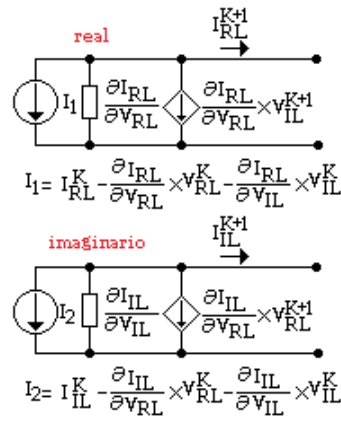


Figura 7. Circuitos desacoplados real e imaginario para las barras de carga

3.2.3 Barras flotantes

Los circuitos desacoplados real e imaginario para las barras flotantes son los de creación más sencilla. El circuito real es una fuente de voltaje de magnitud $V_{REF} \times \cos(\theta)$ y el imaginario es otra fuente de voltaje de magnitud $V_{REF} \times \sin(\theta)$. Generalmente suele utilizarse θ igual a 0° , por lo tanto, el circuito real es una fuente de voltaje cuyo valor es V_{REF} y el circuito imaginario es un cortocircuito [5].

3.2.4 Impedancias en serie

Estas impedancias se generan en el circuito cuando se conectan las líneas de transmisión y los transformadores del sistema de potencia. El circuito de la Figura 8 muestra la corriente y el voltaje en una impedancia conectada entre un par de barras del sistema de potencia.

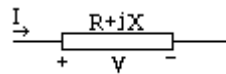


Figura 8. Impedancia serie entre dos barras del sistema interconectado

El voltaje y la corriente de la impedancia serie se representan con sus componentes real e imaginaria con las ecuaciones (33) y (34).

$$V = V_R + jV_I \quad (33)$$

$$I = I_R + jI_I \quad (34)$$

Las ecuaciones (35) y (36) representan las partes real e imaginaria de la corriente que circula a través de la impedancia serie que une dos barras del sistema interconectado.

$$I_R = \frac{R}{R^2 + X^2} V_R + \frac{X}{R^2 + X^2} V_I \quad (35)$$

$$I_I = \frac{R}{R^2 + X^2} V_I - \frac{X}{R^2 + X^2} V_R \quad (36)$$

La Figura 9 ilustra los circuitos desacoplados equivalentes de una impedancia serie que une dos barras en el sistema eléctrico de potencia [5].

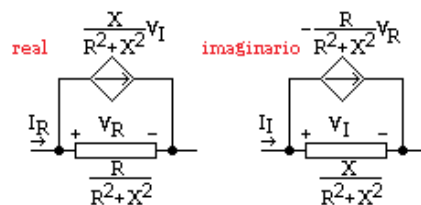


Figura 9. Circuitos desacoplados real e imaginario para las impedancias en serie del sistema de potencia eléctrico

3.2.5 Impedancias en paralelo (barra a referencia del circuito)

Las líneas de transmisión modelan las pérdidas por calor y dispersión magnética a través de la impedancia serie, mientras que, la impedancia en paralelo o shunt representa la carga almacenada entre el conductor eléctrico y la referencia del circuito. La Figura 10 muestra una impedancia en paralelo o shunt, conectada entre una de las barras y la referencia del sistema eléctrico de potencia.

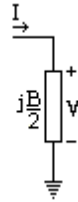


Figura 10. Impedancia paralelo o shunt

Las ecuaciones (33) y (34) se emplearán para representar el voltaje y la corriente en una impedancia en paralelo o shunt. Utilizando la ley de ohm, se obtienen las ecuaciones (37) y (38) que representan las componentes real e imaginaria de la corriente en la impedancia paralelo.

$$I = Y \times V \rightarrow$$

$$I_R = -\frac{B}{2}V_I \quad (37)$$

$$I_I = \frac{B}{2}V_R \quad (38)$$

En la Figura 11 se ilustran los circuitos desacoplados equivalentes que representan a una impedancia paralela conectada entre una barra del sistema de potencia eléctrico y la referencia [5].

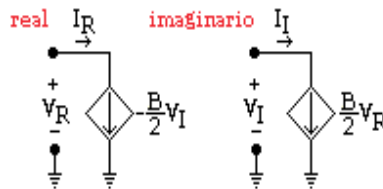


Figura 11. Circuitos desacoplados real e imaginario para las impedancias en paralelo

3.2.6 Transformador de potencia

Se inicia la representación desacoplada del transformador con la relación de vueltas y el ángulo de fase, que relaciona los voltajes del primario y el secundario a través de la ecuación (39). En esta, n es la relación de vueltas entre los bobinados primario y secundario mientras que θ es un múltiplo de 30° que representa el desfase entre los voltajes del transformador.

$$\frac{V_1}{V_2} = ne^{j\theta} \quad (39)$$

Los voltajes primario y secundario se escriben en componentes rectangulares como se muestra en las ecuaciones (40) y (41).

$$V_1 = V_{R1} + jV_{I1} \quad (40)$$

$$V_2 = V_{R2} + jV_{I2} \quad (41)$$

Combinando las tres ecuaciones (39, 40 Y 41) se obtienen las ecuaciones (42) y (43) que representan los voltajes real e imaginario en el secundario del transformador de potencia. En la Figura 12 se muestran los circuitos equivalentes real e imaginario de un transformador tomando en cuenta únicamente la relación de los voltajes y el ángulo de fase entre los mismos [5].

$$\frac{V_{R1} + jV_{I1}}{V_{R2} + jV_{I2}} = ne^{j\theta} \rightarrow$$

$$V_{R2} = \frac{\cos\theta}{n}V_{R1} + \frac{\text{sen}\theta}{n}V_{I1} \quad (42)$$

$$V_{R2} = \frac{\cos\theta}{n}V_{I1} - \frac{\text{sen}\theta}{n}V_{R1} \quad (43)$$

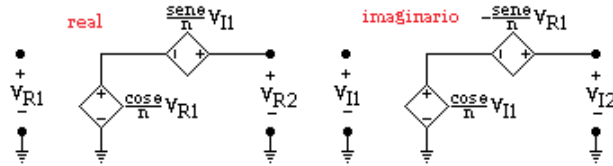


Figura 12. Circuitos desacoplados real e imaginario para los voltajes de un transformador de potencia

Las corrientes de los bobinados primario y secundario de un transformador de potencia se representan mediante la relación de vueltas como se muestra en la ecuación (44).

$$\frac{I_1}{I_2} = -ne^{j\theta} \quad (44)$$

Al reemplazar las corrientes I_2 e I_1 en la ecuación (44) con su representación rectangular, se obtienen las ecuaciones (45) y (46).

$$I_{R1} = -\frac{\cos\theta}{n}I_{R2} - \frac{\text{sen}\theta}{n}I_{I2} \quad (45)$$

$$I_{R2} = -\frac{\cos\theta}{n}I_{I2} + \frac{\text{sen}\theta}{n}I_{r2} \quad (46)$$

Se agregan las ecuaciones (45) y (46) en el circuito de la Figura 12 para construir el mostrado en la Figura 13.

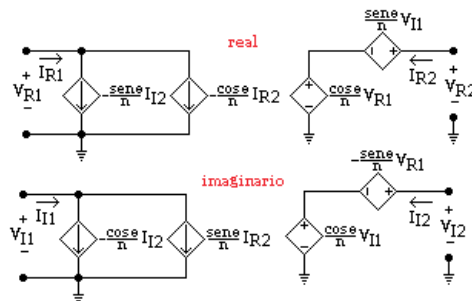


Figura 13. Circuitos real e imaginario de las relaciones de voltaje y corriente en un transformador de potencia

Las pérdidas de un transformador, calor y dispersión magnética, se representan mediante una impedancia serie conectada en el secundario del mismo. Los circuitos desacoplados de una impedancia serie se calcularon previamente. Por lo tanto, para terminar el modelo desacoplado de un transformador de potencia, se agrega al circuito de la Figura 13, el equivalente de la impedancia serie, generando de esta forma el circuito que se muestra en la Figura 14.

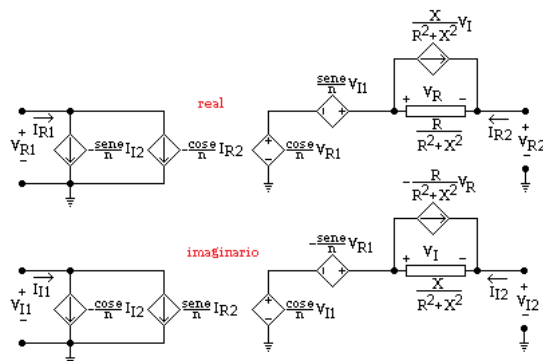


Figura 14. Circuitos real e imaginario de un transformador de potencia

3.3 Algoritmo para la solución de circuitos de Spice

3.3.1 Newton–Raphson

Se utiliza en la solución de ecuaciones no lineales donde el álgebra no brinda soluciones analíticas. El método numérico parte de la recta tangente a la función que pasa por el punto $(x_0, f(x_0))$ la cual se define por la siguiente ecuación (47).

$$g(x) = f(x_0) + f'(x_0) \times (x - x_0) \quad (47)$$

Si x_1 es la intersección de la función $g(x)$ con el eje de las abscisas (raíz de $g(x)$), entonces al resolver la ecuación (47) se obtiene la ecuación (48).

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (48)$$

La ecuación (48) se generaliza introduciendo el término n-esimo, lo cual genera la ecuación (49).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (49)$$

El método converge, si el valor siguiente x_{n+1} es lo suficientemente cercano al valor actual x_n [9].

3.3.2 Integración y diferenciación numérica

Se emplean en la solución de las ecuaciones integro – diferenciales, que se presentan en los circuitos cuando se utilizan elementos que almacenan energía tales como: los condensadores y las bobinas. Son ampliamente empleados en la aproximación del valor de una integral o una derivada de una función, cuando no es posible el cálculo directo de las mismas o cuando se requiere que un computador ejecute un algoritmo de integración o derivación. Las ecuaciones (50) y (51) muestran la forma iterativa a través de la cual Spice, emula el comportamiento en el tiempo de los condensadores y las bobinas.

$$i_C = C \frac{dV}{dt} \rightarrow i_{t+1} = \frac{C}{h} [V_{t+1} - V_t] \quad (50)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \rightarrow i_{t+1} = \frac{h}{2L} [V_{t+1} - V_t] \quad (51)$$

3.3.3 Método de nodos modificado

Se parece a la solución de circuitos por el método de nodos, pero incluyendo en esta las fuentes de voltaje sin recurrir a los supernodos. Este método genera matrices mucho más grandes que las de la solución tradicional por nodos con la salvedad que, desde el punto de vista computacional, resulta más sencilla su implementación. El primer paso para solucionar el circuito con este método, consiste en etiquetar todos los nodos del circuito como se muestra en la Figura 15 [10].

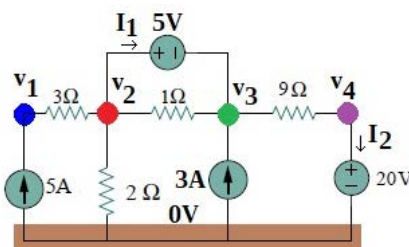


Figura 15. Nodos del circuito con etiquetas

El segundo paso crea las corrientes I_1 e I_2 , entrando por las terminales positivas de las fuentes de voltaje independiente de 5 y 20V respectivamente (Figura 15). En el tercer paso se escriben las ecuaciones (52), (53), (54) y (55) para los nodos V_1, V_2, V_3 y V_4 y las ecuaciones (56) y (57) para las fuentes de voltaje independientes.

$$\frac{1}{3}v_1 - \frac{1}{3}v_2 = 5 \quad (52)$$

$$-\frac{1}{3}v_1 + \frac{11}{6}v_2 - v_3 + I_1 = 0 \quad (53)$$

$$-v_2 + \frac{10}{9}v_3 - \frac{1}{9}v_4 - I_1 + I_2 = 3 \quad (54)$$

$$-\frac{1}{9}v_3 + \frac{1}{9}v_4 + I_2 = 0 \quad (55)$$

$$V_2 - V_3 = 5 \quad (56)$$

$$V_4 = 5 \quad (57)$$

Con base en las ecuaciones (52), (53), (54), (55), (56) y (57) se genera un sistema matricial a partir del cual se soluciona el circuito en la ecuación (58).

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3333 & -0.3333 & 0.0000 & 0.0000 & 0.000 & 0.000 \\ -0.3333 & 1.83333 & -1.000 & 0.0000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.0000 & -1.000 & 1.1111 & -0.111 & -1.000 & 0.000 \\ 0.3333 & -0.3333 & 0.0000 & 0.0000 & 0.000 & 1.000 \\ 0.000 & 1.0000 & -1.0000 & 0.0000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 3 \\ 0 \\ 5 \\ 20 \end{bmatrix} \quad (58)$$

La matriz de la ecuación (58) genera las cuatro submatrices mostradas en la Figura 16.

G				B	
0.3333	-0.3333	0	0	0	0
-0.3333	1.8333	-1	0	1	0
0	-1	1.1111	-0.1111	-1	0
0	0	-0.1111	0.1111	0	1
C				D	
0	1	-1	0	0	0
0	0	0	1	0	0

Figura 16. Submatrices de la matriz de la ecuación (58)

La submatriz G es la matriz de admitancias, la submatriz B muestra los nodos con conexión a las fuentes de voltaje del circuito, C es la transpuesta de la matriz B y D es diferente de 0 cuando el circuito tiene fuentes dependientes. El diagrama de bloques de la Figura 17 muestra el algoritmo computacional empleado por Spice para la solución de circuitos eléctricos.

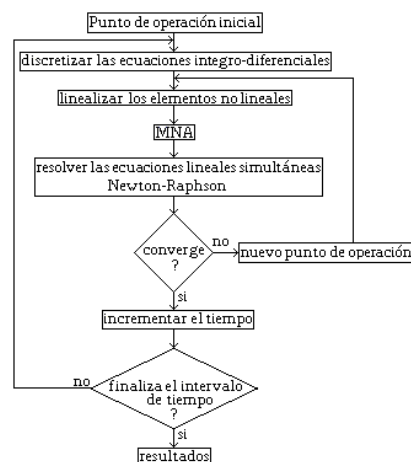


Figura 17. Diagrama de flujo del algoritmo Spice para simulación de circuitos eléctricos

4. RESULTADOS

El software SPUTS se utiliza para la resolución de problemas de flujo de potencia a nivel académico. Los pasos a seguir para solucionar el flujo de cargas de un sistema de potencia son los siguientes:

1. Se dibuja el plano del diagrama unifilar del sistema de potencia, como el de la Figura 18, y se caracterizan cada una de las barras que componen el sistema de potencia.

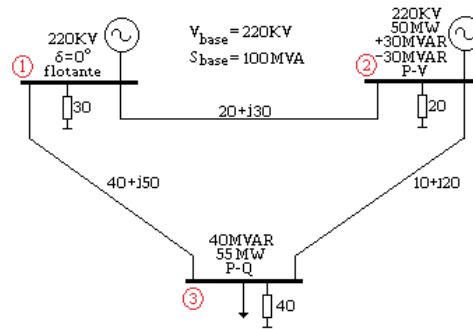


Figura 18. Diagrama unifilar de un sistema de potencia de 3 barras

2. Con base en la información recogida en el diagrama unifilar del sistema, se almacena la información de las barras en una variable tipo diccionario (*dict*) de Python, como se muestra en la Figura 19.

```

IDLE Shell 3.9.5*
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 3.9.5 (tags/v3.9.5:0a7dcbd, May 3 2021, 17:27:52) [MSC v.1928 64 bit
(AMD64)] on win32
cuantas barras tiene el sistema:3
potencia base (MVA)=100
voltaje base (KV)=220
Barra1
tipo de barra (slack:1) (FV:2) (PQ:3)=1
Voltaje de la barra (KV):220
angulo del voltaje en la barra:0
susceptancia de la barra=30
Barra2
tipo de barra (slack:1) (FV:2) (PQ:3)=2
Voltaje de la barra (KV):220
Potencia de la barra (MW):50
Potencia reactiva minima (MVAR):-30
Potencia reactiva maxima (MVAR):30
susceptancia de la barra=20
Barra3
tipo de barra (slack:1) (FV:2) (PQ:3)=3
Potencia de carga de la barra (MW):55
Potencia de carga de la barra (MVAR):40
susceptancia de la barra=40
{'1': [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 6.887052341597796e-05, '1'], '2': [1.0,
0.0, 0.5, 0.0, -0.3, 0.3, 0.00010330578512396694, '2'], '3': [0.0, 0.0, 0.55,
0.4, 0.0, 0.0, 5.165289256198347e-05, '3']}

```

Figura 19. Información de las barras del sistema de potencia almacenada en un tipo de dato diccionario de Python

3. Se realiza la misma operación del paso número 2, con la información de las líneas de transmisión del diagrama unifilar, dando como resultado otra variable tipo diccionario mostrada en la Figura 20.

```

IDLE Shell 3.9.5
File Edit Shell Debug Options Window Help
Python 3.9.5 (tags/v3.9.5:0a7dcbd, May 3 2021, 17:27:52) [MSC v.1928 64 bit
(AMD64)] on win32
Barra 1 --- Barra 2
conectada(1) desconectada(0):1
Resistencia=20
Reactancia=30
Barra 1 --- Barra 3
conectada(1) desconectada(0):1
Resistencia=40
Reactancia=50
Barra 2 --- Barra 3
conectada(1) desconectada(0):1
Resistencia=10
Reactancia=20
{'1': [1, 2, 0.04132231404958678, 0.06198347107438017], '2': [1, 3, 0.0826446
2809917356, 0.10330578512396695], '3': [2, 3, 0.02066115702479339, 0.04132231
404958678]}

```

Figura 20. Información de las líneas de transmisión del sistema de potencia almacenada en un tipo de dato diccionario de Python

4. Se convierte el diagrama unifilar de la Figura 18, con la ayuda de las dos variables (tipo diccionario) anteriores y los modelos de circuitos desacoplados, en el texto que se muestra en la Figura 21. Con base en este archivo texto, nspice soluciona el circuito.
5. Se ejecuta en ngspice, un análisis de polarización (OP) y se soluciona el circuito con los modelos desacoplados como se muestra en la Figura 22.

```

circuitoRIM: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
***Circuito Real e Imaginario de un sistema de potencia
***barras = 3
***Potencia Base = 100 MVA
***Voltaje Base = 220 KV
***Impedancia Base = 484.0 ohmios
***Equivalente Impedancia Serie Linea 1 -- 2
G1 1 2 4 5 1
G2 4 5 1 2 1
R1 1 2 0.13429752066115702
R2 4 5 0.08953168044077135
***Equivalente Impedancia Serie Linea 1 -- 3
G3 1 3 4 6 1
G4 4 6 1 3 1
R3 1 3 0.21177685950413225
R4 4 6 0.1694214876039058
***Equivalente Impedancia Serie Linea 2 -- 3
G5 2 3 5 6 1
G6 5 6 2 3 1
R5 2 3 0.10330578512396695
R6 5 6 0.05165289256198347

circuitoRIM: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
***Equivalente Impedancia paralelo Barra 1
G7 1 0 4 0 0.5
G8 4 0 1 0 0.5
***Equivalente Impedancia paralelo Barra 2
G9 2 0 5 0 0.5
G10 5 0 2 0 0.5
***Equivalente Impedancia paralelo Barra 3
G11 3 0 6 0 0.5
G12 6 0 3 0 0.5
***Equivalente Barra flotante 1
V1 1 0 1.0
V2 4 0 0.0
***Equivalente Barra PV 2
V3 9 0 0.6
V4 11 0 0.8
R7 9 8 0.35
R8 11 10 0.35
H1 2 8 V4 0.3
H2 5 10 V3 0.45
***Equivalente Barra PQ 3
I1 3 0 0.4
I2 6 0 0.6
G13 3 0 6 0 0.25
G14 6 0 3 0 0.65
R9 3 0 0.35
R10 6 0 0.25
.end

```

Figura 21. Texto que describe en ngspice los circuitos desacoplados real e imaginario que modelan el diagrama unifilar del sistema de potencia

```

ngspice 31
*****
** ngspice-31 : Circuit level simulation program
** The U. C. Berkeley CAD Group
** Copyright 1985-1994, Regents of the University of California.
** Please get your ngspice manual from http://ngspice.sourceforge.net/docs.html
** Please file your bug-reports at http://ngspice.sourceforge.net/bugrep.html
** Creation Date: Oct 6 2019 15:17:58
*****
ngspice 1 -> cd D:\Spice64\examples\circuitos1
Current directory: D:\Spice64\examples\circuitos1
ngspice 2 -> source circuitoRIM.cir

Circuit: ***circuito real e imaginario de un sistema de potencia
ngspice 3 -> op
Doing analysis at TEMP = 27.000000 and TNOM = 27.000000

No. of Data Rows : 1
ngspice 4 -> print all
v(1) = 1.000000e+00
v(2) = 1.564804e-01
v(3) = 3.137600e-01
v(4) = 0.000000e+00
v(5) = 5.638947e-01
v(6) = 3.583138e-01
v(8) = 2.963207e+00
v(9) = 6.000000e-01
v(10) = -2.47451e+00
v(11) = 8.000000e-01
h1#branch = 6.752020e+00
h2#branch = -9.35576e+00
v1#branch = -8.59916e+00
v2#branch = 6.383436e+00
v3#branch = 6.752020e+00
v4#branch = -9.35576e+00
ngspice 5 ->

```

Figura 22. Solución ngspice de los circuitos desacoplados del sistema de potencia

- Se corrige el circuito desacoplado con base en la información recibida desde ngspice (solución de la primera iteración). Se ejecuta nuevamente ngspice, hasta que las diferencias entre los voltajes de la iteración anterior con los voltajes de la iteración actual sean muy pequeñas.
- Si se sobrepasan las 100 iteraciones, se detiene el algoritmo y se informa al usuario que la aplicación no tuvo éxito.

Los siete pasos que se muestran se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 23.

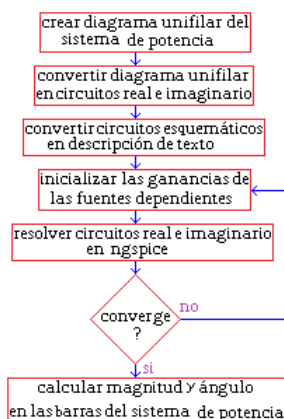


Figura 23. Diagrama de flujo del programa SPUTS

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la ejecución de 10 sistemas de potencia diferentes en SPUTS.

Tabla 3. Resultados del software SPUTS.

Número de barras	Iteraciones
3	20
5	25
10	50
15	90
20	X
30	X
57	X

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El software SPUTS es una aplicación, que recibe la información de los diagramas unifilares a través del teclado de un computador, y genera la descripción de texto necesaria para la solución en un software de simulación de circuitos integrados como ngspice.

Si el resultado de una iteración conlleva a una solución inviable, no se actualizan los datos y la iteración se repite con un pequeño amortiguamiento. Si la nueva solución es viable, se retoman las iteraciones hasta que el sistema converja o no. converja.

La implementación propuesta simula con éxito sistemas de potencia de 3, 5, 10 y 15 barras y no converge para sistemas de 20, 30 y 57 barras. La falta de convergencia en estos casos se debe a la falta de un esquema, que manipule de mejor manera, el rango de excursión de la potencia reactiva en las barras tipo P - V. En un futuro cercano se espera mejorar con mejores técnicas de amortiguamiento este problema.

Otra causa de la no convergencia para los sistemas de 20, 30 y 57 barras es la selección del punto inicial en el algoritmo Newton-Raphson. Este problema se ataca con algoritmos preliminares que ayuden a identificar las barras del sistema de potencia más sensibles del punto inicial escogido.

A partir del software SPUTS se crearán una serie de aplicaciones, que incluya en sus soluciones dispositivos de electrónica de potencia como HVDC y FACTS.

Se aspira con este software, dar los primeros pasos en la creación de una base tecnológica propia e independiente del software comercial, que existe en la actualidad, para evitar los costos altos y las curvas de aprendizaje altas con las aplicaciones de tipo comercial.

En el mediano y largo plazo se espera la creación de aplicaciones que permitan medir el impacto de la entrada de los sistemas de generación fotovoltaicos y eólicos sobre los sistemas de potencia.

6. CONCLUSIONES

Se realizó una revisión del algoritmo de solución de flujo de potencia en un sistema de potencia eléctrico y su transformación en un modelo de circuitos eléctricos con el cual se pueda llevar a cabo su solución en Spice.

Se realizó una revisión del algoritmo empleado por Spice en la solución de circuitos eléctricos de gran escala.

Al dividir el circuito en sus partes real e imaginaria se adecúa el método numérico de Newton-Raphson al cálculo de manera iterativa de la solución del sistema de ecuaciones no lineales de un flujo de potencia.

La experiencia ha demostrado que el software libre produce mejores programas desde un punto de vista técnico.

REFERENCIAS

- [1] Nagel L., Pedersen D. SPICE: Simulation program with integrated circuit emphasis. *Electron Res Lab Coll Eng Univ California*. 1973.

- [2] Cox F., Kuhn W., Murray J. Code-level modeling in XSPICE. *Proc ISCAS'92—Int Symp Circuits Syst.* 1992; 2: 871–874.
- [3] Nenzi P, Vogt H. "Ngspice Users Manual Version 34." 2020; Recuperado: <http://ngspice.sourceforge.net/docs/ngspice-34-manual.pdf>
- [4] Han L., Zhao X., Feng Z. TinySPICE: a parallel SPICE simulator on GPU for massively repeated small circuit simulations. *Proc 50th Annu Des Autom Conf.* 2013; 89. Recuperado: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2488843>
- [5] A. Cross and D. Strickland, "Using SPICE for power system simulations," *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1-10.
- [6] D. M. Bromberg, M. Jereminov, X. Li, G. Hug and L. Pileggi, "An equivalent circuit formulation of the power flow problem with current and voltage state variables," *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1-6.
- [7] T. Brown and J. Wyatt. "Design Thinking for Social Innovation", Stanford Social Innovation Review, Winter 2010.
- [8] "planteamiento del problema", capítulo 2, Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjstZ7dgZXxAhUbQTABHSoJB3sQFjABegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fbibing.us.es%2Fproyectos%2Ffabreproy%2F4424%2Ffichero%2FMEMORIA%25252F02%2BPlanteamiento%2BProblema.pdf&usg=AOvVaw3kXmXsaWfop3sfpCVZaKpT>
- [9] W. F. Tinney, C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume PAS-86, issue 11, Nov. 1967.
- [10] Chung-Wen Ho, A. Ruehli and P. Brennan, "The modified nodal approach to network analysis" in *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 504-509, June 1975.

Análisis de las recomendaciones UIT-R P.1546 y UIT-R P.526-13 para un estudio del espectro de la banda de 3.5 GHz en Colombia

Guillermo Fernando Valencia Plata¹

Félix Roberto Gómez Devia²

Universitaria Agustiniana
Colombia

En este capítulo se analiza las recomendaciones UIT-R P.1546 y UIT-R P.526-13 en el marco del proyecto de investigación *Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales en la banda de 3.3 a 3.7 GHz, para una futura implementación de 5G en Colombia. Fase 2*, realizado por investigadores del programa Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniana, Colombia. Estas recomendaciones se analizan teniendo en cuenta factores como los escenarios en las que se pueden utilizar, variables necesarias para hacer las predicciones, ajustes necesarios para que se puedan aplicar al territorio colombiano y ecuaciones usadas para calcular constantes necesarias para diferentes procesos. Finalmente, se determina cómo se deben usar las recomendaciones en conjunto para hacer una buena predicción y las modificaciones que les podrían hacer, para que se apliquen mejor al territorio colombiano y a la banda de frecuencia, que es objeto de estudio en el proyecto de investigación.

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Pedagogía y Magíster en Seguridad Informática.

Contacto: guillermo.valenciap@uniagustiniana.edu.co

² Ingeniero Electrónico, Especialista en Docencia Universitaria y Magíster en Administración de Tecnologías de Información.

Contacto: felix.gomez@uniagustiniana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

5G es la nueva generación de redes de telefonía móvil y promete entregar a sus usuarios nuevos servicios con velocidades de transmisión del orden de los gibabits/seg. Para cumplir con lo anterior es necesario el uso de espectro en frecuencias de 3.3 a 3.7 GHz y superiores a 24 GHz. Es por lo anterior que resulta importante que en Colombia existan estudios respecto a la propagación y atenuación de señales con frecuencias en el rango de 3.3 GHz a 3.7 GHz. La atenuación de las señales depende de parámetros tales como la frecuencia, distancia que debe viajar la señal, potencia de transmisión, objetos (clutter) que obstaculicen la propagación, entre otros.

A finales de 2019, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones MINTIC [1] publicó el plan 5G para Colombia, identificando los rangos de frecuencias factibles, así: Bandas inferiores (< 1 GHz), bandas medias (1 - 6 GHz) y bandas superiores (> 6 GHz, correspondientes a las bandas milimétricas identificadas en la CMR-19). Además, MINTIC presentó el plan de trabajo para fomentar el primer despliegue de la red de 5G antes de 2022, considerando las bandas de 700 MHz y 3.5 GHz (3.3-3.7 GHz) como un elemento clave para lograrlo. De acuerdo con este plan, el proceso de asignación de espectro de 3.5 GHz se llevaría a cabo en la segunda mitad de 2021, la banda de 700 MHz fue asignada el 20 de diciembre de 2019.

Para lograr el despliegue de 5G en la fecha estipulada, MINTIC ha abierto el campo para recibir manifestaciones de interés en llevar a cabo ensayos técnicos de tecnologías de 5G en la banda de 3.5 GHz y superiores. Las partes interesadas deben indicar el rango (es decir, 3.3-3.7 GHz, o rangos de ondas milimétricas) y el caso de uso (es decir, agricultura, venta al por menor, transporte, etc.) para el ensayo.

Para todo lo anterior resulta importante realizar estudios de ingeniería del espectro relacionados con la propagación de las ondas en la banda de frecuencias de 3.3 a 3.7 GHz, con base a las recomendaciones UIT-R P.1546 y UIT-R P.526, y es por todo esto que es importante analizar y validar las recomendaciones mencionadas. Un ejemplo de esto es el estudio que realizaron los profesores del departamento de sistemas electrónicos de la Universidad de Aalborg de Dinamarca y del instituto de Desarrollo tecnológico de Manaus Brasil [2] sobre la propagación a través de mediciones de atenuación de señales de 24 GHz las cuales fueron transmitidas través de la vegetación, para esto usaron antenas de bocina y encontraron que las pérdidas estaban entre 2,6 y 3,8 dB/m para los primeros metros al interior del área con vegetación.

2. MÉTODO

Para analizar las recomendaciones UIT-R P.1546 y UIT-R P.526-13, a través de una profunda lectura, se realizó una identificación de sus principales características tales como los escenarios en las que estas se pueden utilizar, predicciones que estas permiten hacer, valores necesarios para hacer las predicciones, ajustes necesarios para que estas se puedan aplicar al territorio colombiano y ecuaciones usadas para calcular constantes necesarias para diferentes procesos.

Para lo anterior se consultó la información publicada por la Unión Internacional de las Telecomunicaciones UIT, la información que solicita el software XirioOnline, entre otras, y para tener un panorama general de la importancia de la banda de 3.5 GHz se consultaron documentos publicados por MINTIC, la Agencia Nacional del Espectro ANE y la misma UIT, entre otros. La información que se encontró en las fuentes de información mencionadas anteriormente se filtró teniendo en cuenta la banda de interés de 3.5 GHz, el servicio de las comunicaciones móviles internacionales IMT de quinta generación 5G y las características del territorio colombiano para la propagación de señales milimétricas.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de la recomendación UIT-R P.1546-6

Esta recomendación [3] trata sobre métodos de predicción de zona de cobertura para servicios terrenales en el rango de frecuencias de 30 MHz a 4 GHz. Específicamente se recomienda su uso para trayectos terrestres, marítimos y mixtos, para distancias mayores a un kilómetro e inferiores a mil kilómetros de

longitud, y para alturas efectivas inferiores a tres kilómetros. El método está basado en la interpolación y extrapolación de curvas de intensidad de campo, estas fueron deducidas de forma empírica en función de la altura de la antena, distancia, frecuencia y el porcentaje de tiempo. El cálculo también incluye correcciones de los resultados a fin de reflejar los obstáculos que obstruyen el terminal.

La recomendación usa anexos para diferentes rangos de frecuencias, teniendo en cuenta el interés de los autores en la banda de frecuencia de 3.5 GHz, solo se va a tener en cuenta el Anexo 4 el cual trata sobre la gama de frecuencias de 1 a 4 GHz. En este anexo se encuentran curvas de intensidad de campo en función de la distancia, estas curvas se obtuvieron para la frecuencia de 2 GHz, pero se pueden utilizar para frecuencias en la gama de 1 a 4 GHz, aplicando la interpolación y extrapolación de la intensidad de campo en función de la frecuencia para obtener una mayor exactitud. Este mismo procedimiento se debe aplicar al utilizar los valores de intensidad de campo en función de la distancia.

Las curvas de las Figuras 1 a 3 representan los valores de intensidad de campo rebasados en el 50% de las ubicaciones dentro de un área de aproximadamente 500 m por 500 m durante el 50%, el 10% y el 1% del tiempo para trayectos terrestres [3].

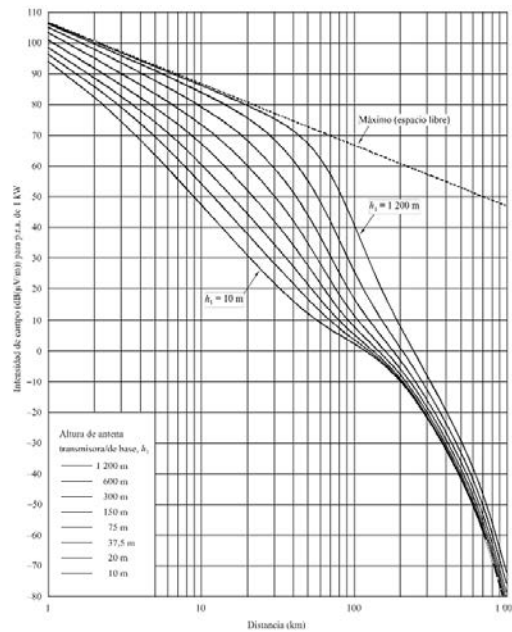


Figura 1. Intensidad de campo para trayectos terrestres, 50% del tiempo

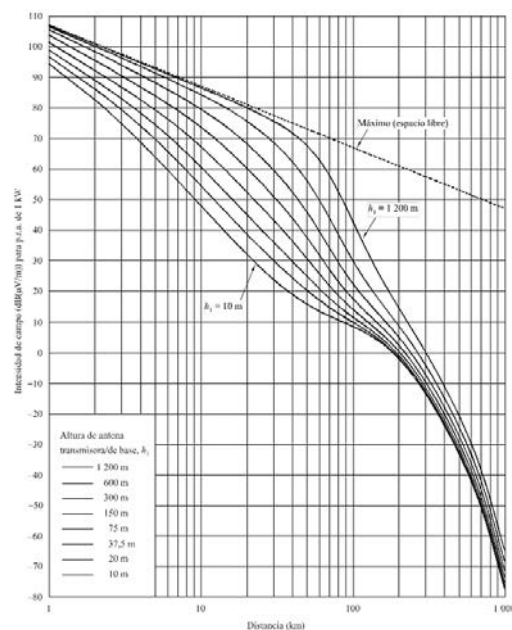


Figura 2. Intensidad de campo para trayectos terrestres, 10% del tiempo

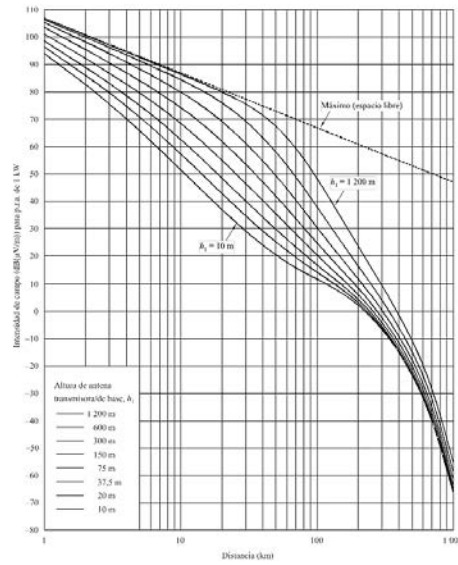


Figura 3. Intensidad de campo para trayectos terrestres, 1% del tiempo

Las curvas de las Figuras 4 a 8 representan los valores de intensidad de campo sobrepasados en el 50% de las ubicaciones durante el 50%, el 10% y el 1% del tiempo, para trayectos marítimos sobre mares con características como las que se observan en el Mar del Norte y el Mar Mediterráneo, respectivamente.

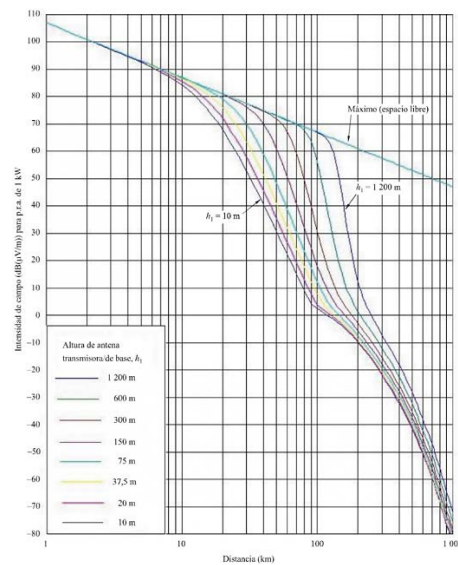


Figura 4. Intensidad de campo en trayecto marítimo, 50% del tiempo

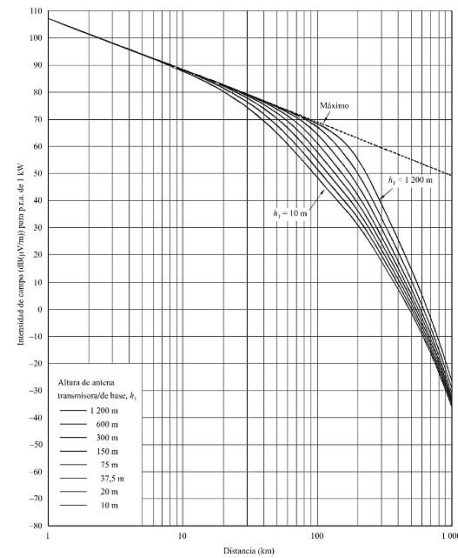


Figura 5. Intensidad de campo sobre mares fríos, 10% del tiempo

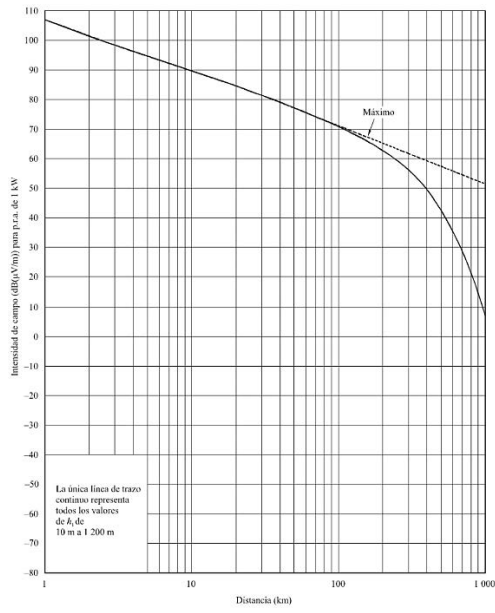


Figura 6. Intensidad de campo sobre mares fríos, 1% del tiempo

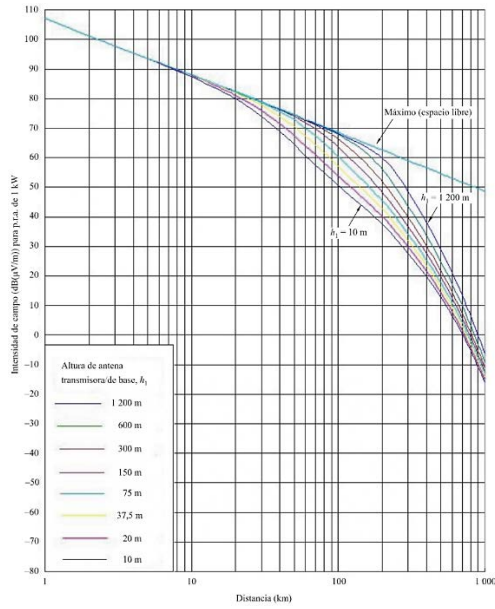


Figura 7. Intensidad de campo sobre mares cálidos, 10% del tiempo

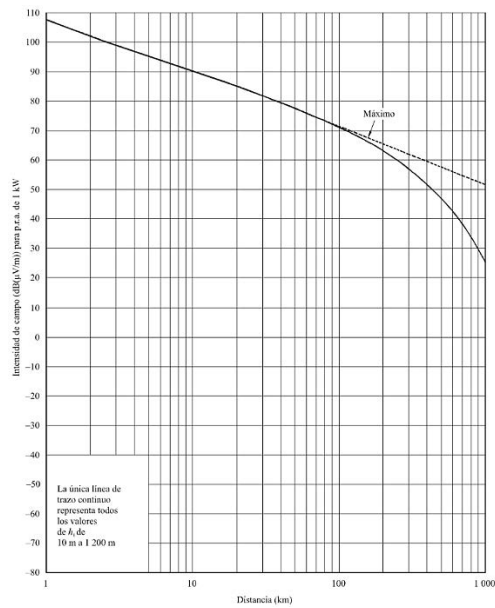


Figura 8. Intensidad de campo sobre mares cálidos, 1% del tiempo

En las zonas sujetas a fenómenos de súper refracción intensa se deberán tener en cuenta la variabilidad del índice de refracción atmosférica. Esta última tiene en cuenta que la mediana de la intensidad de campo y su variabilidad en el tiempo varían de acuerdo con la región climatológica. Las anteriores curvas de la intensidad de campo se aplican a los climas templados. A continuación, se da un método para ajustar las curvas de las distintas regiones del mundo sobre la base de los datos del gradiente vertical de la refractividad atmosférica asociados a la Recomendación UIT-R P.453 [4], pero hay que tener en cuenta que, si el gradiente es significativamente distinto, las intensidades de campo no podrán predecirse.

3.1.1 Ajuste para las diferencias regiones climáticas

Este método se puede aplicar a la información sobre el gradiente vertical de la refractividad de la Recomendación UIT-R P.453 en la corrección de las curvas de las Figuras 1 a 8 y de esta forma utilizarlas en cualquier parte del mundo. Los datos de la Recomendación UIT-R P.453 dan gradientes de refractividad en unidades N/km, sin embargo, hay que tener en cuenta que los valores inferiores a 65 metros de la atmósfera se toman como valores negativos. Para ajustar las curvas de intensidad de campo a una región del mundo diferente, se calcula la diferencia del gradiente ΔN con la ecuación (1).

$$\Delta N = dN_0 - dN \quad (1)$$

Para la ecuación (1) se deben usar los valores de dN_0 que se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Gradiente de referencia para diferentes campos

Campos sobrepasados durante	dN_0 (N/Km)
50% del tiempo	-43,3
10% del tiempo	-141,9
1% del tiempo	-301,3

Se deben tener en cuenta las siguientes definiciones:

dN : gradiente sobrepasado durante el porcentaje de tiempo de la curva a ajustar, obtenido de los archivos de datos de la Recomendación ITU R P.453 DNDZ_01.TXT, DNDZ_10.TXT y DNDZ_50.TXT, para el 1%, 10% y 50% del tiempo, respectivamente.

dN_0 : gradiente de referencia para el porcentaje de tiempo de la curva que hay que ajustar de la Tabla 1.

En el caso en que dN sea menor a -301.3, sin importar la distancia, se debe añadir un ajuste a la intensidad de campo según la ecuación (2).

$$\delta E_{m\acute{a}x} = 0,007 (-301,3 - dN) \{1 - \exp(-d/50)\} \exp(-d/6000) \quad \text{dB} \quad (2)$$

Para la curva de la familia que corresponde a $h_1 = 10m$, se debe añadir un ajuste según la ecuación (3).

$$\delta E_1 = K \{1 - \exp(-d/50)\} \exp(-d/6000) \quad \text{dB} \quad (3)$$

Para la ecuación (3), si ΔN es menor o igual a cero la constante K toma el valor de 0,08 ΔN . En cualquier otro caso la constante se debe calcular según la ecuación (4).

$$K = 14,94 - 6,693 \times 10^{-6} (1494 - \Delta N)^2 \quad (4)$$

En los siguientes casos δE_1 debe ser limitado:

- Cuando la intensidad de campo ajustada rebasa la intensidad de campo máxima ajustada.
- Cuando ΔN es superior a cero, se debe limitar de tal forma que la diferencia entre la intensidad de campo máxima ajustada y la de $h_1 = 10 m$ no sea superior a la de las curvas no ajustadas.

Es necesario ajustar las intensidades de campo para que ocupen la misma posición proporcional entre la intensidad de campo máxima y la de $h_1 = 10$ m como intensidad de campo correspondiente en las curvas no ajustadas; para esto hay que usar la ecuación (5).

$$E'_n = E'_1 + (E_n - E_1)(E'_{max} - E'_1)/(E_{max} - E_1) \quad (5)$$

En la anterior ecuación E_1 es la intensidad de campo cuando h_1 es de diez metros, E_n es la intensidad de campo para h_1 mayores a diez metros y E_{max} es la máxima intensidad de campo. Los parámetros con tilde son los valores ajustados.

3.1.2 Interpolación y extrapolación de la intensidad de campo en función de la frecuencia

La intensidad de campo para una frecuencia mayor a 2 GHz se debe obtener extrapolando a partir de los valores para 2 GHz. Para trayectos en los que se requiere una frecuencia mayor a 100 MHz, la intensidad de campo requerida, E , deberá calcularse utilizando la ecuación (6).

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \log(f/f_{inf}) / \log(f_{sup}/f_{inf}) \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (6)$$

En la anterior ecuación f es la frecuencia para la cual se desea calcular la predicción y esta se debe colocar en MHz, f_{inf} es la frecuencia nominal inferior y para este artículo debe ser 600, f_{sup} es la frecuencia nominal superior y para este artículo debe ser 2000, E_{inf} es la intensidad de campo para f_{inf} y por último E_{sup} es la intensidad de campo para f_{sup} .

La intensidad de campo obtenida de la extrapolación para una frecuencia superior a 2 GHz deberá limitarse de tal forma que no exceda del valor máximo dependiendo de si el trayecto es terrestre o marítimo. Para este artículo solo se tendrán en cuenta los trayectos terrestres, por lo tanto, la intensidad de campo no puede ser mayor al valor obtenido por la ecuación (7).

$$E_{fs} = 106,9 - 20 \log(d) \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (7)$$

Lo anterior teniendo en cuenta que E_{fs} es la intensidad de campo en espacio libre para una p.r.a. de 1 KW y d es la distancia en kilómetros.

3.2 Análisis de la recomendación UIT-R P.526-15

Esta recomendación [5] trata sobre propagación por difracción y presenta varios modelos para predecir el efecto de la difracción en la propagación de las ondas, específicamente en la intensidad de campo recibida. Los modelos que presenta la recomendación se aplican a diferentes tipos de obstáculos y diversas geometrías de trayecto, a partir de la premisa que la difracción de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra se ve afectada por las irregularidades del terreno. La recomendación define los siguientes conceptos básicos necesarios para la comprensión de los modelos.

3.2.1 Elipsoides de Fresnel y zonas de Fresnel

Al estudiar la propagación de las ondas radioeléctricas entre dos puntos A y B, el espacio correspondiente puede subdividirse en una familia de elipsoides, llamados elipsoides de Fresnel, todos con sus focos en los puntos A y B, de manera que cualquier punto M de uno de esos elipsoides satisface la ecuación (8).

$$AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Donde n es un número entero que caracteriza el elipsoide correspondiente y λ es la longitud de onda. La propagación se efectúa con visibilidad directa, es decir, con fenómenos de difracción despreciables, si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide de Fresnel. El radio de un elipsoide, en un punto situado entre el transmisor y el receptor, puede tener un valor aproximado, en unidades coherentes (ecuación (9)).

$$R_n = \left[\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2} \text{ m} \quad (9)$$

3.2.2 Anchura de penumbra

La transición de la luz a la sombra define la región de penumbra. Esta transición se produce a lo largo de la franja estrecha (anchura de penumbra) en el límite de la sombra geométrica. En la Figura 9, se ilustra la anchura de penumbra (w) en el caso de un transmisor ubicado a una altura h sobre la superficie lisa de la Tierra esférica, que viene dada por la ecuación (10).

$$w = \left[\frac{\lambda a_e^2}{\pi} \right]^{1/3} \text{ m} \quad (10)$$

Donde a_e es el radio ficticio de la Tierra, que para efectos de la recomendación será de 8500 km. (Figura 9).

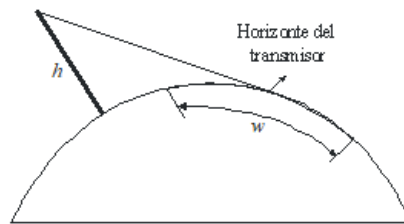


Figura 9. Definición de la anchura de penumbra

3.2.3 Zona de difracción

Zona que se extiende desde la distancia con visibilidad directa (LoS) en la que el trayecto libre de obstáculos es igual al 60% del radio de la primera zona de Fresnel, (R_1), hasta una distancia más allá del horizonte del transmisor en la que predomina el mecanismo de dispersión troposférica.

3.2.3 Criterio de rugosidad de la superficie del obstáculo

Si la superficie del obstáculo tiene irregularidades que no rebasan el valor Δh , calculado a partir de la ecuación (11) y teniendo en cuenta que R es el radio de curvatura del obstáculo, entonces se puede considerar que es un obstáculo de superficie lisa.

$$\Delta h = 0,04[R\lambda^2]^{1/3} \text{ m} \quad (11)$$

3.2.4 Obstáculo aislado

Si no existe interacción un obstáculo y el terreno circundante. En este caso, la atenuación del trayecto se debe únicamente al obstáculo, sin contribución del terreno. Debe cumplirse que no haya solapamiento entre las anchuras de penumbra de cada terminal y la parte superior del obstáculo; el trayecto libre de obstáculos a ambos lados de estos debe ser, al menos, de un valor de 0,6 del radio de la primera zona de Fresnel; no se produce reflexión especular en ninguno de los dos lados del obstáculo.

3.2.5 Tipo de terreno

Dependiendo del valor numérico del parámetro Δh de la Recomendación UIT-R P.310 [6], utilizado para calcular el grado de irregularidades del terreno, pueden distinguirse tres tipos de terrenos:

- *Terreno liso.* Si las irregularidades del terreno son del orden de 0,1R o inferiores a ese valor, donde R corresponde al máximo valor del radio de la primera zona de Fresnel en el trayecto de propagación.
- *Obstáculos aislados.* El perfil del terreno del trayecto está compuesto de uno o más obstáculos aislados.
- *Terreno ondulante.* El perfil lo compone varias colinas pequeñas, pero ninguna representa un obstáculo mayor.

Una vez definidos estos conceptos y con ayuda de las integrales de Fresnel, también planteadas en la Recomendación, se procede a establecer los modelos para predecir el efecto de la difracción en la propagación de las ondas radioeléctricas, así: Modelo de Difracción en una Tierra esférica, Modelo de Difracción sobre obstáculos aislados o sobre un trayecto terrenal general, Modelo de Difracción debida a pantallas delgadas y Modelo de Difracción debida a una cuña de conductividad finita.

Finalmente, la Recomendación presenta una Guía sobre la propagación por difracción, la cual corresponde a un organigrama para evaluar las pérdidas por difracción correspondiente a los dos primeros modelos y el procedimiento que debería adoptarse en cada caso. A continuación, se presenta el análisis de los dos primeros modelos, utilizados por el software Xirio Online [7].

3.2.6 Modelo de difracción en una tierra esférica

La recomendación presenta dos métodos para calcular la pérdida adicional de transmisión debida a la difracción en una Tierra esférica: método numérico y por nomograma, a partir de la fórmula clásica de la serie de residuos.

1. *Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte.* Para largas distancias transhorizonte, solo es importante el primer término de esa serie de residuos, el cual puede expresarse como el producto de un término de distancia, F , y dos términos de ganancia de altura, G_T y G_R . Mediante el método numérico, en primer lugar, es necesario calcular el grado en que las características eléctricas de la superficie de la Tierra influyen en la pérdida por difracción, lo cual se logra normalizando la admitancia de superficie K , obtenido por las ecuaciones 12 y 13.

$$K_H = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda}\right)^{-1/3} [(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{-1/4} \quad (12)$$

$$K_V = K_H[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{1/2} \quad (13)$$

Donde ε es la permitividad relativa efectiva y σ corresponde a la conductividad efectiva (S/m). Si K es menor de 0,001, las características eléctricas de la Tierra no revisten importancia. Para valores de K mayores de 0,001 e inferiores a 1, pueden utilizarse las ecuaciones que aparecen a continuación. El valor relativo de la intensidad de campo por difracción, E , con respecto a la intensidad de campo en el espacio libre, E_0 , viene dado por la ecuación 14.

$$20\log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \text{ Db} \quad (14)$$

Donde, X es la longitud normalizada del trayecto entre las antenas de alturas normalizadas Y_1 e Y_2 y se puede calcular con la ecuación 8, $F(X)$ corresponde al término de distancia y $G(Y)$ corresponde a la ganancia en función de la altura de las antenas, estas últimas se pueden calcular con las ecuaciones (15) a (20).

$$X = \beta \left(\frac{\pi}{\lambda a_e^2}\right)^{1/3} d \quad (15)$$

$$Y = 2\beta \left(\frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e}\right)^{1/3} h \quad (16)$$

Donde, d : longitud del trayecto (km) y h : altura de la antena (m).

$$\beta = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4}$$

$$F(X) = 11 + \log(X) - 17,6X \quad \text{para } X \geq 1,6 \quad (17)$$

$$F(X) = -20\log(X) - 5,6488X^{1,425} \quad \text{para } X < 1,6 \quad (18)$$

$$G(Y) = 17,6(B - 1,1)^{1/2} - 5\log(B - 1,1) - 8 \quad \text{para } B > 2 \quad (19)$$

$$G(Y) = 20\log(B - 0,1B^3) \quad \text{para } B \leq 2 \quad (20)$$

Donde $B = \beta Y$ si $G(Y) < 2 + 20 \log K$, se fija $G(Y)$ al valor $2 + 20 \log K$. Las funciones F (influencia de la distancia) y H (ganancia de altura) están representadas por los nomogramas que aparecen en las Figuras 3, 4, 5 y 6 de la Recomendación, que arrojan directamente el nivel recibido con relación al nivel del espacio libre, para $k = 1$ y $k = 4/3$, y frecuencias superiores a 30 MHz aproximadamente.

El nivel recibido para otros valores de k debe calcularse utilizando la escala de frecuencias para $k = 1$, pero reemplazando la frecuencia en cuestión por una frecuencia hipotética igual a f/k^2 , para las Figuras 3 y 5, y a $f/k^{1/2}$ para las Figuras 4 y 6 de la recomendación.

2. *Pérdidas de difracción para cualquier distancia a 10 MHz y frecuencias superiores.* Corresponde a un procedimiento a utilizar en un trayecto de Tierra esférica de cualquier longitud, en frecuencias de 10 MHz y superiores, para un radio efectivo de la Tierra $a_e > 0$. El método emplea el cálculo de Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte para largas distancias y para el resto de los casos se emplea un procedimiento de interpolación basado en un radio ficticio de la Tierra teórico. El procedimiento consiste en calcular la distancia de visibilidad directa marginal dada por la ecuación (21).

$$d_{los} = (2a_e)^{1/2}(h_1^{1/2} + h_2^{1/2}) \quad (21)$$

Si $d \geq d_{los}$ se calculan las pérdidas de difracción utilizando el método Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte y, no es necesario realizar más cálculos; en caso contrario, se calcula la altura libre de obstáculos más pequeña entre el trayecto de Tierra curva y el rayo entre las antenas, h y el trayecto libre de obstáculos requerido para unas pérdidas de difracción cero, h_{req} , como se observa en las ecuaciones (22) a (28).

$$h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e}\right)d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e}\right)d_1}{d} \quad (22)$$

$$d_1 = \frac{d(1+b)}{2} \quad (23)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (24)$$

$$b = 2 \left(\frac{m+1}{3m}\right)^{1/2} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \left(\frac{3m}{(m+1)^3} \right)^{1/2} \right) \right\} \quad (25)$$

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (26)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (27)$$

$$h_{req} = 0,552 \left(\frac{d_1 d_2 \lambda}{d} \right)^{1/2} \quad (28)$$

Si $h > h_{req}$ las pérdidas de difracción para el trayecto son cero y no se necesitan más cálculos; en caso contrario, se calcula el radio ficticio de la Tierra modificado, a_{em} , que proporciona la visibilidad directa marginal a la distancia d , tal como se ilustra en la ecuación (29).

$$a_{em} = 0,5 \left(\frac{d}{h_1^{1/2} + h_2^{1/2}} \right)^2 \quad (29)$$

Se calculan nuevamente las pérdidas por el método pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte, utilizando el radio ficticio de la Tierra modificado a_{em} en vez del radio ficticio de la Tierra a_e , y a estas pérdidas se les denomina A_h . Si A_h es negativo, las pérdidas de difracción en el trayecto son cero y no

son necesarios más cálculos; en caso contrario, se calculan las pérdidas de difracción interpoladas, mediante la ecuación (30).

$$A = \left[1 - \frac{h}{h_{req}} \right] A_h \quad (30)$$

3.2.7 Modelo de Difracción sobre obstáculos aislados o sobre un trayecto terrenal general

La recomendación presenta cinco posibles casos de análisis: Obstáculo único en arista en filo de cuchillo, obstáculo único de forma redondeada, dos aristas aisladas, cilindros múltiples aislados, método para un trayecto terrenal general. A continuación, se presentan los tres primeros casos, entendiéndose que los demás son consecuencia de la aplicación de los primeros en cascada.

1. *Obstáculo único en arista en filo de cuchillo.* En este caso todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro, designado por v y que se puede calcular alguna de las ecuaciones (31) a (34).

$$v = h \left(\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right)^{1/2} \quad (31)$$

$$v = \theta \left(\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \right)^{1/2} \quad (32)$$

$$v = \left(\frac{2h\theta}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (33)$$

$$v = \left(\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2 \right)^{1/2} \quad (34)$$

Donde, h : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea, h es negativa, d_1 y d_2 : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo, d : longitud del trayecto, θ : ángulo de difracción (rad); tiene el mismo signo que h . Se supone que el ángulo θ es inferior a unos 0,2 rad, o sea, aproximadamente 12°, α_1 y α_2 : ángulos en radianes bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto; tienen el mismo signo que h en las ecuaciones anteriores, lo anterior se puede observar en la Figura 10.

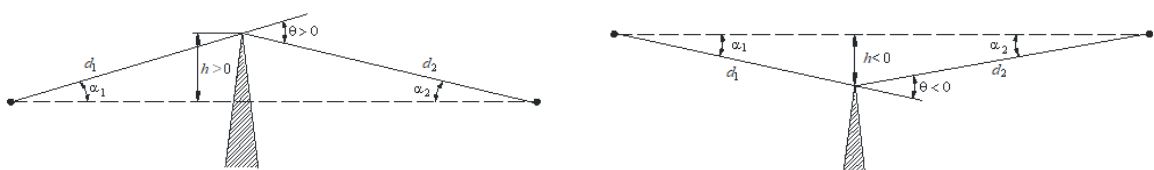


Figura 10. Elementos geográficos

Las pérdidas vienen dadas por la ecuación (35).

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{([1-C(v)-S(v)]^2 + [C(v)-S(v)]^2)^{1/2}}{2} \right) \quad (35)$$

Donde $C(v)$ y $S(v)$ son las partes real e imaginaria respectivamente de la integral compleja de Fresnel $F(v)$

2. *Obstáculo único de forma redondeada.* La pérdida por difracción puede calcularse con la ecuación (36).

$$A = J(v) + T(m, n) \quad (36)$$

Donde $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo y tiene relación con las ecuaciones (37) a (40).

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn \leq 4 \quad (37)$$

$$T(m, n) = -6 - 20\log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn > 4 \quad (38)$$

$$m = R \frac{\left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right]}{\left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3}} \quad (39)$$

$$n = \frac{h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3}}{R} \quad (40)$$

El radio de curvatura del obstáculo corresponde al radio de curvatura del vértice de una parábola ajustada con respecto al perfil del obstáculo cerca de la parte superior

3. *Dos aristas aisladas.* En este caso, la pérdida por difracción se calcula aplicando sucesivamente el método de difracción en arista de filo de cuchillo o el método de difracción en formas redondeadas a los dos obstáculos; la parte superior del primer obstáculo actúa como fuente de difracción sobre el segundo. La pérdida por difracción total se calcula a partir de la ecuación (41).

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad (41)$$

L_c corresponde a un término de corrección por la separación entre las aristas calculado con la ecuación (42) y ejemplificado en la Figura 11.

$$L_c = 10\log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (42)$$

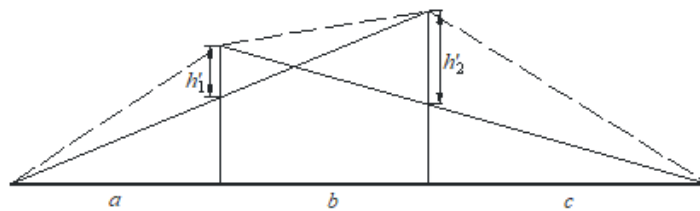


Figura 11. Método para dos aristas aisladas

4. CONCLUSIONES

Es evidente que es necesario hacer mediciones en territorio colombiano para obtener curvas como las presentadas en la recomendación 1546-6, específicamente para mares como el pacífico y el caribe ya que estos presentan características diferentes al mar del norte y al mar mediterráneo (Tabla 2).

Tabla 2. Rango de temperatura de los mares [8]

Mar	Temperatura (°C)
Pacífico	10 a 31
Caribe	27 a 30
Norte	10 a 17
Mediterráneo	20 a 26

También se evidencia la necesidad de hacer mediciones para frecuencias superiores a 2 GHz, lo anterior debido a que la extrapolación para frecuencias superiores a las que se usaron para hacer las curvas va a ser menos exacta que la interpolación para frecuencias que estén entre 100 MHz y 2 GHz.

Para hacer una predicción cercana a la realidad se deben usar las dos recomendaciones tratadas en este artículo, la recomendación 1546-6 se usaría para las pérdidas debido a la distancia del enlace, altura de la antena, la frecuencia y porcentaje de tiempo, y las pérdidas debidas a los obstáculos se deberían sumar en base a lo que dice la recomendación 526-15.

REFERENCIAS

- [1] MinTIC, "Plan 5G Colombia," 2019. Recuperado: https://mintic.gov.co/portal/715/articles-118058_plan_5g_2019120.pdf
- [2] I. Rodríguez, "24 GHz cmWave Radio Propagation Through Vegetation: Suburban Tree Clutter Attenuation", *10th European Conference on Antennas and Propagation*, Davos, Suiza, 2016.
- [3] UIT-R, "Recomendación UIT-R P.1546-6," 2019. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-!!!MSW-S.docx
- [4] UIT-R, "Recomendación UIT-R P.453-14," 2019. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-14-201908-!!!MSW-S.docx
- [5] UIT-R, "Recomendación UIT-R P.526-15," 2019. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-!!!MSW-S.docx
- [6] UIT-R, "Recomendación UIT-R P.310-10," 2019. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.310-10-201908-!!!MSW-S.docx
- [7] XirioOnline, "Métodos de cálculo," 2021. Recuperado: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm>
- [8] temperaturadelmar.es, "Temperatura de los mares y océano del mundo," 2021. Recuperado: <https://www.temperaturadelmar.es/mares-y-oceanos/>

Simulación de cobertura de modelos de canal en la frecuencia de 26 GHz para una red móvil 5G

Javier Enrique Arévalo Peña¹

Fundación Universidad Autónoma de Colombia
Colombia

El presente trabajo tiene como propósito presentar los resultados de investigación en la comparación de modelos de canal para redes 5G en frecuencias de ondas milimétricas, aplicables en la ciudad de Bogotá, Colombia, efectuando simulaciones en el programa Xirio Online. Se presenta una descripción detallada del proceso de simulación en el escenario de estudio y se emplea los métodos New York University, 3GPP TR 38.901, mmMAGIC, METIS y 5GCM en un área urbana, obteniendo resultados en un sector de una estación base y tres sectores de la estación. Las comparaciones de los métodos observan comportamientos idénticos en los resultados de las simulaciones con cubrimientos adecuados para ofrecer servicios móviles 5G.

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Telecomunicaciones Móviles y Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones. Investigador y profesor de planta tiempo completo.
Contacto: javier.arevalo@fuac.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología 5G tiene la perspectiva de mejorar la experiencia de conectividad de los usuarios finales, ofreciéndoles nuevas aplicaciones y servicios capaces de alcanzar velocidades de varios gigabits, así como de incrementar significativamente la calidad de funcionamiento y la fiabilidad [1]. Esta tecnología es la continuación de la evolución de las redes móviles 2G, 3G y 4G, que han transformado las telecomunicaciones, dando soporte a nuevos servicios y modelos comerciales [2]. Las redes 5G ofrecen la oportunidad de trascender la prestación de servicios de conectividad y desarrollar soluciones para los consumidores y la industria en una amplia gama de sectores a un costo asequible para todos [3].

La tecnología 5G es definida en un conjunto de especificaciones estandarizadas que se acuerdan por organismos internacionales especialmente por el 3GPP y por la UIT, que específicamente esboza criterios específicos para las IMT-2020, comúnmente consideradas como 5G, que admiten los siguientes casos de uso: banda ancha móvil mejorada, comunicaciones ultra confiables de baja latencia, comunicaciones masivas tipo máquina y acceso inalámbrico fijo [4]. Es decir, la tecnología 5G puede ofrecer un rango de capacidades mucho más amplio desde el comienzo que cualquier generación anterior de tecnología móvil a tal punto tal que llegara a ser esencial para la cuarta revolución industrial, donde se espera que habilite muchos de los componentes de esta revolución, incluyendo la Internet de las Cosas, la computación en la nube, los sistemas ciberfísicos, la computación cognitiva, la producción industrial automatizada, los automóviles sin conductor y una amplia variedad de máquinas y sensores conectados [5].

A medida que la tecnología 5G se expanda desde las frecuencias por debajo de los 6 GHz a ondas milimétricas, la densificación de la red resultante y el MIMO masivo crearán un acceso de ultra alta velocidad. Las tecnologías de ondas milimétricas (mmWave) logran una mayor velocidad de datos y mayor ancho de banda, pero tienen el inconveniente de presentar dificultades de propagación lo que conlleva menor cobertura, de tal manera, que los dispositivos móviles de usuario como los teléfonos inteligentes de próxima generación, requerirán ampliar su ganancia de antena a través de la técnica *beamforming* para mitigar las pérdidas por propagación [6]. Por otro lado, los arreglos de antenas, transceptores, filtros y dispositivos similares son tan pequeños que todo el circuito se integrará en un paquete muy compacto [7].

Una de las principales ventajas de la tecnología de comunicación de onda milimétrica es la gran cantidad de ancho de banda espectral disponible, actualmente en frecuencias entre los 30 GHz y 100 GHz. Ese ancho de banda permite enlaces inalámbricos de onda milimétrica que pueden alcanzar capacidades de hasta 10 Gbps en configuración full dúplex, lo que hace improbable que sean compatibles con cualquier tecnología inalámbrica que opere en una menor frecuencia [8].

Entre los aspectos tecnológicos que se proyecta con la implementación de las redes 5G están: arquitectura centrada en el dispositivo, configuración MIMO masivo, transmisión en frecuencias de ondas milimétricas, dispositivos inteligentes y soporte de comunicación máquina a máquina. Adicionalmente, uno de los aspectos en la tecnología 5G es la arquitectura enfocada en los dispositivos, con lo cual, las redes buscarían generar un conjunto de subredes aumentando su cobertura y maximizando su velocidad de conexión [9].

Una de las bandas de las ondas milimétricas que permitirá alcanzar las elevadas velocidades y las bajas latencias previstas para el despliegue de la red 5G es la banda de 26 GHz que actualmente ya ha sido licitada en algunos países para el servicio 5G [10].

2. MARCO CONCEPTUAL

El modelamiento del canal inalámbrico básicamente predice el nivel de señal recibido a una distancia específica del transmisor, así como la variación de la señal recibida en la vecindad de cierto punto en un sistema de comunicaciones [11]. El desempeño de los modelos de canal es determinado por la confiabilidad de los resultados obtenidos de las consideraciones teóricas y simulaciones comparadas con las mediciones reales en campo. La aplicabilidad de un modelo depende de varios factores incluyendo el tipo de terreno, el ambiente de propagación, las características atmosféricas, las propiedades eléctricas del suelo y el tipo de materiales de las construcciones urbanas, entre otros [12].

El Geometric Based Stochastic Model GBSM se clasifica en Regular Shaped RS GBSM y en Irregular Shaped IS GBSM. En RS GBSM se asumen dispersores de formas regulares con un anillo, dos anillos, elipses, cilindros y otros, y en IS GBSM se emplean dispersores de formas irregulares. En general, este modelo ampliamente aplicado a diferentes escenarios ha sido utilizado en propuestas de modelos de canal presentadas por varias organizaciones internacionales y grupos de investigación para frecuencias de ondas milimétricas, entre los que se puede nombrar las siguientes [13]:

- *The 3rd Generation Partnership Project (3GPP Technical Report 38.901)*. Provee modelos de canal de 0.5 GHz a 100 GHz, y es una referencia internacional sobre el estándar 5G. El modelo soporta características de elevación angular y azimut en varios escenarios como Urban Macro UMa, Urban Micro UMi, Device-to-Device D2D, Vehicular-to-Vehicular V2V e interiores, entre otras [14, 15].
- *5G Channel Model 5GCM*. Es un grupo de 15 compañías y universidades que desarrolla modelos con base en medidas del TR 38.900 del 3GPP. Se basa en medidas realizadas en 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz y 73 GHz e incluye canales de banda angosta y ancha. El modelo considera diferentes escenarios interiores y exteriores con un énfasis en acceso móvil para servicios MMB (mmWave Mobil Broadband) [16].
- *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society METIS*. Es un extenso proyecto de investigación financiado por la Unión Europea que fue basado en los modelos anteriores de canal WINNER II [17] y WINNER+ [18]. El proyecto METIS propuso un modelo estocástico para frecuencias de hasta 70 GHz y un modelo Map-Based, presentado anteriormente, aplicable hasta los 100 GHz, además de modelos híbridos. Se aplica a un amplio rango de escenarios interiores y exteriores, como UMa, UMi, D2D, V2V, rural, carreteras, interior centros comerciales, oficinas [19, 20].
- *Millimeter-Wave Based Mobile Radio Access Network for 5G Integrated Communications mMAGIC*. Es otro extenso proyecto de investigación financiado por la Unión Europea bajo la iniciativa 5G Partnership agrupando a importantes aportes de empresas del sector industrial. Toma en cuenta los principales cambios en los sistemas móviles para soportar redes densas con alto grado de flexibilidad y desempeño recorriendo frecuencias desde los 6 GHz hasta los 100 GHz [21].
- *NYU WIRELESS Model*. Es un proyecto de la Universidad de Nueva York en la NYU Tandon School of Engineering basado en el modelo 3GPP TR 38.901 que emplea una base de datos de información del centro de la ciudad de Nueva York caracterizándose por sus resultados más realistas para escenarios urbanos [22, 23].

Las bandas identificadas para hacer el despliegue de las redes 5G se encuentran en las frecuencias de 24,25-27,5 GHz, 37-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47,2- 48,2 y 66-71 GHz y el procedimiento de prueba y los estándares para dispositivos 5G siguen siendo investigados por los órganos de gobierno y los consorcios [24].

3. MÉTODO

Para realizar la simulación de cobertura de la red 5G para se emplea el simulador en línea gratuito Xirio Online [25]. Inicialmente, se debe registrar un usuario y un correo electrónico de acuerdo con las indicaciones de la página para poder utilizar la herramienta específicamente en la opción del lado izquierdo donde se encuentre Planning Tool, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Presentación plataforma XIRIO Online

Después de completar el registro, se ingresa al simulador y se selecciona el área a evaluar ya que el mapa utiliza la interfaz de *Google Maps*, se podrá obtener datos más específicos de acuerdo con el relieve y otras capas de alturas y se procede a crear un estudio seleccionando la primera carpeta del lado izquierdo de la pantalla como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Vista cartografía interfaz Xirio Online

Luego, se despliega una nueva ventana donde se seleccionará el tipo de estudio a realizar, el servicio o tecnología en esta se elige categoría, subcategoría y servicio. En el estudio a realizar el tipo de estudio es *Cobertura*, la categoría es *Servicios Móviles*, subcategoría *5G* y Servicio *5G*. Luego se selecciona la opción *Modo asistente* como se indica en la Figura 3.



Figura 3. Selección tecnología en Xirio Online

En seguida aparecerá la ventana de nombre y descripción, se le dará nombre al estudio de Localidad Candelaria 5G, el servicio es 5G, debido a que Xirio Online configura automáticamente parámetros por defecto para todos los elementos del estudio de acuerdo con el servicio radioeléctrico seleccionado como se muestra en la Figura 4.

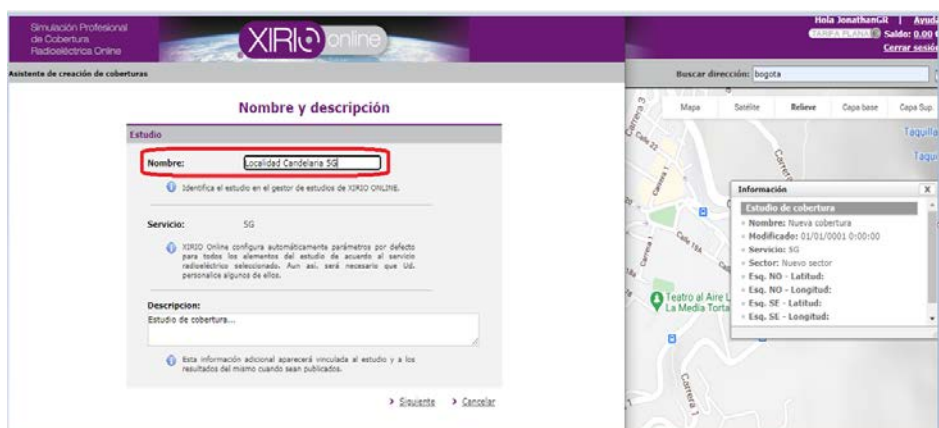


Figura 4. Selección nombre del estudio y descripción de simulación

Luego se selecciona *Siguiente*, para mostrar como aparece en la Figura 5 una ventana donde se da nombre del sector como Plazoleta del Rosario y se identifica a este como el transmisor en el simulador. A continuación, se realiza la ubicación geográfica del transmisor introduciendo directamente las coordenadas geográficas (longitud y latitud). También se puede introducir coordenadas UTM (Datum WGS84) mediante la calculadora de coordenadas o ubicar el transmisor pinchando directamente sobre el visor con el icono correspondiente. El estudio se ubicará en un edificio cercano a la Plazoleta del Rosario en Bogotá.

Figura 5. Nombre y ubicación del sector para simulación

Enseguida se selecciona *Siguiente* y aparece si se quiere sectorizar la simulación, en este caso se realizará el estudio de forma omnidireccional, y se pulsa de nuevo *Siguiente* como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Sectorización de transmisor para simulación

En la siguiente interfaz, mostrada en la Figura 7, se ubica los parámetros del transmisor que son configurados automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio, en el estudio se utilizara el tipo de sistema estándar.

Figura 7. Configuración de parámetros del sector para simulación

Posteriormente, como lo muestra la Figura 8, los parámetros de terminal o recepción son configurados automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio, al igual que los parámetros del sector de transmisión se emplearán los valores estándar.

Configuración de parámetros del terminal

Ayuda ?

Parámetros del terminal

1 Los parámetros de recepción se han configurado automáticamente para el servicio radioeléctrico del estudio. Es conveniente que revise y personalice los mismos.

Antena: 3G/4G 2 dBi Omni

Altura antena: 1.5 m

Frecuencias de transmisión:

Polarización: Vertical

Feeder:

Longitud del feeder: 0 m

Pérdidas del feeder: 0.00 dB

Pérdidas pasivos: 3 dB

Potencia de transmisión: 23 dBm

[< Anterior](#) [> Siguiente](#) [> Cancelar](#)

Figura 8. Configuración de parámetros del terminal para simulación

En seguida, se contempla la interfaz de selección de cartografía del estudio y método de cálculo. Estos métodos de cálculo se basan en normativa internacional y recomendaciones de organismos oficiales como la ITU. Cada método de cálculo modela la propagación de la señal radioeléctrica, para el caso de la Figura 9, está configurado predeterminadamente en el método New York University. Para los resultados que se van a mostrar más adelante se utilizarán los métodos New York University, 5GCM, 3GPP TR 38.901, mmMagic y METIS estocástico que puede ser seleccionados como se muestra en la Figura 10.

Selección de cartografía del estudio y método de cálculo

Ayuda ?

Parámetros de cálculo

1 Los parámetros 4G engloban un conjunto de variables que intervienen en el cálculo de las pérdidas de propagación. XIRIO ONLINE configura automáticamente estos parámetros por defecto en función del servicio radioeléctrico seleccionado. Aun así, será necesario que Ud. personalice algunos de ellos.

2 El método de cálculo se basa en normativa internacional y recomendaciones de organismos oficiales como la ITU y modela la propagación de la señal radioeléctrica. Es seleccionado automáticamente en función del servicio del estudio para su empleo en un entorno rural, por ello conviene revisarlo y personalizarlo teniendo en cuenta la cartografía que desea utilizar.

Método de cálculo: Nuevo New York University

Capas de cartografía:

Tipo	Nombre	Año	Res. (m)	Proveedor
MDT	Altimetría mundial	2006	100.00	Aplica

1 Seleccione las capas de cartografía digital con las que realizará los cálculos de cobertura, dispone de un amplio catálogo de cartografía desde modelos de extensión mundial a precisos modelos de elevación de edificios en ciudades.

[< Anterior](#) [> Siguiente](#) [> Cancelar](#)

Figura 9. Selección de cartografía del estudio y método de cálculo para simulación

Propiedades del Método de Cálculo

Método de cálculo

Nombre: Nuevo New York University

Método de propagación: New York University

Resolución: Rec. UIT-R P.526-11 Deygout m/pixel

Limitar la distancia

Límite: Línea de vista m

Parámetros básicos

Cálculo automático

Factor K: Rec. UIT-R P.1411-9 Okumura-Hata Modificado Stanford University Interim Rec. UIT-R P.526-13 5GCM 3GPP TR 38.901 METIS estocástico mmMAGIC dB

Margen de desvanecimiento: New York University Longley-Rice

Propiedades de New York University

Dependencia con la altura de antena de estación base: Sin dependencia

Figura 10. Propiedades del método de cálculo para simulación

Inmediatamente al seleccionar el tipo de método a implementar, en la siguiente interfaz se configura el área de cálculo a evaluar la señal de transmisión como se presenta en la Figura 11. Al terminar se oprime *Siguiente*.

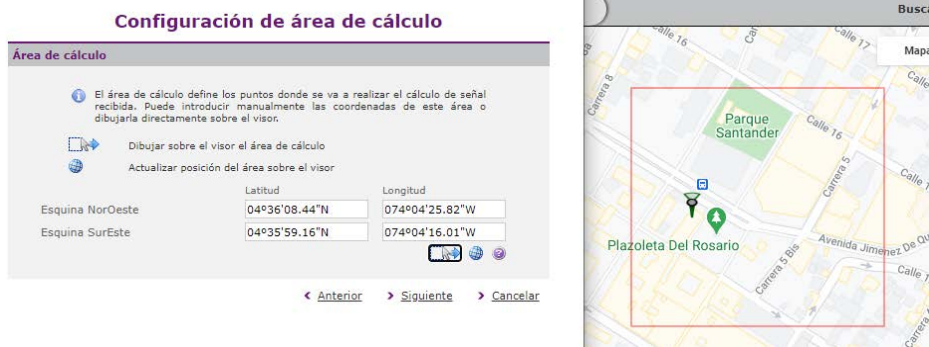


Figura 11. Configuración de área de cálculo para simulación

Luego se muestra una interfaz para la configuración de los rangos de señal, indicado en la Figura 12. Estos son los rangos que indican los niveles del estudio de cobertura donde se presentan como una huella de transparencia formada por múltiples colores los cuales representan el nivel de señal de potencia disponible en cada punto.



Figura 12. Configuración de los rangos de señal dentro de las simulaciones

En la última interfaz se procede con la generación de cobertura para finalizar. En seguida se selecciona *Configurar Estudio* para establecer parámetros que permita realizar la simulación con la asignación de banda y frecuencia de transmisión, es decir en 26 GHz, por lo que se utiliza la banda *n258* según la organización 3GPP que estable un espectro de banda para ciertas frecuencias con la especificación 3GPP 38.101-1. Se despliega una ventana donde indica las propiedades del estudio de cobertura se da clic en banda, se abre una interfaz de propiedades de la banda de frecuencias donde se le da el nombre de *n258* y se configura los parámetros de la banda como se muestre en la Figura 13 y en la Figura 14.

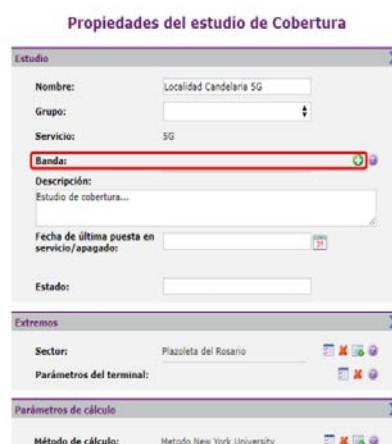


Figura 13. Propiedades del estudio de cobertura para simulación

Propiedades de la Banda de Frecuencias

Banda ☆

Nombre:

Descripción 1:

Descripción 2:

Parámetros de la Banda

Separación entre portadoras: MHz

Ordinal del primer canal:

Tramo inferior:

Frecuencia inicial: GHz

Frecuencia final: GHz

Frecuencia primera portadora: GHz

Tramo superior:

Frecuencia inicial: MHz

Frecuencia final: MHz

Frecuencia primera portadora: MHz

Canales prohibidos:

Canales prioritarios:

Introduzca una lista de canales separados por comas y/o intervalos de canales (Ejemplo: 2, 2', 5-7, 12'-21').

Figura 14. Propiedades de la banda de frecuencias para simulación

Luego de asignar la banda de frecuencia de operación se procede con la configuración de parámetros de la antena de transmisión, se selecciona sector y se observan sus propiedades. Se debe cambiar la frecuencia de transmisión, la configuración de slots y la numerología. Para la estimación individual de cobertura se aplican los cambios y se aceptan como se presenta en la Figuras 15, 16 y 17.

Propiedades del estudio de Cobertura

Estudio

Nombre:

Grupo:

Servicio:

Banda:

Descripción:

Fecha de última puesta en servicio/apagado:

Estado:

Extremos

Sector:

Parámetros del terminal:

Parámetros de cálculo

Método de cálculo:

Figura 15. Propiedades del estudio de cobertura por sector

Propiedades del sector

Sector

Nombre:

Emplazamiento

Emplazamiento:

Coordenadas

Latitud:

Longitud:

Parámetros de radio

Las frecuencias centrales de los canales han cambiado. Por favor, revise la lista de frecuencias de transmisión.

Tipo sistema:

Antena:

Altura antena: m

Orientación:

Inclinación mecánica:

Inclinación eléctrica:

Referencia de alturas de antenas

Alturas respecto a:

Usar altura de edificio:

Altura edificio: m

Frecuencias de transmisión

Frecuencias	Canal
3500.000 MHz	

Polarización:

Feeder:

Longitud del feeder: m

Pérdidas del feeder: dB

Pérdidas pasivos: dB

Potencia: W

Parámetros 5G

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/cobertura de toda la red 5G.

Planificador:

Configuración de slots:

Numerología (μ):

Considerar ICIC en la estación

Umbral borde de celda: dB

Parámetros downlink:

Carga de tráfico: %

MIMO DL:

SINR mínima para MIMO: dB

Tipo de ganancia MIMO: Fijo

Variable

Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO DL:

Parámetros Uplink:

Incremento de ruido: dB

Factor de ruido: dB

Alpha (control de potencia):

PO (control de potencia): dBm

MIMO UL:

Tipo de ganancia MIMO UL: Fijo

Variable

Curva de eficiencia espectral

Ganancia MIMO UL:

Figura 16. Propiedades del sector para simulación

Frecuencias de transmisión

Frecuencias	Canal
25.050 GHz	4

Polarización: Vertical

Feeder:

Longitud del feeder: m

Pérdidas del feeder: dB

Pérdidas pasivos: dB

Potencia: W

Parámetros 5G

Los siguientes parámetros son específicos para la realización de la estimación individual de cobertura. No se aplicarán al realizar un análisis detallado de capacidad/coertura de toda la red 5G.

Planificador:

Configuración de slots:

Numerología (μ):

Considerar ICIC en la estación

Umbral borde de celda: dB

Parámetros downlink:

Carga de tráfico: %

MIMO DL:

SINR mínima para MIMO: dB

Tipo de ganancia MIMO: Fija

Figura 17. Propiedades del sector configurado con parámetros 5G

Después de las configuraciones anteriores, se selecciona *calcular estudio* para obtener resultados de la simulación, como lo muestra la Figura 18.

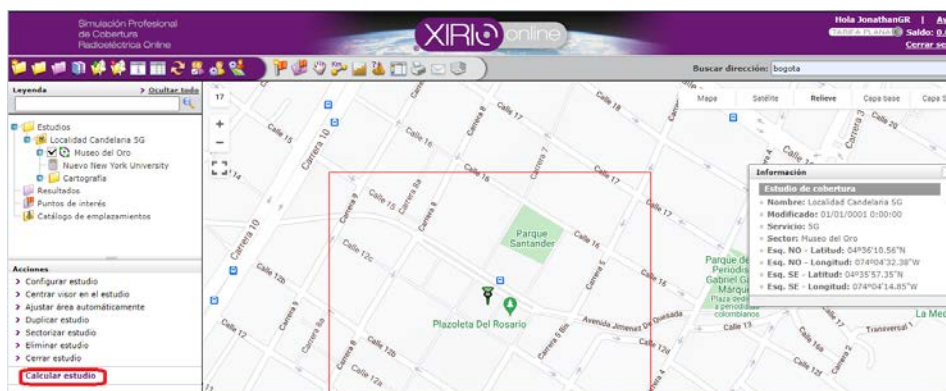


Figura 18. Selección de cálculo de estudio para simulación

El siguiente paso consiste en sectorizar la celda a 120°, es decir, generar 3 sectores para el sitio de la estación base para cada uno métodos estudiados. La opción se encuentra del lado izquierdo del menú como se observa en la Figura 19.

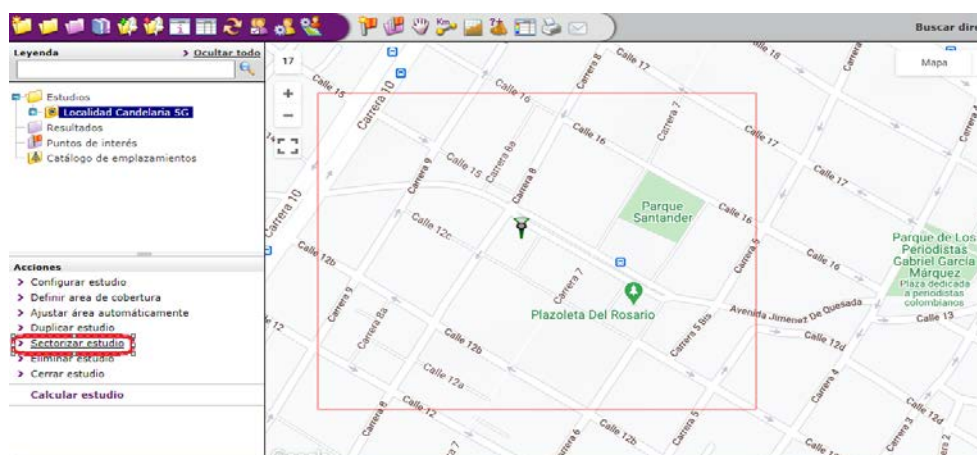


Figura 19. Sectorización de estudio para simulación

Después emergerá una ventana indicando los parámetros para sectorizar la simulación, como el número de sectores en este caso de 3 sectores de 120°. Al seleccionar el número de sectores el simulador automáticamente asigna los ángulos de forma simétrica como se muestra en las Figuras 20 y 21.

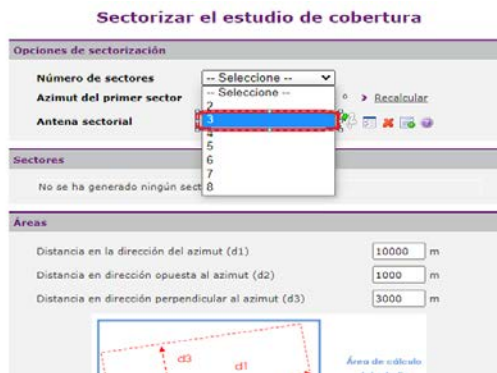


Figura 20. Parámetros para establecer la opción de sectorización

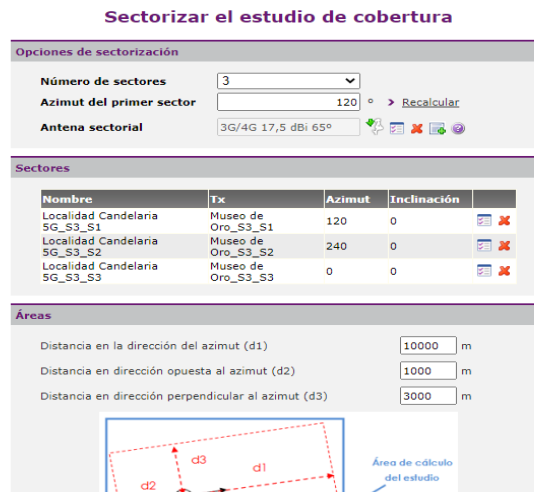


Figura 21. Parámetros para sectorizar el estudio

Para finalizar ya quedan configurados los sectores para la simulación de cobertura como lo muestra la Figura 22.

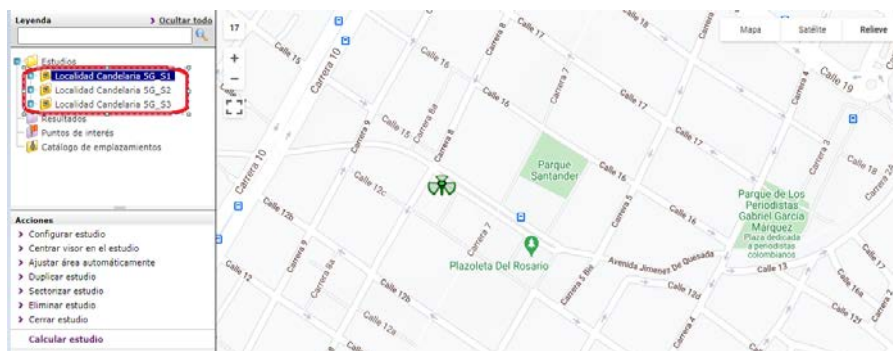


Figura 22. Simulación de estudio sectorizado

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de simulación siguen los pasos descritos en la sección anterior respecto al procedimiento metodológico. Primero se presentan los resultados con el sitio de estación base con solo un sector y luego con el sitio de estación base sectorizado a 120°.

4.1 Resultados simulación de cobertura en un solo sector en 26 GHz.

En la Figura 23 se presenta el resultado de simulación para un solo sector con el método New York, en la Figura 24 el resultado de simulación con el modelo 3GPP TR 38.901, en la Figura 25 el resultado de simulación con el modelo mmMAGIC, en la Figura 26 el resultado de simulación con el modelo METIS y en la Figura 27 el resultado de simulación con el modelo 5GCM.



Figura 23. Resultados simulación en un solo sector con método New York University

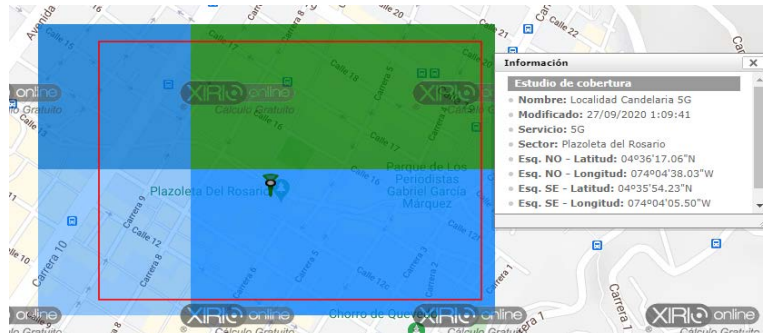


Figura 24. Resultados simulación en un solo sector con método 3GPP TR 38.901

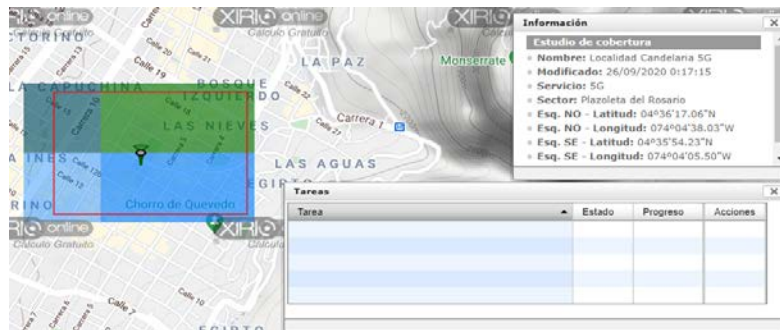


Figura 25. Resultados simulación en un solo sector con método mmMAGIC

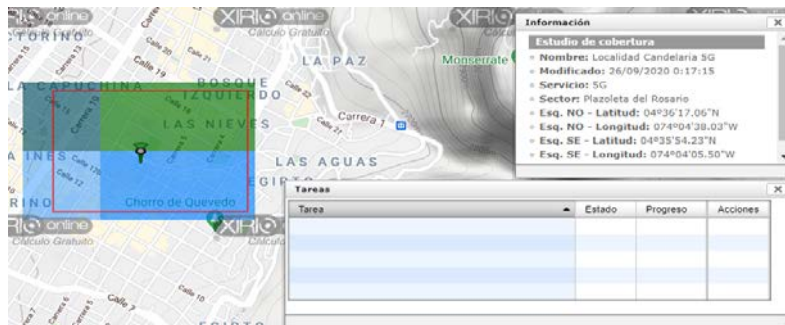


Figura 26. Resultados simulación en un solo sector con método METIS

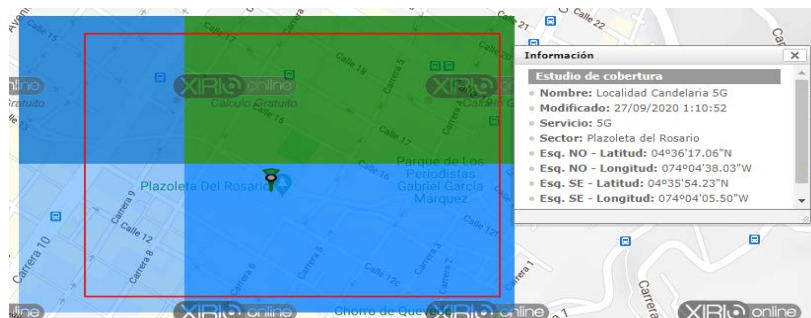


Figura 27. Resultados simulación en un solo sector con método 5GCM

Todos los resultados de las simulaciones para un solo sector muestran un aspecto idéntico con zonas de cobertura similares por lo que no se puede establecer un factor diferenciador entre cada una de las simulaciones.

4.2 Resultados simulación cobertura con tres sectores en 26 GHz

En la Figura 28 se presenta el resultado de simulación con los tres sectores con el método New York, en la Figura 29 el resultado de simulación con el modelo 3GPP TR 38.901, en la Figura 30 el resultado de simulación con el modelo mmMAGIC, en la Figura 31 el resultado de simulación con el modelo METIS y en la Figura 32 el resultado de simulación con el modelo 5GCM.

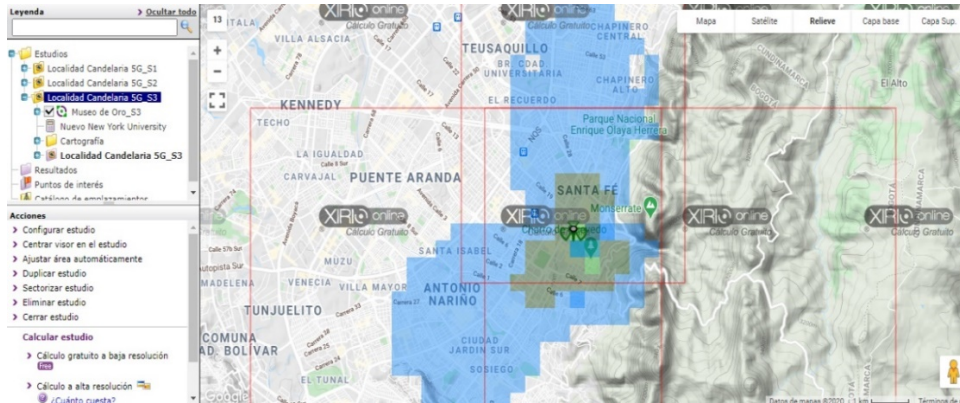


Figura 28. Resultados simulación con tres sectores con método New York University

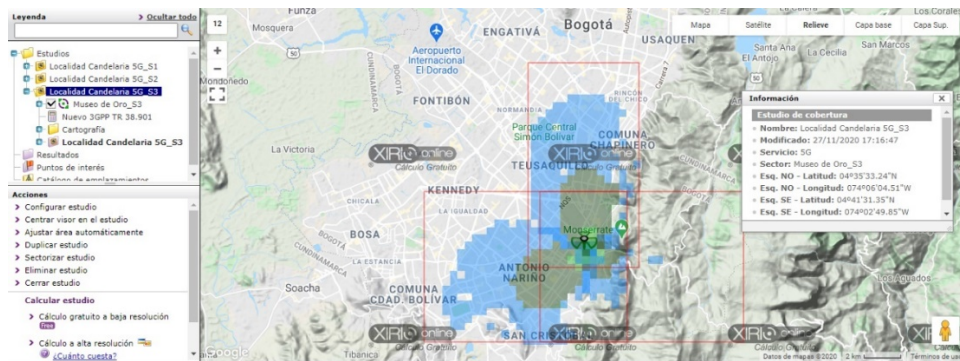


Figura 29. Resultados simulación con tres sectores con método 3GPP TR 38.901

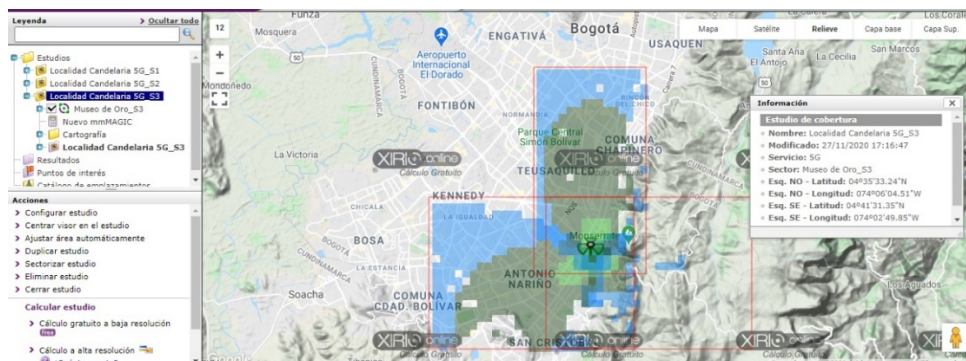


Figura 30. Resultados simulación con tres sectores con método mmMAGIC



Figura 31. Resultados simulación con tres sectores con método METIS

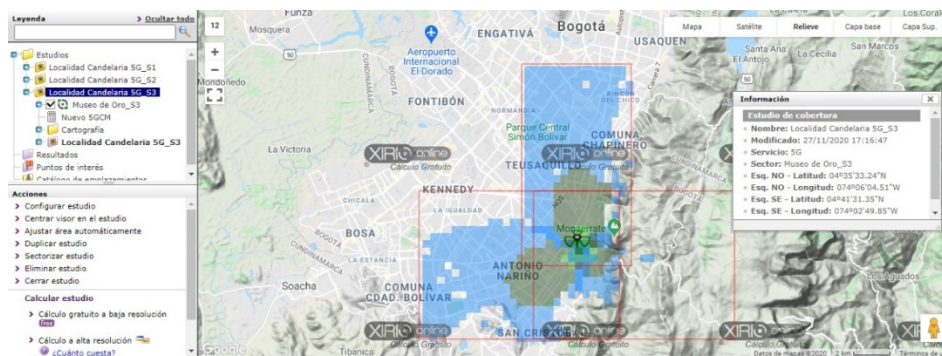


Figura 32. Resultados simulación con tres sectores con método 5GCM

Al igual que los resultados de las simulaciones para un solo sector los resultados de simulación con tres sectores muestran un aspecto idéntico con zonas de cobertura similares por lo tampoco es posible establecer en este caso un factor diferenciador entre cada una de las simulaciones. Las zonas de cobertura permiten observar que se estará prestando servicio en un área extensa en cada uno de los modelos simulados.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se llevó a cabo una revisión de algunos modelos de canal desarrollados para el diseño de las redes 5G ejecutando simulaciones de cobertura en el software Xirio Online y analizando los resultados de las simulaciones para evidenciar el desempeño en las frecuencias de ondas milimétricas de 26 GHz en un área urbana de Bogotá D.C.

La comparación de los métodos New York University, 3GPP TR 38.901, mmMAGIC, METIS y 5GCM observaron resultados idénticos por lo que no fue posible establecer diferencias de cobertura entre ellos. Sin embargo, se evidencia niveles de cobertura satisfactorios en todos los casos.

Como trabajo futuro se espera continuar con los resultados de simulación en otras frecuencias de ondas milimétricas especialmente en los rangos de 24 GHz a 52 GHz que ya han sido determinadas por las organizaciones internacionales para el despliegue de las redes 5 G.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al Sistema Unificado de Investigaciones SUI de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia por el apoyo financiero para obtener los resultados de investigación de este trabajo, y a los ingenieros electrónicos Juliette Paola Gutiérrez Méndez y Jonathan Enrique González Rojas por su colaboración operativa en el desarrollo del proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Osseiran, J. F. Monserrat y P. Marsch, "5G Mobile and Wireless Communications Technology", Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, 5G NR The Next Generation Wireless Access Technology, *Chennai: Elsevier*, 2018.
- [3] S. Z. Asif, "5G Mobile Communications Concepts and Technologies", Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [4] W. Xiang, K. Zheng and X. Shen, "5G Mobile Communications", Suiza: Springer, 2017.
- [5] MinTIC, "Plan 5G," 26 Junio 2019. Recuperado: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-101369_plan_5g_v20190712.pdf
- [6] T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr., R. C. Daniels y J. N. Murdock, "Millimeter Wave Wireless Communications, Westford", Massachusetts: Prentice Hall, 2015.
- [7] 5G Americas, "The 5G Evolution 3GPP Release 16-17", 5G Americas, Washington, Tech. Rep., 2020.
- [8] 5G Americas, "3GPP Releases 16 & 17 & Beyond", 5G Americas, Washington, Tech. Rep., 2021.
- [9] M. Vaezi, Z. Ding y V. Poor, Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond, *Cham: Springer*, 2019.
- [10] ANE, "Documento de Consulta Pública sobre las Bandas de Frecuencia para 5G en Colombia", 01 Abril 2019. Recuperado: <https://www.ane.gov.co/index.php/informacion-de-interes/consulta-publica/910-consulta-publica-sobre-las-bandas-de-frecuencia-para-5g-en-colombia>

- [11] T. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice", New Jersey: Prentice Hall, 2009.
- [12] T. S. Rappaport, S. Sun and M. Shafi, "5G Channel Model with Improved Accuracy and Efficiency in mmWave Bands," *IEEE 5G Tech Focus*, New York, 2017.
- [13] S. Sun, T. S. Rappaport, M. Shafi, P. Tang, J. Zhang y P. J. Smith, "Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 8422-8439, 2018.
- [14] 3GPP, "Study on Channel Model for Frequency Spectrum Above 6 GHz", 3rd Generation Partnership, Sophia Antipolis, Tech. Rep., 2017.
- [15] 3GPP, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz", 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, Tech. Rep., 2017.
- [16] 5GCM, "5G Channel Model for bands up to 100 GHz", 5GCM, Tech. Rep., 2016.
- [17] WINNER II, "Channel Models", Information Society Technologies, Tech. Rep., 2007.
- [18] WINNER+, "Final Channel Models", CELTIC Telecommunication Solutions, Tech. Rep., 2010.
- [19] METIS, "Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System", Ericsson AB, Estocolmo, Tech. Rep., 2013.
- [20] METIS, "METIS Channel Models", METIS2020, Unión Europea, Tech. Rep., 2015.
- [21] mmMAGIC, "6–100 GHz Channel Modelling for 5G: Measurement and Modelling Plans in mmMAGIC", 5G PPP mmMAGIC Project, Unión Europea, Tech. Rep., 2016.
- [22] NYU WIRELESS, "NYUSIM: The Open Source 5G Channel Model", NYU WIRELESS, New York, Tech. Rep., 2018.
- [23] T. S. Rappaport, S. Sun and M. Shafi, "Investigation and Comparison of 3GPP and NYUSIM Channel Models for 5G Wireless Communications," in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference*, Toronto, 2017.
- [24] 5G Americas, "Understanding mmWave Spectrum for 5G Networks", 5G Americas, Washington, Tech. Rep., 2020.
- [25] Aptica, "Xirio Online", 20 Noviembre 2020. Recuperado: <https://www.xirio-online.com/web/>.

Disposición final de paneles solares fotovoltaicos: Una revisión de la literatura

Diego Andrés Mora Piñeros¹

Fabián David Barreto Sánchez²

Luis Miguel Gutiérrez Piñeros³

Jorge Enrique Patarroyo Fletcher⁴

Fundación Universitaria de San Gil

Colombia

La energía alternativa se entiende como sinónimo de energía limpia, energía verde o energía renovable. Se interpreta como alternativas todos los recursos naturales y recursos inagotables, los cuales no causan contaminación cuando se realice un proceso de producción [1]. La energía solar se define como la que se obtiene de la radiación solar. La energía solar fotovoltaica más conocidas se obtiene de los paneles solares fotovoltaicos, que absorben la radiación solar y la convierten en energía eléctrica, que se almacena en baterías o se incorpora a la red de distribución. Gracias a la instalación de paneles solares, esta energía se considera la forma más sencilla de lograr un uso personal de la electricidad. También existe la energía solar termoeléctrica, que se centra en el calor generado por el sol para calentar un fluido (agua), producir vapor y accionar turbinas para generar electricidad [2]. Actualmente, todavía no se conoce una infraestructura o un conjunto de leyes que delimite y defina cómo se debe realizar la disposición final de los residuos en estos procesos, una cuestión que podría desencadenar la no-generación de oportunidades de negocio y la creación de una economía circular al no aprovecharlos adecuadamente. Si no se les da el tratamiento adecuado para su disposición final, estos elementos podrían llegar a considerarse residuos peligrosos para el planeta. Este capítulo de revisión presenta una visualización de una problemática que será más importante en las próximas dos décadas, cuando las primeras generaciones de paneles instalados concluyan sus vidas útiles y deban ser retirados de funcionamiento.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica.

Contacto: diegomora@unisangil.edu.co

² Ingeniero Electrónico y profesor de tiempo completo.

Contacto: fbarreto@unisangil.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería Electrónica.

Contacto: luisgutierrez@unisangil.edu.co

⁴ Estudiante de Ingeniería Electrónica.

Contacto: jorgepatarroyo@unisangil.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

A medida que el sector energético busca reducir su dependencia de los combustibles fósiles mediante la integración de energías renovables, la energía solar fotovoltaica seguirá en un proceso de crecimiento constante, como se ha hecho a nivel mundial en los últimos años [3], Colombia no se quedará atrás de este crecimiento, la existencia de normativas como la Ley N° 1715 de 2014. La regulación de las energías renovables no convencionales, incluida la energía solar, se ha vuelto cada vez más fácil de recibir en la matriz energética del país.

Sin embargo, esto no deja de tener consecuencias. La vida útil promedio de los paneles fotovoltaicos es de entre 20 y 25 años, por lo que los paneles solares de primera generación instalados terminarán su ciclo de vida en los próximos 20 años y lo que genera la necesidad de preparar la infraestructura técnica y reguladora para una adecuada gestión de residuos.

Actualmente, no se cuenta con un tipo de infraestructura dedicada al manejo de residuos de tecnologías de energías renovables, particularmente a paneles solares, por lo que, si no se actúa con rapidez, además del impacto que se podría generar en el medio ambiente, el país también puede perder oportunidades comerciales y de economía circular. Permita que estos desechos se vuelvan peligrosos en los vertederos sin ningún tratamiento. Por esta razón, es importante que Colombia siga los pasos de países que tienen una larga trayectoria en el uso de paneles fotovoltaicos y resolvieron con éxito esta problemática [4].

2. MÉTODO

La metodología implementada en este capítulo de revisión se estableció con base en una búsqueda de artículos del ámbito de revisión y artículos de investigación, los cuales se citarán a lo largo de este trabajo. Los métodos de búsqueda principales fueron la navegación por la red con buscadores como *Google Scholar*, entre otros, para obtener una visión global de los avances en esta problemática, se realizan la exploración en buscadores como *IEEEEXPLORE*, *Springer*, *Science Direct* y *Scopus*, dentro del ámbito regional y nacional se exploró en buscadores como *Redalyc*, *SciELO*, *Dialnet*, entre otros, pero se utilizó como buscador principal la base de datos *SciELO*, se implementó la búsqueda avanzada que ofrece estas bases de datos y se realizaron búsqueda de los principales aportes de las diferentes técnicas, tecnologías y definiciones legales para la disposición final de los paneles solares, se establecieron los siguientes criterios de búsqueda:

- Artículos de revisión.
- Artículos de investigación.
- Artículos que no superen 5 años de publicado.
- Artículos reconocidos por revistas de investigación y/o respaldados por una universidad establecida.
- Artículos con resultados ya implementados.
- Trabajos de grado en niveles de pregrado y posgrado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez definido la metodología implementada para la búsqueda de la bibliografía relacionado en temas de aprovechamiento de los papeles fotovoltaicos que ya hayan cumplido su vida útil, se presentan un grupo de trabajos de investigación, trabajos de grado y análisis económicos y tecnológicos que nos ayudaran a ampliar nuestra visión sobre la reutilización de estos residuos que hoy día, se han vuelto un problema ambiental y de disposición final a nivel mundial. Por este motivo se realiza este trabajo de revisión para orientar al lector con los temas mencionados en el ámbito nacional, continental y a nivel hispanoamericano.

3.1 Una mirada al futuro del reciclaje de paneles en España

Según [5], 2019 fue considerado un gran año fotovoltaico FV para España, obteniendo un récord jamás antes visto de potencia instalada tanto en plantas (con 4201 MW de nueva capacidad) como en auto consumo (con 459 MW); convirtiéndose en líder en el mercado europeo y el sexto a nivel mundial. Asimismo, la energía FV se convirtió en una fuente de poder energético mundial, siendo una de las tecnologías más

relevantes en la lucha contra el cambio climático, tal y como se evidencia con sus 40 g CO₂/kW de emisiones frente a los 1000 g CO₂/kWh que emite el carbón. Sin embargo, las emisiones FV no deben ser despreciadas solamente porque sean mucho menores a las provenientes de las energías fósiles. Es por esto por lo que, que realizar una revisión al ciclo de vida de los módulos FV es de vital importancia, ya que la creación de estos paneles solares es la responsable de la mayoría de las emisiones (60-70 %). Precisamente, el reciclado de módulos FV surge como solución para reducir el impacto medioambiental de la industria FV, a la vez que las materias primas para la producción FV quedan aseguradas [6].

Teniendo en cuenta lo anterior planteado se realizar una visión acertada respecto a una industria de reciclaje particularmente en España, la cantidad en masa de módulos FV que llegaran al final de su vida útil en los próximos años ha sido calculada. Para ello, se necesita la relación entre la masa de los módulos y la potencia instalada cada año. Esto se debe a que, la potencia instalada anual es el dato más preciso que se tiene en relación con el incremento de paneles fotovoltaicos en España de forma anual.

Cada año se evidencia la continua mejora en eficiencia y costo material de los paneles fotovoltaicos, la relación media entre potencia y masa está decayendo progresivamente con el paso de los años [6]. Con el objetivo de calcular esta relación mediante, que expresa el decaimiento exponencial de la relación entre masa y potencia instalada en el año, tal y como se muestra en la Figura 1.

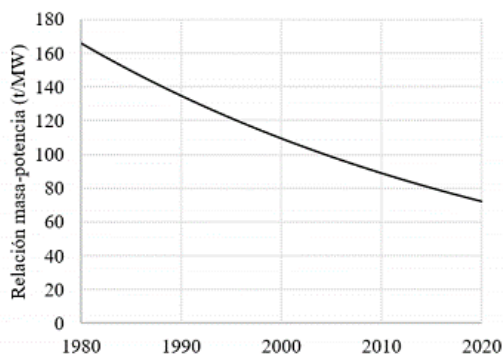


Figura 1. Relación entre la masa y la potencia con el paso de los años debida a la mejora de los paneles solares [6]

Según [7], realizando un ajuste de los valores medios de relación-potencia en los módulos FV con el paso de los años, obtenemos las constantes de la ecuación (1).

$$A = 1,1 * 10^{20} \frac{t}{MW} \text{ y } B = 48,24 \text{ Año} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta en cuenta las constantes encontradas, se puede calcular la relación masa-potencia instala (i) con la ecuación (2).

$$Relacionmasa - potenciasinstalada(i) = Ae^{-\frac{i}{B}} \quad (2)$$

Una vez definido los valores de la relación masa-potencia anual RMPA de la Figura 2 y los datos de la potencia instalada anualmente PIA en España [8], se obtiene como resultado de la masa de paneles solares generada anualmente MPSGA con la ecuación (3) para cada año *i*.

$$MPSGA(i) = RMPA(i) * PIA(i) \quad (3)$$

Una vez calculado estos datos, se realiza dos aproximaciones para obtener los años que se dispondrá de los módulos fotovoltaicos para su reciclaje. En la primera aproximación, los paneles solares cuentan en promedio con una vida media de 30 años, consideración común en la literatura consultada. Como segunda aproximación, los paneles tendrán una vida promedio de 20 años. Esta aproximación se debe a la consideración para el caso particular de España de los residuos solares, en el que se tienen en cuenta que el periodo de explosión fotovoltaica española en el año 2008 coincidió con la profunda transformación en la industria mundial fotovoltaica, en la que los productores tradicionales de la zonas europeas, japonesas y

estadounidenses perdieron su liderazgo frente a los productores asiáticos. Este evento se tradujo en una reducción de la vida útil de los módulos fotovoltaicos, de este evento la aproximación de una vida promedio de 20 años. Ambas aproximaciones pueden ser observadas en la Figura 2.

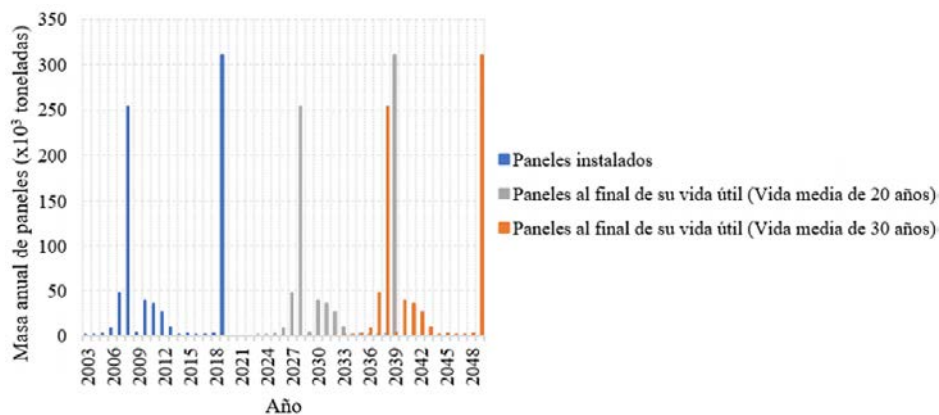


Figura 2. Análisis comparativo entre la masa de paneles solares instalados cada año y la masa de esos paneles solares cuando estén disponibles para reciclaje al final de su vida útil, para una estimación de 20 años de vida útil o de 30 años de vida útil [6]

A partir de la Figura 2, los autores concluyeron, que, con diferentes aproximaciones, aunque cambie el rango de los años de vida útil, la cantidad generada de residuos FV será irregular con el paso del tiempo. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en para el caso España, donde se observa que el máximo de la masa anual de residuos fotovoltaicos es continuo de un periodo de escasez que podrá crear problemas para una creciente industria de reciclaje.

Sin embargo, también expone como España contara con unos años en los que su masa acumulada de residuos solares superaría la de países que en la actualidad tienen una mayor capacidad fotovoltaica. Esta ventaja, no solo será reflejada en términos de economía del país, sino también aporta un incremento de investigación en países como China, el cual presenta la problemática de no contar con los suficientes residuos solares para la implementación de estudio sobre el reciclado en residuos fotovoltaico [6].

Por lo tanto, los módulos fotovoltaicos se pueden almacenar y reciclar en años en los que se reduce la producción de residuos solares. De esta forma, la industria del reciclaje no tiene que expandirse excesivamente, y la industria se beneficiará de todas las ventajas que nos brinda el volumen de desechos solares tempranos. Esta también es una estrategia más segura, porque no es necesario predecir con precisión la cantidad de paneles fotovoltaicos producidos cada año antes de que pueda implementarse. Para estudiar la viabilidad de esta solución, se calcula que el espacio relacionado con los residuos solares ocupará el sistema fotovoltaico en 2008 con la prosperidad (Figura 2), lo que equivale a una masa de 250.000 toneladas.

Para ello, obtuvieron módulos de referencia de la empresa de Aleo Solar, una de las empresas líderes en la actualidad. El tamaño del módulo es de 1660 mm x 990 mm x 50 mm y la masa es de 21 kg. Con estos datos estimaron el volumen que ocuparán nuestras 250.000 toneladas de masa, que resulta en 978.000 m³. Comparando esta cantidad con los 7 millones de metros cúbicos de capacidad que tiene el vertedero industrial de Nervo en España, observaron que sería posible el almacenamiento de esta cantidad de residuos solares [6].

3.2 Plan de manejo para disposición final de paneles solares de Energía Integral Andina S.A.

Dentro de la perspectiva de disposición que se propone en esta investigación, se encuentran el desmontaje que involucra métodos manuales y métodos térmicos, teniendo en cuenta aquellas características que producen menores costos económicos en el proceso de reciclaje. Se basa en una comparación de proyectos utilizando uno de los dos métodos mencionados anteriormente. Para el primer caso, se extrae manualmente todo el marco de aluminio para obtener vidrio convencional con células solares, la separación incluye calentar en un horno industrial durante 48 horas a una temperatura de 70°C, de manera que se

alcance el punto de fusión para el proceso de separarlo. Considerando los proyectos de 2010 a 2015, la capacidad y el diseño del horno dependerán del tamaño del panel, y hoy se utilizan y se instalan diferentes tamaños. Desde entonces, el vidrio y la celda tradicionales Solar está hecho de ventosas de plástico, lo que reduce el riesgo de contacto con los trabajadores y es fácil de operar. Estos dos tipos de residuos han ingresado al proceso interno de procesamiento y / o disposición final del personal de gestión autorizado [9]. Por tanto, la Figura 3 expone las especificaciones de cada tipo de residuo generado.

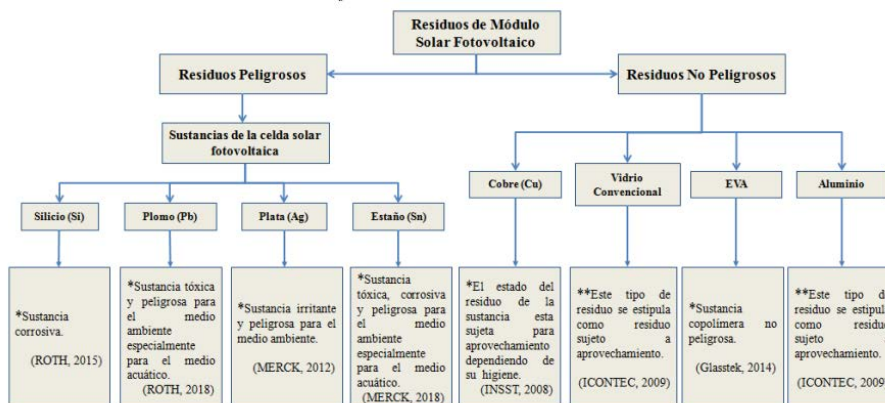


Figura 3. Clasificación de Residuos de un Módulo Fotovoltaico [9]

Por lo tanto, los desechos no peligrosos o sólidos incluyendo el vidrio convencional, cobre y aluminio separados de las células solares. Según su hoja de seguridad, el Libro Naranja de las Naciones Unidas [10] y el Convenio de Basilea [11], el aluminio y el cobre no se consideran materiales o sustancias peligrosas. Estos materiales no son peligrosos, pero deben ser manipulados y utilizados por personal administrativo autorizado. Los residuos no peligrosos producidos por módulos solares tienen características similares a los residuos producidos en el trabajo diario de Energía Integral Andina S.A EIASA, como la integración de sistemas de energía eléctrica, el diseño y construcción de redes de energía, telecomunicaciones y saneamiento básico. Esta similitud permite vincular los planes de gestión de paneles solares con los planes integrados de gestión de residuos sólidos.

Actualmente, en el proyecto de Energía Integral Andina S.A., los residuos generados son monitorizados y controlados a través del Plan General de Manejo Integrado de Residuos Sólidos y el Plan de Manejo Integrado de Residuos Peligrosos. Con base en los resultados de la prueba piloto, este plan de gestión de disposición de paneles solares se ajustará al plan actual para que pueda gestionar los residuos junto con personal de gestión autorizado y ser reconocido por el departamento de gestión ambiental [9].

3.3 Plan análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica toma un papel importante en la sociedad como promotoras de la energía verde o energías renovables, por lo que su implementación está jugando un papel cada vez más importante, aunque los paneles solares tienen una vida útil y se convierten en desechos electrónicos que deben ser reciclados. Para el su respectivo reciclaje es muy importante en la actualidad la capacidad de detectar cuándo se deben limpiar, reparar, reutilizar o reciclar los paneles, debido a estos se opta por unas medidas, las cuales dan soluciones de un modelo de negocio. Los autores en su trabajo [12] establecen una propuesta que brinda a las personas una forma personalizada de administrar la salud de sus paneles solares. En definitiva, proponen un modelo de negocio en el que se firma un contrato con una central fotovoltaica para proporcionar los siguientes aspectos:

- Control del inventario de paneles solares degradados en la planta.
- Control de salud en los paneles instalados.
- Recolección de paneles, con compromiso de reparar si es posible y reincorporación a la planta o proceso de reciclaje si es necesario.

Una vez que se determina que la vida útil de los paneles no puede seguir en funcionando, se envían a la planta de separación, luego, estos paneles se separan en dos categorías, reparación y reciclaje. Los módulos seleccionados para la reparación están marcados y separados para comprobar su situación de forma específica. Estas situaciones son: reemplazar la caja de conexiones o reemplazar el marco y el vidrio, en cuanto a los seleccionados para reciclar serán llevados a un proceso termoquímico en el que se separan el vidrio y el metal. Al final del proceso, el metal y el vidrio se venden a empresas de reciclaje.

Entre de los métodos para la separación de residuos analizados por los autores se expone la Tabla 1 donde se analiza los diferentes impactos que tiene cada uno de los procesos para la separación y posterior reciclaje de los elementos.

Tabla 1. Análisis de impacto ambiental en los métodos de separación. Tomado de [12].

Ítem	Método Mecánico	Método Térmico	Método Químico
Cambio climático [Kg CO ₂]	-361,44	-3145,7	-2798,43
Acidificación terrestre [Kg SO ₂]	-8,8	-14,1	-14,25
Agujero en la capa de ozono [CFC Kg]	4,10E-07	3,40E-08	3,44E-08
Agotamiento de energía fósil [Kg Oil]	-131,9	-1037,6	-997,75
Toxicidad humana [Kg 1,4DB]	-83,9	-149,6	230,9

Los resultados encontrados por los autores muestran que el método de recuperación que menos impacto tiene en el medio ambiente es el método de recuperación de calor o térmico. Al observar la Tabla 1, se puede apreciar que existe una diferencia significativa en la producción de CO₂ entre los métodos térmicos y mecánicos, y se han identificado dos factores claves para explicar este comportamiento.

Primero, el método térmico tiene una tasa de recuperación del 95%, mientras que el método mecánico tiene una tasa de recuperación de solo el 80% al 85%. En segundo lugar, en comparación con la red térmica, el método mecánico es más dependiente de la red. Esto último se refleja en otro indicador que es anormalmente alto en el método mecánico (a excepción de la producción de CO₂), que es el consumo de combustibles fósiles medido en kilogramos de energía equivalente en petróleo.

Finalmente este análisis realizado por los autores nos expone la importancia de contar con un plan de manejo del ciclo de vida para la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaico en la industria, que aporta en gran medida en el flujo de caja directo de los recursos económicos de la empresa, pues previene el gasto innecesario de recursos en el mantenimiento de las plantas solares que a su vez cuenta con un impacto directo en la reducción de producción de contaminación en diferentes aspectos del planeta.

3.4 Diseño de una máquina que permita la separación del marco de aluminio de paneles solares monocristalinos de 60-72 celdas que han cumplido su vida útil para la fundación circular crops en Bogotá

Este trabajo desarrollado bajo la modalidad de trabajo de grado sugiere el diseño de una máquina que permita la separación del marco de aluminio de paneles solares mono cristalino de 60-72 celdas que han cumplido su vida útil. Así mismo, el proyecto tiene como objetivo utilizar el aluminio de los paneles solares para su reciclaje y reutilización.

Esta hipótesis se plantea teniendo en cuenta que en Colombia la mayoría del aluminio procesado proviene de fuentes de reciclaje, siendo el quinto país en Sur América que más exporta este metal [13], lo que implica que el reciclaje del aluminio presente en los paneles solares contribuye a ampliar las fuentes de aluminio para el país considerando que la mayoría del material reciclado proviene de cables y tuberías. Por este motivo el autor propone las siguientes estrategias de separación de materiales y reciclaje:

- **Vibración:** Este proceso posiciona y asegura el panel sobre la estructura; luego, un sistema de ventosas se ubica sobre el panel para aplicar una serie de vibraciones sobre este y empleando el principio de resonancia. La Figura 4 expone el diagrama de bloques del proceso de extracción del aluminio con vibración.

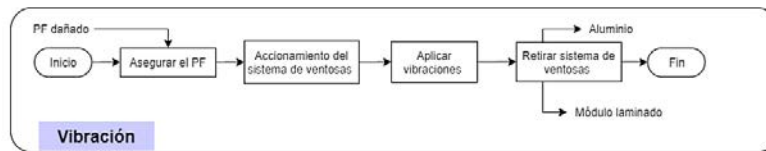


Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de vibración para la extracción de aluminio [13]

- **Cizalladura hidráulica:** Para este proceso primero se posiciona el panel para activar el sistema de sujeción. Posteriormente, se activa el sistema hidráulico para permitir el avance de las plantillas que sujetan el marco, y luego con el retroceso del cilindro, el marco se separa y se extrae el aluminio. La Figura 5 expone el proceso para la extracción con la estrategia Cizalladura hidráulica.

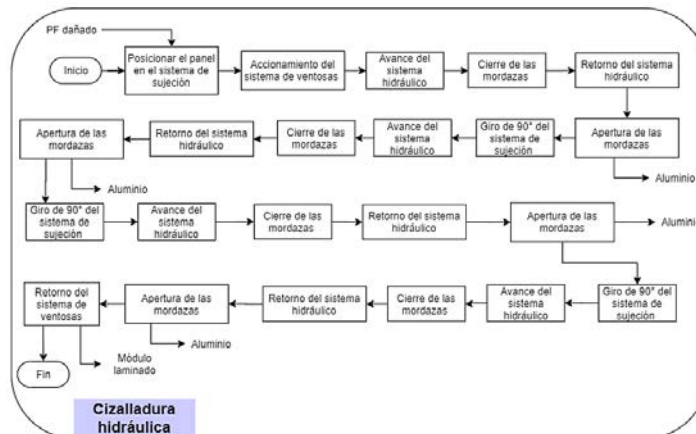


Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de Cizalladura hidráulica para la extracción de aluminio [13]

- **Pinzas desgarradoras:** El mecanismo consiste en dos pizas que se ubican primero en la sección superior e inferior del marco para desgarrarlo y luego de un giro de 90° del mecanismo, retirar las secciones faltantes, estos procesos se hacen con él con la finalidad de aprovechar el aluminio de los paneles solares. La Figura 6 expone el proceso para la extracción con la estrategia Pinzas desgarradoras.

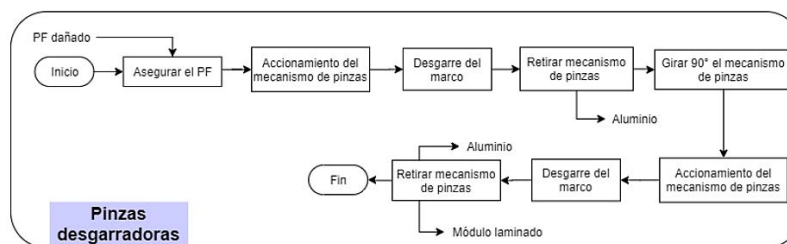


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de Pinzas desgarradoras para la extracción de aluminio [13]

Una vez analizados los diferentes procesos para la separación del aluminio el autor establece los parámetros necesarios para el diseño del prototipo por medio de un diagrama de caja negra para la implementación y obtención final de los materiales deseados, dando como resultado la separación del marco de aluminio de paneles solares monocristalinos de 60-72 celdas; la Figura 7 expone la propuesta.



Figura 7. Diagrama de caja negra con la parametrización del sistema [13]

Finalmente, el autor plantea un diseño en el cual integra las tres estrategias para la separación de metal aluminio en paneles solares monocristalinos de 60-72 celdas, este realiza el análisis de costo del dispositivo que rodean los \$48.049.400 COP, que si bien no es un dispositivo de bajo costo si abre la puerta para el

aprovechamiento de recurso limitados, este costo contara con una amortización en un periodo no mayor a 10 años, teniendo en cuenta que el material extraíble se vende a un valor de \$6.234,16 COP/kg [13].

3.5 Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas

El estudio realizado por los autores [14] el cual se centra en instalaciones fotovoltaicas de máximo de 20 kW de potencia, orientadas al autoconsumo, conectadas a red, sujetas a compensación por los excedentes de energía vertida a la red y realizadas a partir de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino. Este trabajo fue presentado en el Congreso Iberoamericano de Energía Solar del año 2020, el cual busca trabajos que aporten en la investigación económica sobre la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas; puntualmente, el desarrollo consultado, presenta la viabilidad de la instalación de electricidad limpia con la implementación de paneles reutilizables, esta instalación es más económico y más rentable, al menos en instalaciones fotovoltaicas de uso propio hasta 20 kW (límite de potencia de este estudio).

El estudio ha establecido requisitos mínimos de calidad exigibles a un módulo fotovoltaico para su reutilización. Básicamente se definen en: no cause ningún tipo de inseguridad sobre el sistema o los usuarios, una pérdida de potencia que no sea saturada en el tiempo ni presente degradación a saltos ni de tipología variable y un rendimiento no inferior al 90% (eficiencia media estimada para un panel tras 15 años de uso). Para el cumplimiento de este objetivo, la figura 8 expone el algoritmo de análisis de capacidad de un módulo fotovoltaico definidos por los autores. El cual incluye dos etapas, inspección visual para evaluar los posibles defectos del panel y si es apto para ser caracterizado con su curva I-V.

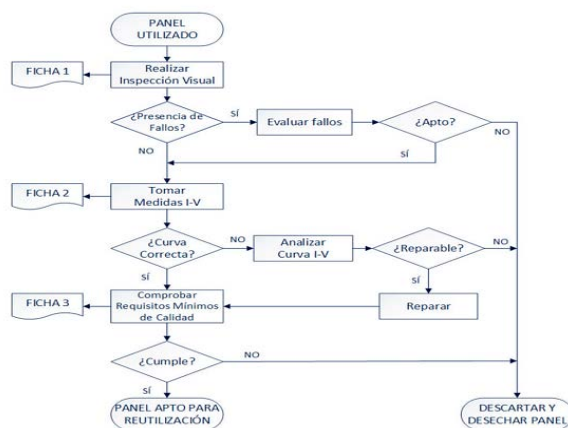


Figura 8. Esquema del procedimiento de selección de un panel fotovoltaico usado [14]

En primer lugar, como se evidencia en la figura 8, se han definido dos etapas básicas, inspección visual y curva característica de Corriente-Voltaje, después de los procedimientos para la realización de ensayos en inspección visual se define la normativa especificada en UNE-EN 61215 (MQT 01), esta inspección visual debe ser acompañada por un técnico calificado dentro de un tiempo estimado de 5 a 10 minutos. Por otra parte, para los paneles adecuados, se debe determinar el valor de la corriente de cortocircuito midiendo su curva I-V, tensión de circuito abierto, potencia máxima y tensión y tensión a potencia máxima. Si el panel cumple con los requisitos de calidad especificados, se considerará adecuado para un uso, sí, por el contrario, no cumple con los criterios, se evaluará si se puede reparar. Si no es así, se pasa a un proceso de desecho del panel fotovoltaico.

Finalmente, en cuanto a los resultados económicos del objeto de investigación muestran que, al reutilizar los paneles solares, se ha reducido el costo de instalación y pueden satisfacer la demanda total de energía al igual que instalar nuevos paneles. Es decir, a partir de paneles reutilizados se consiguen valores de producción de energía muy similares a los obtenidos con módulos fotovoltaicos nuevos. Lo mismo ocurre con el excedente, Por tanto, la reutilización de paneles es una forma de dar una segunda vida a los paneles que han cumplido con su vida útil. En conclusión, las ventajas económicas de la instalación fotovoltaica (en comparación con la instalación de paneles solares nuevos), se obtiene la reducción de la inversión y generación de ingresos, ya que los resultados económicos, objeto de este estudio, son también mejores cuando se emplean paneles reutilizados.

3.6 Gestión integral de desechos de paneles fotovoltaicos de silicio

De acuerdo a la revisión académica realizada se ha podido encontrar que en general los paneles solares suelen tener una vida útil de entre veinte a veinticinco años y que por su forma de construcción no es factible repararlos, este es el problema que aborda el Herrarte [5], que en su documento expone la situación en Guatemala, donde estima que en los próximos años habrá un gran volumen de paneles solares desechados puesto que en el país no existe plan alguno de reciclaje de estos equipos.

La problemática de no contar con una correcta disposición final de los paneles solares acarrea problemas de contaminación ambiental puesto que estos contienen silicio o telurio de cadmio los cuales son componentes tóxicos y pueden afectar a personas y animales.

Actualmente los paneles solares se encuentran categorizados como residuos generales y son escasos los países que cuenten con una categorización más específica de estos. Sin embargo, sí existen algunos modelos de reciclaje debido a que por ejemplo en la Unión Europea se les exige a los fabricantes cumplir con ciertos estándares de fabricación para que el proceso de deposición final sea más sencillo de realizar. Esto ha logrado consolidar algunos procesos de reciclaje en concordancia con los tipos de paneles solares mayormente fabricados. A grandes rasgos estos procesos consisten en un despiece mecánico donde se logra extraer gran parte de la estructura del panel fotovoltaico, de aquí se logra separar el vidrio y aluminio, que constituyen gran parte del panel fotovoltaico.

El material restante pasa a ser calentado hasta aproximadamente 500 grados centígrados en una unidad de procesamiento térmico para facilitar la separación de cada compuesto. Luego es posible extraer la parte electrónica, según el autor el 80% de un panel es fácilmente recuperable y reutilizable, y el porcentaje restante requiere un proceso aún más refinado, pero también se puede reutilizar.

El silicio presente en las placas que se conoce como obleas se pueden reutilizar después de un baño en ácido para su limpieza y las piezas que se encuentren rotas se pueden fundir y generar nuevas obleas que poder ser usadas en nuevos paneles fotovoltaicos. Según Herrarte [15], se enfoca en realizar el proceso manual de desmantelamiento de dos paneles solares y aplicar distintos métodos de calentamiento para extraer los materiales. La Tabla 2 expone la distribución de materiales encontrados en el estudio.

Tabla 2. Distribución de materiales de los paneles fotovoltaicos encontrados durante el estudio [15]

	Peso muestra (g)	Porcentaje	Panel JINKO (g)
Aluminio	479	14.7%	3897.5%
Vidrio	2444	75.1%	19888.8%
Silicio	86	2.6%	701.3
Metal	29	0.9%	239.7
EVA	13	0.4%	104.7
PVF	170	5.2%	1383.2
Caja conexión	35	1.1%	284.8
Panel completo	3257	100.0%	265000

El autor encontró que en materiales como el vidrio suele estar contaminado con arsénico, aunque en muy bajas cantidades pero que debido a esto ha de tratarse como un desecho tóxico. La Tabla 3 expone la composición y la disposición final de los diferentes componentes de los paneles fotovoltaicos.

Tabla 3. Composición y la disposición final de los diferentes componentes de los paneles fotovoltaicos [15]

Componente	Reutilización	Reciclaje	Vertedero	Desecho tóxico
Obleas de silicio	NO	SI	SI	NO
Vidrio	NO	NO	NO	SI
Barras colectoras	NO	NO	NO	SI
Marco de aluminio	SI	SI	SI	NO
Caja conexión	SI	NO	SI	NO
EVA	NO	NO	NO	NO
PVF	NO	NO	SI	NO

Como resultado del trabajo el autor presenta la separación de cada componente y su correcta gestión según un proceso que se muestra en la siguiente Figura 9. El material no tóxico, obleas de silicio, puede ser desechado a un vertedero sin representar un peligro de contaminación; mientras que el material tóxico, el vidrio y las barras colectoras, deben ser almacenados de manera que se evite el contacto con el medio ambiente o reciclados con un proceso que recolecte los gases emanados durante el proceso.

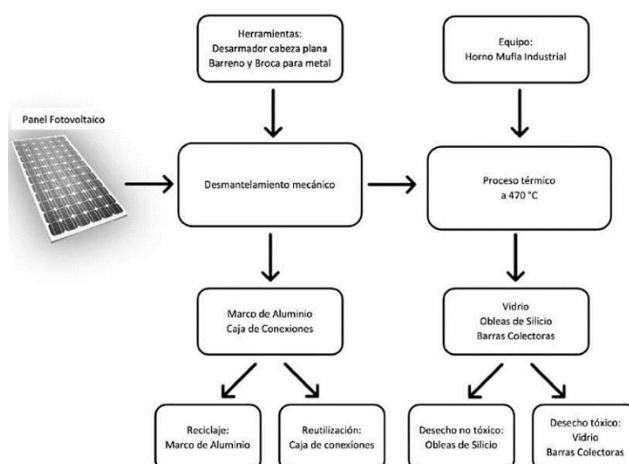


Figura 9. Esquema de gestión integral de desechos [15]

3.7 Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia

El presente trabajo se ejecuta en varias fases: primero, se realiza un análisis del contexto nacional e internacional en cuanto al uso, consumo de paneles solares y de los casos exitosos que implemente estrategias en países mencionados que puede brindar una orientación para los pasos a seguir a nivel nacional. Posteriormente, presenta una revisión de la normativa vigente en Colombia en materia de gestión de residuos, especialmente aquellos provenientes de aparatos eléctricos y electrónicos. Finalmente, estudia y analizan las políticas nacionales de producción y consumo sostenible y el Plan Nacional de Desarrollo para orientar los pasos a seguir.

Dentro de las iniciativas que proponen los empresarios o diferentes organizaciones para idear una solución adecuada a los problemas ambientales de la energía solar, en el estudio de Ramírez [4] se analiza diferentes opciones que se pueden implementar en el uso adecuado a este método de energía renovables:

- Desarrollo de programas, campañas o estrategias de educación ambiental, sensibilización y participación, para promover la apropiación e implementación efectiva de la Política nacional para la gestión integral de RAEE. El objetivo de esta línea es llegar al menos al 50% de los municipios del país.
- Desarrollar pautas de entorno técnico para implementar Actividades que prolongan la vida de los equipos eléctricos y electrónicos, como la restauración o la remanufacturado. El objetivo es desarrollar una guía de dirección a corto plazo.
- Establecer normas o requisitos técnicos, estipulando que los fabricantes deben proporcionar información a los usuarios o consumidores de equipos eléctricos y electrónicos, especialmente cuando contengan sustancias peligrosas, y devolverlos correctamente al final de su vida útil, con el fin de prevenir y reducir los riesgos para la salud humana. y el medio ambiente.
- Levantar información estadística sobre los hábitos de consumo de aparatos eléctricos y electrónicos por parte de los colombianos, que permita realizar estimaciones sobre la generación de RAEE en el país.

Teniendo en cuenta los lineamientos técnicos establecidos y las técnicas de tratamiento y disposición implementadas en otros países, el autor propone las siguientes alternativas que cumplen las orientaciones planteadas para el tratamiento y disposición de los residuos de paneles fotovoltaicos:

- Reciclaje de aluminio: Proceso de desmonte del marco de aluminio presente en el panel fotovoltaico.
- Reciclaje de vidrio: Proceso de remoción de la cubierta de vidrio del panel fotovoltaico.

- Reciclaje de plástico: Proceso de remoción de la cubierta posterior presente en el panel fotovoltaico.
- Reciclaje de plástico, matriz EVA: Las celdas fotovoltaicas y la matriz de plástico EVA en la que se encuentran incrustadas se llevan a una plataforma de vibración con el fin de separar ambas partes.
- Reciclaje de metales: Las celdas individuales son trituradas y se remueve el componente eléctrico.

La Figura 10 expone de forma resumida la separación de los diferentes componentes reciclables presentes en los paneles fotovoltaicos.

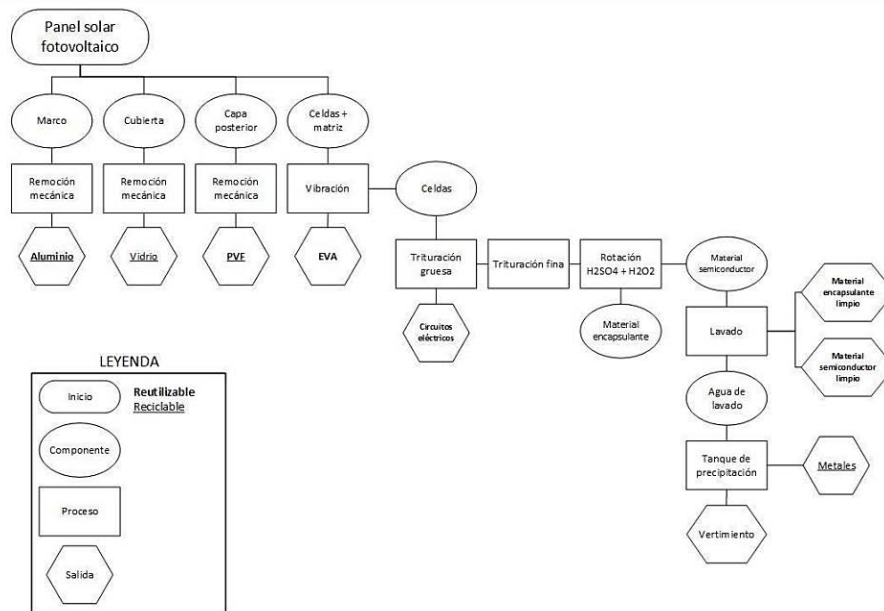


Figura 10. Esquema de gestión integral de desechos [4]

Finalmente, el análisis nos propone la importancia de los consumidores en impulsar a los fabricantes a mejorar sus registros ambientales y de seguridad preguntando a los instaladores sobre las empresas que producen los productos que utilizan. A su vez, esto anima al instalador a solicitar más información al fabricante, asimismo logrando metas como el desarrollo de documentos técnicos para consumidores de equipos eléctricos y electrónicos, etiquetas de productos, envases o accesorios, e información proporcionada por consumidores y productores en medios electrónicos que sean de fácil acceso en un corto período de tiempo.

4. CONCLUSIONES

Una vez analizado los diferentes puntos de vista en los procesos, análisis o acciones que diferentes autores proponen en la disposición final, y la reutilización de paneles fotovoltaicos al servicio de la generación de energía, se identifica la preocupación y la necesidad de establecer una ruta de disposición a todos los residuos que están próximos a cumplir su vida útil, es evidente que a nivel nacional, continental y a nivel mundial, no se cuenta con una definición clara en los ámbitos ambientales y legales que ayuden a disponer de todos estos recursos de la mejor forma e incentivar el reciclaje en su máxima expresión de los residuos provenientes de los paneles fotovoltaicos. En cuanto al proceso de descomposición de los residuos es recomendable contar con una estrategia que permita establecer los pasos y las formas más indicadas para la separación y reciclaje o disposición final de los paneles fotovoltaicos.

Al contar con la definición de una correcta gestión de los desechos para cada panel fotovoltaico, se podría evitar la contaminación del suelo, la cual es, cerca de 810 g de material tóxico (antimonio y arsénico). Tan solo en 2018 se importaron 21,145 paneles, lo que equivale a 17,130 kg de material tóxico, la correcta disposición de los desechos tóxicos puede evitar la contaminación ambiental de la zona donde se ubiquen para la disposición final de los paneles fotovoltaicos.

El aprovechamiento de estos residuos no solo se evidencia en la reducción de contaminación en el medio ambiente, también logramos encontrar que la correcta separación, acompañado del uso de los residuos,

generan un aporte económico que no solo se produce por la venta de los elementos extraídos de los paneles, sino que, existe proyectos que logran obtener rentabilidad de los paneles solares cuando se cuenta con el proceso de identificación temprana y manteniendo correctivo en los paneles fotovoltaicos, acompañado, de la herencia de paneles de procesos industriales a procesos domésticos, esto se traducen en un costo de inversión baja que la empresas podrían implementar para la generación de energía limpia en oficinas u hogares. Una vez explorado algunas posibles soluciones, invitamos a los lectores a continuar con el proceso continuo de incentivar el reciclaje y el aprovechamiento de la economía circular, en todos los ambientes de la vida cotidiana.

REFERENCIAS

- [1] F. Posso, *Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. parte dos: sistema energético basado en energías alternativas*, Geoenseñanza, vol. 7, núm. 1-2, 2002, pp. 54-73
- [2] Sukhatme, P.; Nayak, J. *Solar energy*. McGraw-Hill Education, 2017.
- [3] Kabir, E. et al. *Solar energy: Potential and future prospects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 82, p. 894-900.
- [4] RAMÍREZ AGUDELO, Alejandra. *Análisis y propuestas para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia*. 2018.
- [5] Espejo, C.; Aparicio, A. *La producción de electricidad con energía solar fotovoltaica en España en el siglo XXI*. 2020.
- [6] Escudero, M. *Una mirada al futuro del reciclaje de paneles fotovoltaicos en España*. 2019.
- [7] Santos, J.; García, A. *Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050*. Journal of cleaner production, 2018, vol. 196, p. 1613-1628.
- [8] R. E. Española, *Las energías renovables en el sistema eléctrico español*, 2018.
- [9] Rodríguez, S. *Plan de manejo para disposición final de paneles solares de Energía Integral Andina SA*. Universidad el Bosque, 2018.
- [10] Naciones Unidas, *Libro Naranja. Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas.*, 2015.
- [11] Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente PNUMA. *Convenio de Basilea Sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación. Acta Final*, 2018.
- [12] Romero, J. *Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos*. Universidad de Chile 2019.
- [13] Ramírez, J.; Vargas, S. *Diseño de una máquina que permita la separación del marco de aluminio de paneles solares monocristalinos de 60-72 celdas que han cumplido su vida útil para la Fundación Circular Crops en Bogotá*. 2021. Trabajo de grado. Fundación Universidad de América.
- [14] González, M. et al. *Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas*. En CIES2020-XVII Congreso Ibérico e XIII Congreso Ibero-americano de Energía Solar. LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2020. p. 497-502.
- [15] Herrarte, R. *Gestión integral de desechos de paneles fotovoltaicos de silicio*. 2020. Disertación Doctoral. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Diseño de protecciones y puesta a tierra para árbol con sistema solar fotovoltaico

Juan Fernando Saldarriaga Garro¹

Karen Lemmel-Vélez²

Carlos Alberto Ocampo Quintero³

Carlos Andrés Rodríguez Toro⁴

Institución Universitaria Pascual Bravo

Colombia

Este trabajo permitió el mejoramiento de un dispositivo móvil conocido como árbol solar, ubicado en el campus de la Institución Universitaria Pascual Bravo en Medellín, Colombia. Todo esto dado a que se encontró que su uso podría causar daño a las personas que lo utilizan debido al riesgo eléctrico. Para ello se realizaron mediciones de resistividad del terreno, se calcularon las resistencias necesarias utilizando la ecuación de Dwight, además de realizar el cálculo del sistema de puesta a tierra utilizando suelo flavigel. Por otro lado, se calcularon las respectivas protecciones para la parte de generación y la parte de carga, teniendo en cuenta las características técnicas del árbol solar, logrando así la protección de la vida e integridad de los usuarios.

¹ Estudiante de Ingeniería Eléctrica vinculado al semillero en ciencias aplicadas SICAP.

Contacto: j.saldarriaga385@pascualbravo.edu.co

² Ingeniera en Instrumentación y Control, Magíster en Automatización y Control Industrial, candidata a Doctora en Educación.

Contacto: karen.lemmel@pascualbravo.edu.co

³ Ingeniero Electricista, Especialista en Ciencias Electrónicas e Informática, Especialista en Gestión de Proyectos y Magíster en Ingeniería de Sistemas.

Contacto: c.ocampoqu@pascualbravo.edu.co

⁴ Tecnólogo en Producción Industrial, Estudiante de Ingeniería Industrial vinculado al semillero en ciencias aplicadas SICAP.

Contacto: c.rodriquez64@pascualbravo.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como principal objetivo el mejoramiento de un dispositivo móvil conocido como árbol solar, ubicado en el campus de la Institución Universitaria Pascual Bravo en la ciudad de Medellín. Este dispositivo elaborado en guadua (*Guadua angustifolia*) cuenta con una serie de paneles solares los cuales brindan una zona de recarga para dispositivos tecnológicos de punta (celulares, computadores y equipos de baja potencia), el diseño de este árbol fue realizado por [1] y este dispositivo se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Foto del árbol solar

A partir de los problemas generados por los cambios climáticos durante los últimos años en la ciudad de Medellín (teniendo en cuenta que es una de las ciudades con más descargas atmosféricas en el mundo), se detectó una falla funcional ya que, este dispositivo no cuenta con un sistema de puesta a tierra o aislamiento, además, el sistema eléctrico y sus subsistemas carecen de protección y minimización de riesgos eléctricos, lo que hace que el dispositivo en sí no cumpla con los requisitos esenciales de seguridad. Por lo tanto, cabe preguntarse: ¿Será posible diseñar una Instalación eléctrica adecuada para un dispositivo estacionario con movilidad reducida y recarga por medio de generación solar fotovoltaica?

Adicionalmente se observa que estos puntos de recarga, quedan en zonas de campo abierto, sin obstáculos permanentes, como edificios, torres, árboles, etc., lo cual, puede percibirse como sitios de alto riesgo por descargas atmosféricas, dados los niveles cerámicos de la ciudad [2].

Para analizar esta problemática es necesario mencionar que estos dispositivos móviles de carga no cuentan con normas que rijan o ayuden para la elección de las protecciones de descargas eléctricas del dispositivo debido a que las normas actuales (RETIE, NTC-2050, NTC-4522) son solamente para las descargas eléctricas de edificios, casas, electrodomésticos y equipos.

Respecto al riesgo eléctrico en la norma NTC-2050 [3], se establecen los requisitos para: La identificación de los terminales, los conductores puestos a tierra en las instalaciones de los predios, y la identificación de los conductores puestos a tierra, por otra parte en el reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas [4] dice que toda instalación eléctrica que le aplique el RETIE, excepto donde se indique expresamente lo contrario, tiene que disponer de un Sistema de Puesta a Tierra SPT, para evitar que personas en contacto con la misma, tanto en el interior como en el exterior, queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla.

En lo que refiere a las protecciones eléctricas [5] se realizó un análisis del impacto sobre las protecciones eléctricas al instalar sistemas solares fotovoltaicos, con el fin de proporcionar seguridad ante interrupciones inesperadas, para todos los casos de fallas por sobrecorrientes.

En cuanto a requisitos de protección eléctrica en España se recomienda, tener en cuenta la Caída de tensión en los cables, masas y tierras, contactos directos e indirectos que pueden producirse más las sobretensiones y sobreintensidades [6].

Esta investigación ha tenido un desarrollo progresivo en diferentes etapas, se inició con la recopilación de información sobre normas y leyes de protecciones atmosféricas, puesta a tierra y riesgo eléctrico para este tipo de instalaciones, métodos de medición de resistividad de los terrenos del campus y ecuaciones que sirvan para reducir el valor de la resistencia medida al valor requerido necesario. Se diseñó el sistema de puesta a tierra proponiendo una adecuación de del terreno con suelo artificial Favigel [7]. Posteriormente, se realizó el cálculo de protecciones básicas basado en los valores de los equipos.

2. MÉTODO

Para poder saber cuan factible seria tener este dispositivo con estas mejoras, se recurrió a hacer un estudio en las zonas verdes del Bloque 8 (Figura 2) y de la Institución Universitaria Pascual Bravo, en la que se realizaron mediciones de resistividad del terreno.



Figura 2. Bloque 8 I.U. Pascual Bravo

Debido a que la Institución Universitaria Pascual Bravo cuenta con un telurómetro de marca KYORITSU MODEL 4102 (Figura 3), se realizó la de medición de resistencia utilizando una varilla (variación con la profundidad).

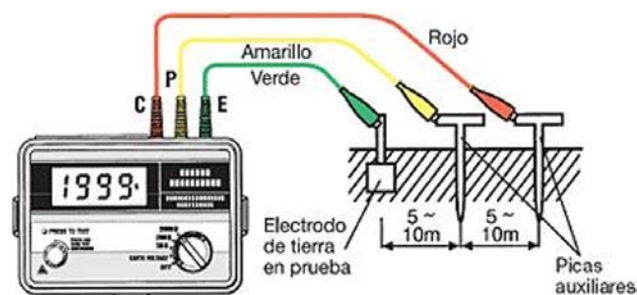


Figura 3. Forma de Conexión del Telurómetro [8]

Para realizar las respectivas mediciones, se utilizó un telurómetro KYORITSU - MODEL 4102, un martillo, dos picas auxiliares, tres cables de prueba (amarillo, verde y rojo), tres pinzas de Cocodrilo de Seguridad, una varilla de Cobre Copperweld 5/8x1, 80Mts.

Durante el proceso de medición en el Bloque 8 de la Institución Universitaria Pascual Bravo, se tomaron mediciones con una varilla de Copperweld 5/8 x 1,80Cm de largo, que se enterró a una escala de 20Cms y se aumentó progresivamente de a 20Cms hasta llegar a unos 80Cms de profundidad, con una distancia de 5Mts de las dos picas auxiliares respectivamente, por lo tanto se tomaron 4 mediciones en dos diferentes tipos de terrenos, los cuales fueron: Terreno Seco y Terreno Húmedo, esto es debido a que la resistencia varía considerablemente en estos dos diferentes terrenos, ya que al estar húmedo la conductividad es mayor que cuando está seco. En la Figura 4 se muestra el proceso de toma de datos con el telurómetro.

Una vez obtenido los valores de Resistencia de puesta a tierra del Bloque 8 se realizó una tabla de valores estadísticos en la que se pudo observar cuáles son sus diferentes valores respecto a la variabilidad y desviación eléctrica que ofrece el terreno.



Figura 4. Toma de Datos con el Telurómetro

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Puesta a tierra

Primero que todo se realizaron las respectivas mediciones de resistividad en el Bloque 8 en terreno seco, Tabla 1, y en terreno húmedo, Tabla 2, con el telurómetro KYORITSU - MODEL 4102.

Tabla 1. Mediciones en Terreno Seco

									Promedio
20 cm	8,9	8,5	7,9	8,75	8,8	8,75	8	8,4	8,50
40 cm	8,5	8,75	7,9	8,75	8,75	8,75	8,2	8,42	8,50
60 cm	8,75	8,75	7,9	8,75	8,75	8,75	8,15	8,42	8,53
80 cm	8,9	8,75	7,9	8,75	8,75	8,75	8,2	8,42	8,55

Tabla 2. Mediciones en Terreno Húmedo

									Promedio
20 cm	5,2	5,2	5,28	5,28	4,9	5	5	5,2	5,13
40 cm	5	5	5,3	5,3	5,2	5	5	5	5,10
60 cm	5	5	5,32	5,32	5	5	5	5	5,08
80 cm	5	5	5,32	5,32	5	5	5	5	5,08

Una vez obtenido las mediciones de resistividad, se realizó una tabla de estadísticas para evaluar cuan factible seria realizar un apantallamiento y un sistema de puesta a tierra para el árbol solar en estas zonas verdes. En el Bloque 8 se realizó estas estadísticas mediante las mediciones en los terrenos seco Tabla 3 y húmedo Tabla 4.

Tabla 3. Tabla de Valores Estadístico en Terreno Seco

Terreno Seco	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm
Media	8,50	8,50	8,53	8,55
Error típico	0,13	0,11	0,12	0,12
Mediana	8,63	8,63	8,75	8,75
Moda	8,75	8,75	8,75	8,75
Desviación estándar	0,38	0,32	0,34	0,35
Coefficiente de Variación	4,44%	3,74%	4,0%	4,1%
Varianza de la muestra	0,14	0,10	0,11	0,12
Curtosis	-0,93	0,33	0,09	0,23
Coefficiente de asimetría	-0,78	-1,11	-1,23	-1,14
Rango	1,00	0,85	0,85	1,00
Mínimo	7,90	7,90	7,90	7,90
Máximo	8,90	8,75	8,75	8,90
Suma	68,00	68,02	68,22	68,42
Cuenta	8,00	8,00	8,00	8,00

Tabla 4. Tabla de Valores Estadístico en Terreno Húmedo

Terreno Húmedo	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm
Media	5,13	5,10	5,08	5,08
Error típico	0,05	0,05	0,05	0,05
Mediana	5,20	5,00	5,00	5,00
Moda	5,20	5,00	5,00	5,00
Desviación estándar	0,14	0,14	0,15	0,15
Coefficiente de Variación	2,82%	2,77%	2,92%	2,92%
Varianza de la muestra	0,02	0,02	0,02	0,02
Curtosis	-1,33	-1,64	0,00	0,00
Coefficiente de asimetría	-0,62	0,81	1,44	1,44
Rango	0,38	0,30	0,32	0,32
Mínimo	4,90	5,00	5,00	5,00
Máximo	5,28	5,30	5,32	5,32
Suma	41,06	40,80	40,64	40,64
Cuenta	8,00	8,00	8,00	8,00

Una vez obtenido las mediciones de resistividad en ambos lugares, se procedió a realizar el método de Medición de Resistencia de Puesta a Tierra con un Electrodo tipo varilla (variación con la profundidad). Para este proceso de medición se utilizaron las ecuaciones (1) y (2).

$$p = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{a}\right)-1} \quad (1)$$

$$a = 4L * e^{-\left(\frac{2\pi RL}{p}+1\right)} \quad (2)$$

Donde:

p : resistividad del terreno (Ω)

L : longitud del electrodo (cm)

a : radio del electrodo (m)

R : valor de resistencia leído por el equipo (m)

En este proceso se obtuvo los resultados del Bloque 8 en terreno seco Tabla 5, y terreno húmedo Tabla 6.

Tabla 5. Método de Medición de Resistencia con una Varilla (terreno seco)

P (Ro)								
20 cm	17,32	16,55	15,38	17,03	17,13	17,03	15,57	16,35
40 cm	16,55	17,03	15,38	17,03	17,03	17,03	15,96	16,39
60 cm	17,03	17,03	15,38	17,03	17,03	17,03	15,86	16,39
80 cm	17,32	17,03	15,38	17,03	17,03	17,03	15,96	16,39

Tabla 6. Método de Medición de Resistencia con una Varilla (terreno húmedo)

P (Ro)								
20 cm	10,12	10,12	10,28	10,28	9,54	9,73	9,73	10,12
40 cm	9,73	9,73	10,32	10,32	10,12	9,73	9,73	9,73
60 cm	9,73	9,73	10,36	10,36	9,73	9,73	9,73	9,73
80 cm	9,73	9,73	10,36	10,36	9,73	9,73	9,73	9,73

Al ver que la resistencia del terreno es demasiado alta, se buscó un método que permitiera reducir ese valor al valor adecuado, usando así la Ecuación Dwight. Este proceso, se realizó mediante la ecuación (3).

$$R = \frac{P}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (3)$$

Donde:

P : resistividad del terreno ($\Omega. m$)

L : longitud del electrodo (m)

a : radio del electrodo (m)

R : valor de resistencia leído por el equipo (m)

Las mediciones obtenidas mediante la ecuación (3) se muestran para terreno seco Tabla 7, y en terreno húmedo Tabla 8.

Tabla 7. Ecuación de Dwight (terreno seco)

Resistencia Terreno (R)								
20 cm	10,43	9,96	9,26	10,25	10,31	10,25	9,38	9,84
40 cm	9,96	10,25	9,26	10,25	10,25	10,25	9,61	9,87
60 cm	10,25	10,25	9,26	10,25	10,25	10,25	9,55	9,87
80 cm	10,43	10,25	9,26	10,25	10,25	10,25	9,61	9,87

Tabla 8. Ecuación de Dwight (terreno húmedo)

Resistencia Terreno (R)								
20 cm	6,09	6,09	6,19	6,19	5,74	5,86	5,86	6,09
40 cm	5,86	5,86	6,21	6,21	6,09	5,86	5,86	5,86
60 cm	5,86	5,86	6,23	6,23	5,86	5,86	5,86	5,86
80 cm	5,86	5,86	6,23	6,23	5,86	5,86	5,86	5,86

Dado a que la resistencia del terreno sigue siendo alta, por lo que se recurrió a buscar algún material idóneo para este terreno, en la que se pueda reducir el valor de su resistencia al valor requerido, por lo que se usó un Suelo Artificial llamado Favigel®. Para calcular la resistencia de puesta a tierra de un electrodo vertical rodeado del suelo artificial marca Favigel®, se aplica la ecuación (4).

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{a}\right) [1 - 0,5(\rho - \rho_{sa})^{0,06}] \quad (4)$$

Donde:

ρ : resistividad del terreno [$\Omega \cdot m$]

ρ_{sa} : resistividad del suelo artificial [$\Omega \cdot m$]

L : longitud del electrodo [m]

Los cálculos realizados por le ecuación (6) del Suelo Artificial Favigel para reducir la resistencia del terreno son las siguientes para terreno seco Tabla 9, y en terreno húmedo Tabla 10.

Tabla 9. Favigel - Suelo Artificial (terreno seco)

Cm	L	a	Ro	Rosa	4L/a	ln(4L/a)	Ro-Rosa	(Ro-Rosa) ^{0,06}	1-0,5*(Ro-Rosa) ^{0,06}	ln(4L/a)* (10,5*(Ro-Rosa) ^{0,06})	Ro/(2*pi*L)	R
20 Cm	1,8	0,0079375	17,324	0,5	907,087	6,810	16,824	1,185	0,408	2,777	1,532	4,253
	1,8	0,0079375	14,118	0,5	907,087	6,810	13,618	1,170	0,415	2,828	1,248	3,530
	1,8	0,0079375	13,122	0,5	907,087	6,810	12,622	1,164	0,418	2,846	1,160	3,302
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,616	0,5	907,087	6,810	14,116	1,172	0,414	2,819	1,292	3,643
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,288	0,5	907,087	6,810	12,788	1,165	0,417	2,843	1,175	3,340
	1,8	0,0079375	13,952	0,5	907,087	6,810	13,452	1,169	0,416	2,830	1,234	3,492
40 Cm	1,8	0,0079375	14,118	0,5	907,087	6,810	13,618	1,170	0,415	2,828	1,248	3,530
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,122	0,5	907,087	6,810	12,622	1,164	0,418	2,846	1,160	3,302
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,620	0,5	907,087	6,810	13,120	1,167	0,416	2,836	1,204	3,416
60 Cm	1,8	0,0079375	13,985	0,5	907,087	6,810	13,485	1,169	0,416	2,830	1,237	3,499
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,122	0,5	907,087	6,810	12,622	1,164	0,418	2,846	1,160	3,302
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,537	0,5	907,087	6,810	13,037	1,167	0,417	2,838	1,197	3,397

	1,8	0,0079375	13,985	0,5	907,087	6,810	13,485	1,169	0,416	2,830	1,237	3,499
80 Cm	1,8	0,0079375	14,783	0,5	907,087	6,810	14,283	1,173	0,414	2,816	1,307	3,681
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,122	0,5	907,087	6,810	12,622	1,164	0,418	2,846	1,160	3,302
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	14,533	0,5	907,087	6,810	14,033	1,172	0,414	2,820	1,285	3,624
	1,8	0,0079375	13,620	0,5	907,087	6,810	13,120	1,167	0,416	2,836	1,204	3,416
	1,8	0,0079375	13,985	0,5	907,087	6,810	13,485	1,169	0,416	2,830	1,237	3,499

Tabla 10. Favigel - Suelo Artificial (terreno húmedo)

Cm	L	a	Ro	Rosa	4L/a	ln(4L/a)	Ro-Rosa	(Ro-Rosa) ^{0,06}	1-0,5*(Ro-Rosa) ^{0,06}	ln(4L/a) [*] (1-0,5*(Ro-Rosa) ^{0,06})	Ro/(2* pi(0*L))	R
20 Cm	1,8	0,0079375	10,122	0,5	907,087	6,810	9,622	1,146	0,427	2,910	0,895	2,604
	1,8	0,0079375	8,637	0,5	907,087	6,810	8,137	1,134	0,433	2,949	0,764	2,252
	1,8	0,0079375	8,770	0,5	907,087	6,810	8,270	1,135	0,432	2,945	0,775	2,284
	1,8	0,0079375	8,770	0,5	907,087	6,810	8,270	1,135	0,432	2,945	0,775	2,284
	1,8	0,0079375	8,139	0,5	907,087	6,810	7,639	1,130	0,435	2,963	0,720	2,132
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,637	0,5	907,087	6,810	8,137	1,134	0,433	2,949	0,764	2,252
40 Cm	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,803	0,5	907,087	6,810	8,303	1,135	0,432	2,944	0,778	2,292
	1,8	0,0079375	8,803	0,5	907,087	6,810	8,303	1,135	0,432	2,944	0,778	2,292
	1,8	0,0079375	8,637	0,5	907,087	6,810	8,137	1,134	0,433	2,949	0,764	2,252
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
60 Cm	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,836	0,5	907,087	6,810	8,336	1,136	0,432	2,943	0,781	2,299
	1,8	0,0079375	8,836	0,5	907,087	6,810	8,336	1,136	0,432	2,943	0,781	2,299
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
80 Cm	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,836	0,5	907,087	6,810	8,336	1,136	0,432	2,943	0,781	2,299
	1,8	0,0079375	8,836	0,5	907,087	6,810	8,336	1,136	0,432	2,943	0,781	2,299
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172
	1,8	0,0079375	8,305	0,5	907,087	6,810	7,805	1,131	0,434	2,958	0,734	2,172

4.2 Cálculo de protecciones

Para el sistema eléctrico del árbol solar, se calcularon cuáles serían las respectivas protecciones para la parte de generación y la parte de carga, teniendo en cuenta las características técnicas del árbol solar:

- Voltaje de funcionamiento del sistema es de 110VAC
- Capacidad de almacenamiento de 180A y dos baterías 90Ah dimensiones 30.7 x 16.9 x 21.5 CM
- Un Inversor de corriente de 200W y Regulador de carga 20Amp.

El Consumo del sistema es variable de acuerdo al uso y una Capacidad de uso de 6 puertos USB para conexión de dispositivos móviles, 2 toma corriente para conexión de equipos portátiles (Max 200W) aprox. 290W con una autonomía del sistema de 5 horas y un Indicador de descarga de batería (Verde - 100%, Amarillo 75%, Amarillo 50%, Rojo 25%) y una Altura aprox. 3.5Mtrs. Para el cálculo de las protecciones, se realiza un paso a paso del proceso matemático. Para hallar la protección del Inversor de Corriente, se implementa la ecuación (5).

$$I_n = \frac{W}{V}$$

$$I_n = \frac{200W}{110V} = 1.8 A \quad (5)$$

Para hallar la protección de las 2 baterías conectadas en paralelo, se usa la ecuación (6) y se obtiene la ecuación (7).

$$I_{cc} = 1.8 * I_n \quad (6)$$

$$I_{cc} = 1.8 * 180A = 327 A \quad (7)$$

Para hallar la protección del Regulador de Carga, se considera la ecuación (6) y se obtiene la ecuación (8)

$$I_{cc} = 1.8 * 20A = 36 A \quad (8)$$

Para hallar la protección a la capacidad de uso del sistema, teniendo los 6 puertos USB y los 2 tomacorrientes en uso, se implementan la ecuación (9) y la ecuación (10).

$$I_n = \frac{290W}{110V} = 2.6A \quad (9)$$

$$I_{cc} = 1.8 * 2.6A = 4.68A \quad (10)$$

CONCLUSIONES

Los árboles solares de la IU Pascual Bravo, fueron una respuesta interesante a las necesidades de desarrollo sostenible, con respeto por el medio ambiente. Se construyeron con materiales ecológicos, como la guadua, se instalaron energías eléctricas renovables por medio de sistemas solares fotovoltaicos con elementos de abastecimiento, almacenamiento y conversión DC/AC, para trabajo de recarga de dispositivos móviles en un entorno domiciliario. Sin embargo, esto pudo generar condiciones inesperadas frente al riesgo eléctrico, dado que son instalaciones no convencionales para el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE.

Los árboles solares representan una exposición fuerte al riesgo eléctrico en ciudades como Medellín, porque, por una parte, son instalaciones eléctricas que se hacen en un entorno de campo abierto, alejados de árboles y edificaciones para evitar la sombra sobre los paneles solares, lo que las ubica como atractores de descargas atmosféricas. Por otra, la ciudad tiene un nivel ceráunicos de 12 a 15 días de tormenta al año por kilómetro cuadrado, lo que la convierte en una de las ciudades con mayor riesgo de descargas atmosféricas en el mundo.

Esto hizo necesario identificar un Estado del Arte en materia de puestas a tierra y protecciones eléctricas para instalaciones eléctricas de baja potencia y bajo voltaje en AC y en DC, en un entorno de campo abierto, encontrando que existe poca literatura al respecto.

Al tomar medidas de resistencia de puesta a tierra, se observa que el terreno, a pesar de percibirse como de alta humedad, tiene composición pobre para generar buena conductividad, por lo que, la resistencia eléctrica es relativamente alta y requiere ser enriquecida con productos alternos como suelo artificial.

Si bien, el árbol solar es un dispositivo de baja potencia desde el punto de vista electrotécnico, sus condiciones de tensión y frecuencia (Voltaje mayor a 25V AC y frecuencia menor a 1000 Hz) lo ubican como instalación eléctrica de uso final, de acuerdo con la NTC 2050 y el RETIE.

De aquí se infiere la necesidad de hacer un cálculo de protecciones y de puesta a tierra adecuados en cada uno de los componentes del sistema, acordes con el RETIE.

Este estudio muestra la importancia de establecer parámetros técnicos con la mayor rigurosidad posible a las propuestas innovadoras de desarrollo sostenible, pues no tener cuidado con ellas, pueden generar

condiciones de riesgo y hacer que se presenten eventos desastrosos frente a la vida y la salud humanas y la preservación de bienes y el medio ambiente.

REFERENCIAS

- [1] E. A. Duque, P. M. Ortíz, A. F. Isaza, A. F. Lujan, S. Chica y M. Casamitjana, «Design and Construction consideration of an artificial solar tree made with *Guadua angustifolia* to charge mobile devices in medellin,» *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 11, nº 15, pp. 1-11, 2018.
- [2] El colombiano, «Medellín es una de las ciudades capitales con mayor densidad de rayos,» *El colombiano*, 07 10 2014.
- [3] Instituto Colombiano normas técnicas y certificación, *Norma Técnica colombiana 2050*, Bogotá, ICONTEC, 1998.
- [4] R. Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas*, Bogotá, MinMinas, 2013, p. 65.
- [5] C. J. Urbina Díaz, *Análisis de impacto sobre protecciones eléctricas al instalar sistemas solares fotovoltaicos en una red de distribución con nivel de tensión 13,2 Kv*, Manizales, 2015.
- [6] Colegio Oficial De Ingenieros Telecomunicaciones, «Energía Solar Fotovoltaica,» *Grupo De Nuevas Actividades Profesionales Del COIT (Grupo NAP)*, 2002.
- [7] F. Casas Ospina, *Tierras Soporte de la seguridad eléctrica*, Bogotá, Seguridad Eléctrica LTDA, 2010.
- [8] CLICPATSA, 2021. Recuperado: <https://clicpatsa.com/pruebas/>

Uso de redes neuronales para simular el flujo del tránsito en cruces de alta densidad vehicular

Ricardo Alirio González Bustamante¹

Yeisson Steven León Izquierdo²

Leidy Johanna Alfonso Dávila³

Edgard Edmundo Vargas Tovar⁴

Universidad Autónoma de Colombia

Colombia

Smart City hace referencia a una ciudad capaz de utilizar las Tecnologías de la Información y Comunicación TIC con el fin de crear y mejorar infraestructuras para los ciudadanos, englobando medios de transporte, ahorro energético contribuyendo en beneficio del medio ambiente, optimización de los servicios públicos, sostenibilidad y eficiencia en todos sus aspectos. Todo estas herramientas o aplicaciones hacen una ciudad más eficiente y cómoda, debido a que facilitan el diseño de infraestructuras para responder de mejor forma al entorno físico y urbano, como la automatización de varios dispositivos que conlleva a que el día a día sea más fácil, rápido y práctico. El objetivo de este trabajo es presentar una simulación de la movilidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, específicamente en el cruce de la calle 2 con la carrera 30, empleando la herramienta de software AnyLogic para un adecuado flujo vehicular basado en el uso de redes neuronales.

¹ Contacto: gonzalez.ricardo@fuac.edu.co

² Contacto: yeisson.leon@fuac.edu.co

³ Contacto: leidy.alfonson@fuac.edu.co

⁴ Contacto: vargas.edgar@unad.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad inteligente y sostenible es una ciudad innovadora que utiliza las TIC [1]. Una ciudad inteligente y sostenible, permite realizar cambios en la calidad de vida de sus ciudadanos, en lo económico, educativo, en su infraestructura, medioambiente y movilidad.

Ahora bien, la ciudad de Bogotá es considerada una ciudad inteligente porque tiene muchas de sus características, de acuerdo con el DANE [2] Bogotá tiene 7.181.469 habitantes, lo que genera múltiples retos para darle bienestar a sus ciudadanos, entre ellos la movilidad, pues esta representa una pérdida de tiempo para sus ciudadanos en sus traslados de la casa al trabajo en un rango normal son de 30 minutos.

Pero en Bogotá el traslado promedio es de 67 minutos, es decir, que la gente gasta 37 minutos por día por encima de esa media y eso se multiplica por el universo de la población laboralmente activa, es decir, son 7 millones de horas perdidas y para el resto del país 4 millones de horas [3].

Por lo anterior la movilidad en la ciudad de Bogotá presenta un desafío, y como en toda gran ciudad la utilización de los semáforos es esencial para organizar y dar cierta agilidad: ¿cómo cambiar el uso de los semáforos en la ciudad? Sería la pregunta a resolver: ¿qué tecnologías se pueden usar? Es por esto que uno de los enfoques que se dan en este trabajo es el uso de la inteligencia artificial en especial las redes neuronales en conjunto con un simulador que permita ver el flujo vehicular, usando como ejemplo una intersección en la ciudad de Bogotá, donde se analizó los resultados de un antes y un después del uso de la herramienta de la red neuronal.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 IoT

El término *Smart Cities* o ciudades inteligentes y sostenibles, es una de las tendencias más desafiantes la cual se encuentra relacionado a otro concepto conocido hoy en día *Internet de las cosas* o simplemente IoT. El término IoT hace referencia a escenarios donde la capacidad de cómputo y la conectividad de las redes encierra todo lo conexo a objetos, sensores y elementos cotidianos, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos.

Según [4] se identificaron 65 escenarios de aplicación de IoT, agrupados en 14 dominios: transporte, domótica, smart city, estilo de vida, al por menor, agricultura, fábricas inteligentes, cadena de suministro, de emergencia, atención de la salud, la interacción del usuario, cultura y turismo, medio ambiente y energía. La encuesta se basó en 270 respuestas de 31 países y los escenarios que atraen el mayor interés fueron: casa inteligente, smart city, el transporte y el cuidado de la salud.

De lo anterior, se puede afirmar que las áreas de mayor interés de la población se relacionan con hogares inteligentes, ciudades inteligentes y sostenibles, transporte y salud, todo esto debido a que son tareas cotidianas del día a día que afectan a todos los ciudadanos de alguna forma. Actualmente se están construyendo proyectos de *mega ciudades* en sitios con avanzada tecnología como por ejemplo China, en donde el internet de las cosas ha sido incluido en las áreas anteriormente nombradas. Se puede concluir que Internet of Things son el principal dominio en *Smart Cities* [5].

2.2 Ciudad inteligente y sostenible

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT [6], Una ciudad inteligente y sostenible es una ciudad innovadora que utiliza las TIC y otros medios para mejorar la calidad de vida, la eficiencia de la operación y los servicios urbanos, y la competitividad, al tiempo que garantiza que cumple con las necesidades de las generaciones presentes y futuras con respecto a los aspectos económicos, sociales y ambientales. Los componentes que identifican una ciudad inteligente son la sostenibilidad, calidad de vida e inteligencia, definidas por los siguientes temas; gobernanza, sociedad, medio ambiente y economía [1]. Como lo muestra la Figura 1, para tal efecto se tendrá en cuenta los cuatro pilares básicos y la movilidad.



Figura 1. Estructura de una ciudad Inteligente [6]

2.3 Gobernanza

La gobernanza puede tener varias definiciones, pero la que más se acerca al concepto de ciudades inteligentes y sostenibles es aquella en donde no existe diferenciación entre los sectores públicos y privados, garantizando la promoción y normativas para gobernar [7].

2.4 Economía en las ciudades inteligentes y sostenibles

La economía en una ciudad inteligente está definida siempre por el aprovechamiento, flexibilidad e innovación. Las ciudades deben destacar por una elevada productividad, apoyada en el aprovechamiento y fusión de factores de producción, en base a los conocimientos, el clima de innovación y la flexibilidad del mercado laboral; la economía debe caracterizarse por el aprovechamiento de soluciones innovadoras y adaptación flexible a las condiciones cambiantes. En este aspecto, el concepto que se aplica también a industrias *inteligentes*, vinculadas con ICT, así como parques de negocios y parques tecnológicos [8].

2.5 Educación

La educación en las ciudades inteligentes debe propender 3 pilares básicos de acuerdo con Oscar Alonso Vélez Rojas en su estudio de caso de la ciudad de Medellín, Colombia que son: tecnología, instituciones y educación para el desarrollo sostenible-EDS, lo anterior debe suponer una base fundamental para acceso a la información para el mejoramiento a la calidad de vida, integración de desarrollo en todos los niveles como una puesta en marcha de prácticas políticas y prácticas para el desarrollo sostenible [9].

2.6 Medio ambiente

Abarca todos los aspectos relacionados con la gestión sostenible y de riesgos ambientales, así como la protección y conservación de los recursos naturales [10], es uno de los principales objetivos de las ciudades inteligentes del rehúso circular del consumo.

2.7 Movilidad

La movilidad en una ciudad inteligente se relaciona información y eventos relacionados a la movilidad, con el fin de ayudar a una mejor comprensión de cómo la ciudad está funcionando en términos de consumo de recursos, servicios y estilos de vida [11]. Son acciones que deben cumplir los mandatarios locales para su mejoramiento, e influir en la calidad de vida de sus ciudadanos.

2.8 Red Neuronal Artificial RNA

El cerebro humano es una *máquina* capaz de realizar tareas desde lo más básico a lo más complejo, incluyendo reconocimiento de patrones, el control motriz de una extremidad o la percepción de estímulos sensitivos, de forma mucho más rápida que cualquier máquina inventada hasta ahora [12]. Por este motivo

se han realizado grandes esfuerzos para comprender su funcionamiento [13]. Las Redes Neuronales Artificiales RNA han recibido un interés peculiar como una tecnología para minería de datos, puesto que ofrece los medios para modelar de manera efectiva y eficiente problemas de diferente magnitud o complejidad. Los modelos de RNA son dirigidos a partir de los datos, tareas de clasificación, identificación, diagnóstico o predicción, por medio de los algoritmos de aprendizaje basado en los datos existentes que requieren la ayuda de un modelador para especificar la forma funcional y sus interacciones.

2.9 Big Data

La empresa consultora Gartner define el Big Data como *aquellos recursos de información caracterizados por su alto volumen, velocidad o variedad, que requieren formas de procesamiento innovadoras y eficientes para la mejora del conocimiento y la toma de decisiones* [14]. Con base a esta definición, las características que precisan el Big Data pueden resumirse en lo que se conoce como las tres Vs: Volumen, Velocidad y Variedad [15].

2.10 SemafORIZACIÓN

Los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos, enfocados en facilitar el control del tránsito tanto vehicular como peatonal, mediante indicaciones visuales, permitiendo el paso de vehículos y peatones alternadamente. Los semáforos tienen ciertos beneficios y desventajas, pues dependen de variables como tiempo de uso, ubicación o frecuencia de mantenimiento [16]. Las ventajas de un semáforo o sistema de semáforos que tenga un funcionamiento adecuado son las siguientes [16]: ordenar, reducir, sincronizar la velocidad, interrumpir, proteger la vida, aprovechamiento económico... Cuando el funcionamiento de un semáforo o grupo de semáforos es deficiente, se pueden dar las siguientes desventajas [16]: aumentar gastos, producir demoras, incremento en los accidentes viales, pérdidas innecesarias de tiempo.

2.11 Bogotá una ciudad inteligente y sostenible

Bogotá está catalogada como una ciudad inteligente de acuerdo con [3], al igual que Medellín, que según el Banco Interamericano de Desarrollo ha sido reconocida como la ciudad más innovadora en 2013 (reconocimiento otorgado por Wall Street Journal, City Group y Urban Land Institute). De acuerdo a este informe de la Cámara Colombiana de Informática y Telecomunicaciones CCIT, encargada de fomentar el crecimiento en el sector de las Tecnologías de la información y las Comunicaciones del país, señala que Bogotá y Medellín aparecen en el ranking del Instituto de Estudios Superiores de Navarra, España, en el grupo de las ciudades más sostenibles de Latinoamérica por sus avances en el sistema de transporte, espacios para emprendimiento, integración y generalización del acceso WiFi a varios sectores [3].

De acuerdo al Plan de Desarrollo Distrital 2020-2024 PDD, se busca convertir a Bogotá en una ciudad más innovadora, consciente y sostenible [17]. El objetivo principal del PDD es entender las necesidades de los ciudadanos y mejorar así su calidad de vida en todos sus aspectos tanto económicos como ambientales. El artículo 48 del PDD Plan de Desarrollo se denomina *Bogotá, ciudad inteligente*. El objetivo planteado es la creación de lineamientos para el desarrollo de un entorno urbano económico y social adecuado para la ejecución de actividades de innovación que permitan posicionar a la ciudad internacionalmente como una ciudad innovadora [17].

El artículo 49 del PDD se denomina *Bogotá, una ciudad digital*. El objetivo es promover que la ciudad cuente con una infraestructura de comunicaciones amigable con el espacio público y con el medio ambiente, donde se promueva la apropiación de las TIC, con propósitos adicionales al esparcimiento, como la educación, el emprendimiento, la innovación y la creación de soluciones para los problemas de la ciudad [17]. Según los objetivos estipulados en los artículos mencionados anteriormente, se han implementado iniciativas que fomentan el desarrollo de una ciudad inteligente, algunos logros a resaltar son la instalación de puntos Wifi en zonas públicas como parques, plazas y estaciones de Transmilenio, Bogotá es la única ciudad que cuenta con Guías de Seguridad Digital para las entidades, implementación de red de laboratorios digitales de Bogotá: el Laboratorio digital de la Universidad Nacional, el Laboratorio digital de EAN, el Laboratorio de

formación Digital de Ciudad Bolívar, el Laboratorio Digital de la Nueva Cinemateca y el Laboratorio de Formación Virtual Bogotá Aprende TIC, implementación de la semaforización inteligente, modernización en los taxímetros del taxi, donde las tarifas marcan con base en una aplicación, creación de FITIC: el Fondo de Innovación tecnológica de industrias creativas, que brinda el apoyo de nuevas iniciativas y pronto comenzará la construcción de Bronx: Distrito Creativo, un ambiente que propiciará el trabajo creativo y el emprendimiento en la ciudad [17].

De acuerdo a [3], se ha evidenciado un aumento constante en las tecnologías de la información generando así nuevas oportunidades y mejorando el sistema de transporte público, controlando el tema de infracciones, teniendo en cuenta esto se crea el centro de Gestión de Tráfico, siendo esta una plataforma que monitorea y registra datos tomados por medio de cámaras y semáforos en las vías, este centro trabaja en conjunto con la Secretaría de Movilidad, SIMUR Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Regional, Transmilenio y Terminal de Transporte, estas organizaciones trabajan con el fin de disminuir los accidentes viales, así como las diferentes eventualidades que se presenten.

En los periodos de 2016 al año 2019, la ciudad aplicó nuevas tecnologías inteligentes al sector de Movilidad en Bogotá, en donde estas tecnologías incluían un Sistema de Semaforización inteligente con el objetivo de disminuir hasta un 30% en tiempo promedio de las vías [17]. Actualmente, cada semáforo cuenta con sensores y conexión a un sistema de comunicaciones a través de la red de fibra óptica de la Empresa de Telecomunicaciones de Bogotá ETB, enviando los diferentes datos que obtiene el sistema a los centros de control anteriormente mencionados, mejorando la gestión de la movilidad en Bogotá. A pesar de los diferentes logros e iniciativas que se ha implementado en la ciudad, aún hay un largo camino que recorrer para poder consolidar a la ciudad de Bogotá como la más competitiva en Latinoamérica, aunque hay avances en los sistemas de semaforización y cámaras de seguridad e iluminación inteligente, queda mucho por hacer.

3. MÉTODO

3.1 AnyLogic

AnyLogic es un software de simulación de tráfico automotor que brinda soluciones a problemas actuales independientemente su enfoque, pues a este software pueden acceder desde estudiantes hasta gerentes, el objetivo primordial de AnyLogic es optimizar los procesos en diferentes campos de la industria logística. La flexibilidad sin igual que ofrece AnyLogic permite a los usuarios capturar la complejidad de prácticamente cualquier sistema, en cualquier nivel de detalle y obtener una visión más profunda de los procesos interdependientes tanto dentro como alrededor de una organización [5].

3.2 Arquitectura Anfis

La arquitectura Adaptive Network based Fuzzy Inference System) ANFIS sirve como base para la construcción de un conjunto de reglas difusas [18]. Zadeh [19] propuso una forma novedosa de caracterizar preguntas no probabilísticas, mediante los conjuntos difusos [19]. Recientemente se ha creado una nueva perspectiva en cuanto a lo que refiere a la literatura difusa, pues desde el momento en que se descubrió su aplicación en redes neuronales, ha sido un paradigma universal para cualquier modelo parametrizado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Flujo vehicular

Mediante el análisis del flujo vehicular es posible entender los comportamientos y características del tránsito, requisitos básicos para el planeamiento, operación de carreteras, calles y obras complementarias del sistema de transporte. Con el estudio y la aplicación de las leyes de la física y matemática, el análisis del flujo vehicular permite describir la forma en como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad y así mismo determinar el nivel de eficiencia.

A continuación, se describen algunas de las características esenciales del flujo vehicular, las cuales son representadas en tres variables principales: el flujo, la velocidad y la densidad. Una vez se realiza el debido análisis entre estas tres variables, se puede establecer las características de la corriente de tránsito, como también predecir las consecuencias de diferentes opciones de operación o de proyecto.

- *Variables relacionadas con el flujo.*
 - Tasa de Flujo q y Volumen Q . La tasa de flujo, es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. Es pues, el número de vehículos, N , que pasan durante un intervalo de tiempo específico [5], se define en la ecuación (1).

$$q = \frac{N}{T} \left(\frac{\text{Vehiculos}}{\text{Hora}} \right) \quad (1)$$

- Intervalo simple (hi) es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos [5].
- *Variables relacionadas con la velocidad.* Las variables que se encuentran relacionadas con la velocidad son: la velocidad instantánea, la velocidad media temporal, la velocidad media espacial, la velocidad de recorrido, la velocidad de marcha, la distancia de recorrido y el tiempo de recorrido.
- *Variables relacionadas con la densidad*
 - Densidad o Concentración (k). Se refiere al número N , de vehículos que ocupan un espacio en determinado, d , de una vialidad en un momento dado, como se expresa en la ecuación (2).

$$K = \frac{N}{d} \left(\frac{\text{veh}}{\text{Km}} \right) \quad (2)$$

4.2 Flujo de tráfico intersección Carrera 30 x Calle 2

Para iniciar con el uso de la herramienta ANFIS, se usará una muestra de datos adquiridas en la intersección carrera 30, calle 2, ver Tabla 1, dicha muestra toma el tiempo de los semáforos, el flujo de carros y el número de vehículos que transitan en un carril. Los datos obtenidos en la Tabla 1 fueron en sitio.

Tabla 1. Datos la Carrera 30 x Calle 2

Tiempo	Vehículos por carril	Flujo $q=N/T$	k Densidad $K=N/d$	Velocidad km/h	Flujo vehicular $q=VK$
9:20:00 - 9:21:30	34	26,15	45	30	1350
9:22:30 - 9:24:00	37	28,46	55	30	1650
9:25:00 - 9:26:30	30	23,08	35	30	1050
9:27:30 - 9:29:00	35	26,92	45	30	1350
9:30:00 - 9:31:30	36	27,69	50	30	1500

A continuación, en la Figura 2 obtenida a través de Google Maps, se muestra el segmento de la carrera 30, calle 2, que se simulará con la herramienta Anylogic, también es posible visualizar la distancia entre los semáforos de la calle 2 y calle 1f, carrera 30.

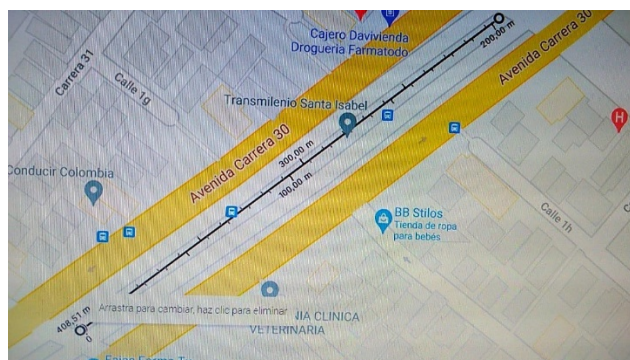


Figura 2. Distancia entre dos semáforos de calle 2 y calle 1f, carrera 30

4.3 Controlador por Anfis

Se crea el controlador por medio del software de Anfis para asignar los tiempos de la semaforización con los desfases principales, con el fin de buscar que los vehículos que transitan por la intersección escogida puedan alcanzar su máxima velocidad, de acuerdo con las leyes actuales de tránsito. Entrenamiento del modelo neuro difuso implementado por medio de las reglas difusas tipo Takagi-Sugeno [20], como se ve en las ecuaciones (3) y (4).

$$\text{Si } X \text{ es } A_1 \text{ y } Y \text{ es } B_1, \text{ entonces } f_1 = p_1X + q_1Y + r_1 \quad (3)$$

$$\text{Si } X \text{ es } A_2 \text{ y } Y \text{ es } B_2, \text{ entonces } f_2 = p_2X + q_2Y + r_2 \quad (4)$$

Donde: A_n Y B_n Son los conjuntos difusos de entrada; P, Q, R son constantes.

Niveles de activación de las reglas se observan en la ecuación (5).

$$W_n = A_n(x) \cdot B_n(y), n = 1, 2 \dots [.] \quad (5)$$

Las salidas serán obtenidas como combinación lineal entre los parámetros de tráfico trabajados en el modelo matemático, el modelo de salida es representado por las ecuaciones (6) y (7) [20].

$$f = (W_1f_1 + W_2f_2)/(W_1 + W_2) \quad (6)$$

$$f = \bar{W}_1f_1 + \bar{W}_2f_2 \quad (7)$$

En la ecuación (7) \bar{W}_1 y \bar{W}_2 son los valores normalizados de W_1 y W_2 con respecto a la suma ($W_1 + W_2$). Esta red difusa se muestra en la Figura 3a [21].

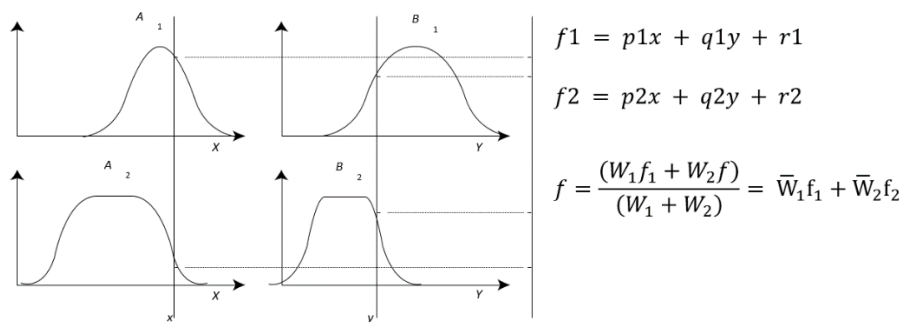


Figura 3a. Relaciones Difusas [21]

En la Figura 3b, representa un tipo de red adaptativa compuesta por 5 capas, donde X y Y son las entradas del flujo vehicular y número de vehículos.

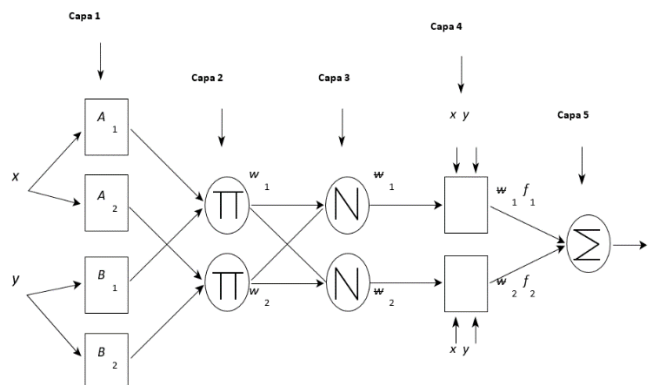


Figura 3b. Arquitectura de Anfis Para Intersección [21]

En la Figura 4 se puede apreciar que X, Y son las entradas de flujo vehicular y número de vehículos, en cuanto al tiempo del semáforo en verde se refiere al tiempo tomado o tiempo experimental, donde se ingresan los datos plasmados anteriormente en la Tabla 1. El tiempo de desfase es el tiempo de Salidas F, ecuación suavizada de Anfis. Con la información recolectada sobre la carrera 30 con calle 2, se ingresaron los datos a la red de control Anfis y de acuerdo con las reglas del controlador difuso se insertó el tiempo del semáforo para obtener la salida del flujo vehicular.

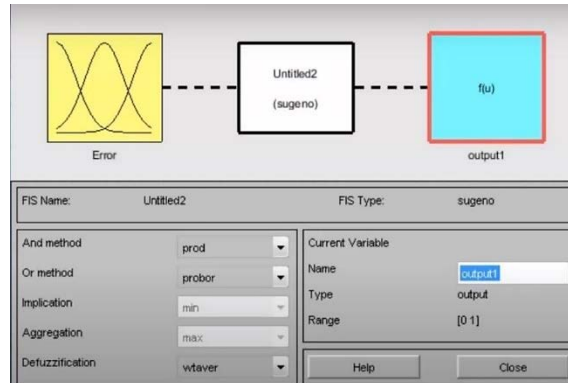


Figura 4. X, Y: Entradas, tv: Tiempo de verde, td: Tiempo de desfase, F: Salidas

En la Figura 5, se puede apreciar el punto de partida para el diseño de los tiempos del semáforo en verde en la intersección y sus respectivos desfases. Basados en los pesos de entrada los cuales son valores normalizados de los tiempos fijos, flujo vehicular y datos de tiempo con el número de vehículos.

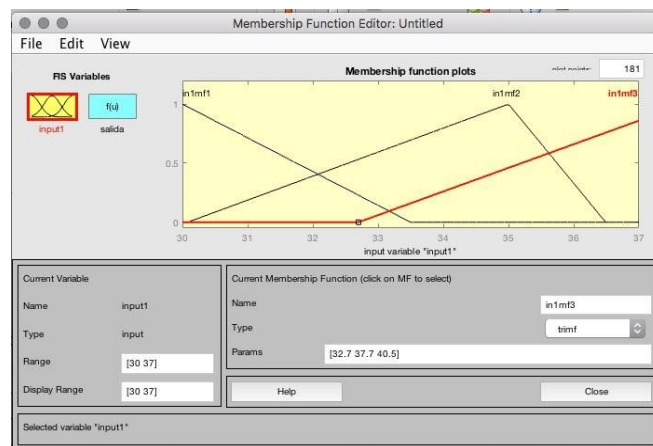


Figura 5. Entradas de la red neuronal

En la Figura 6 se visualiza el número de iteraciones vs la salida del error de la red neuronal, con el fin de minimizar el error del sistema.

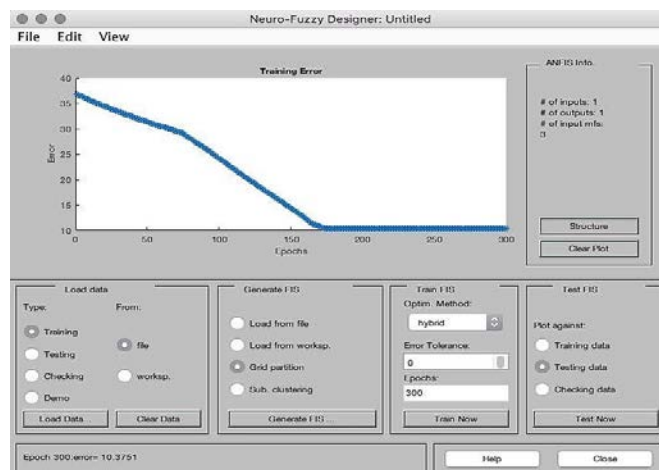


Figura 6. Entrenamiento de la Red

En la Figura 7 se ingresan los datos de flujo vehicular vs número de vehículos, en esta imagen se desea suavizar la transición entre la función inicial y la función final de la red.

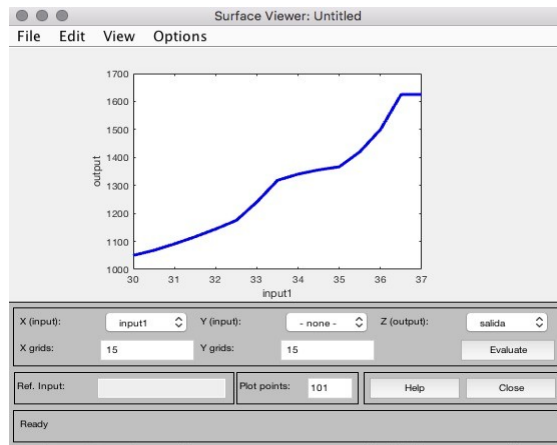


Figura 7. Ecuación suavizada por Anfis

En la Figura 8 se muestra el error del modelo en un instante de tiempo determinado, además del rango mínimo y máximo el cual puede utilizar la red neuronal. Todo esto a partir de las necesidades del sistema.

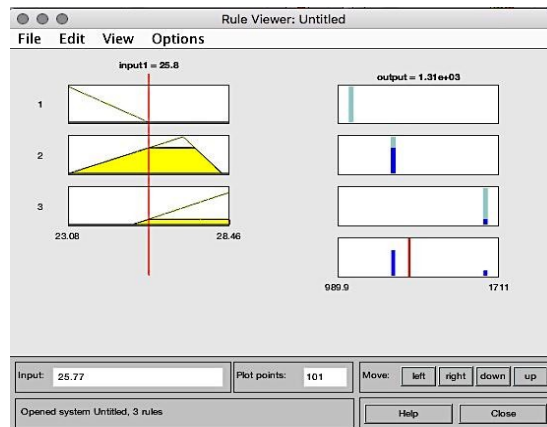


Figura 8. Tabla del error de la red

De acuerdo a la Figura 9, con el modelo estático que se usa actualmente se evidencia en la simulación un *trancón* en un tiempo de 1 hora, el periodo de transición del semáforo es 90 segundos para cambiar a verde.

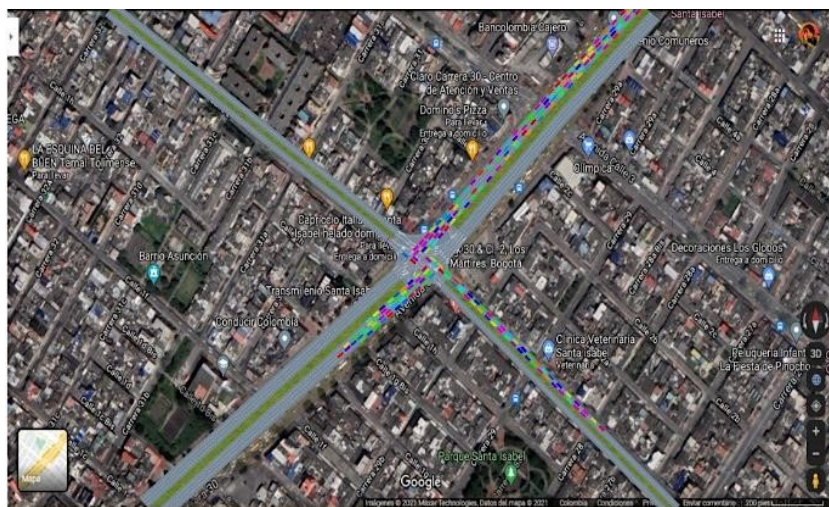


Figura 9. Bloqueo Intersección Norte A Sur, Tiempo Estático

En la Figura 10 se observa que en el modelo difuso de la red ANFIS optimiza la densidad vehicular, permitiendo atender una cantidad más alta de vehículos en la misma distancia, al compararse con el sistema

fijo de tiempos que se usa en la actualidad. En el sentido sur – norte, norte – sur el tiempo de cambio de luz del semáforo fue de 117 segundos con un número de vehículos de 219 (sur - norte) y máximo 234 (norte - sur), en sentido occidente – oriente, oriente – occidente el tiempo de cambio de luz del semáforo es de 68 segundos con un número de vehículos de 65 y máximo de 78. estos datos se obtienen luego de incrementar en un 30% el tiempo de transición.

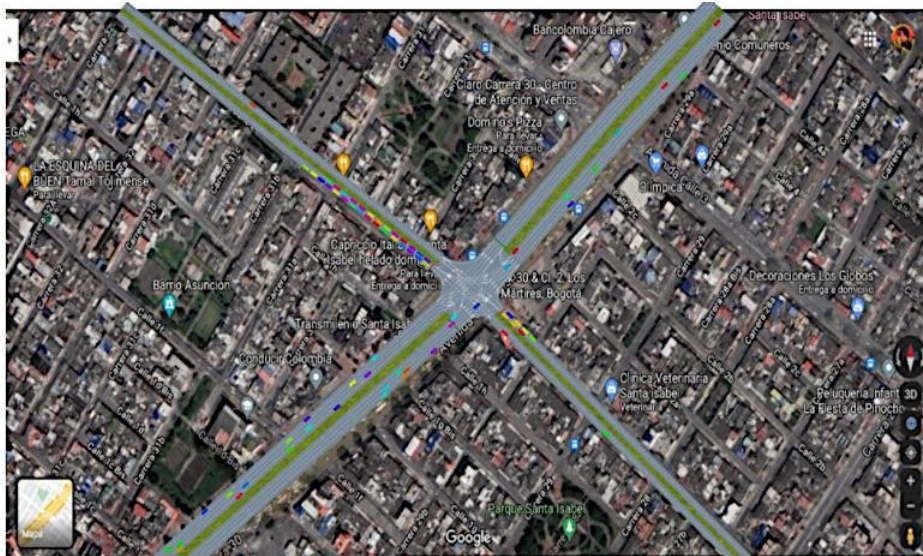


Figura 10. Simulación Anylogic. Tasa Aumento: 30% Tiempo del Semáforo

Se observa en la Figura 11, que en el modelo difuso de la red ANFIS se optimiza la densidad vehicular, permitiendo atender una cantidad más alta de vehículos en la misma distancia, al compararse con el sistema fijo de tiempos que se usa en la actualidad. En el sentido sur-norte, norte-sur el intervalo del tiempo de cambio de luz del semáforo fue de 99 segundos con un número de vehículos de 219 (sur-norte) y máximo 234 (norte - sur), en sentido occidente-oriente, oriente-occidente el tiempo es de 66 segundos con un número de vehículos de 65 y máximo de 78, estos datos se obtienen luego de incrementar en un 10% el tiempo de transición.



Figura 11. Simulación Anylogic, Aumento 10% en el tiempo del semáforo

5. CONCLUSIONES

La ciudad de Bogotá va en camino en afianzarse como una ciudad inteligente y sostenible con ayuda de las TIC, puesto que cuenta con la tecnología y las instituciones necesarias para avanzar en este camino. En cuanto a la movilidad la implementación de semáforos inteligentes que permitan disminuir los tiempos de recorrido no presenta avances.

Ahora bien, el uso de herramientas como la inteligencia artificial y simuladores de tráfico permiten mejorar los tiempos de recorrido o viaje. La herramienta Anfis permitió modelar el sistema lineal y mostrando un control adaptativo con la lógica difusa para la semaforización de la intersección de la carrera 30, con la herramienta de Anylogic se realizó la simulación con una tasa de error entre el 10% y 30 %, tanto para el aumento del tiempo del semáforo como para el número de vehículos manteniendo una velocidad constante de 50 km/h. Se observó en la simulación que al aumentar el tiempo en el semáforo en las tasas de error del 10% y 30%, se despejaban las vías a diferencia de lo que sucedía con el semáforo en forma estática, donde la densidad de tráfico aumentaba produciendo un atasco vehicular.

Si la ciudad implementará un sistema de control de semaforización con inteligencia artificial este podría determinar el tiempo del semáforo con respecto a la densidad de tráfico y definir aumentar o disminuir el flujo de tráfico.

Según lo evidenciado en la simulación de la Figura 9, se observa que el tiempo establecido en el periodo de transición de los semáforos es de 01:30 minutos, modelo estático actualmente usado por la ciudad de Bogotá, se produce un atasco vehicular generando demoras en los tiempos de viaje.

Una vez variando los tiempos, aumentando el flujo, se aumenta la densidad de tráfico, se pudo observar que no se produjeron en el tiempo simulado de una hora atascos en ninguno de los sentidos Sur-Norte, Norte-Sur.

Basándose en los datos tomados, para obtener resultados exitosos con este modelo es aconsejable utilizarlo en un sistema progresivo flexible, en donde sea posible sincronizar los semáforos en un sentido u otro, según las horas pico, donde se presenta máxima demanda vehicular.

REFERENCIAS

- [1] UIT, «Las ciudades inteligentes y sostenibles: Un análisis de las definiciones,» 2014.
- [2] DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística, «DANE,» 30 08, 2019.
- [3] Universidad Nacional de Colombia, «Bogotá y Medellín Ciudades Inteligentes de Colombia,» *DebatesGobierno Urbano*, nº 15, p. 27, 2017.
- [4] E. D. R. H. David Andrés Ramírez, "Diseño de un método para identificar necesidades y oportunidades para la implementación", Bogotá, Octubre, 2016.
- [5] L. A. H. Nicholas J. Garber, "Ingeniería de tránsito y carreteras", México, 2004.
- [6] UIT, «Qué son las ciudades inteligentes,» *Revista actualidades de la UIT*, nº 4, pp. 5,6 Y 7, 2014.
- [7] R. F. y D. L. R. Gonzalez, "Government and governance in intelligent cities, smart transportation study case in Bogotá Colombia", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, nº ISSN 2090-4479, pp. 25-34, 2020.
- [8] D. Sikora, 2017, Recuperado: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383252125007>
- [9] O. A. V. Rojas, «Adaptación ciudadana a las Tecnologías de Información y Comunicación en "Smart,» *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 1, pp. 487,494, 2015.
- [10] D. N. D. P. Nacional, «Documento de lineamientos de política de ciudades inteligentes - Versión borrador,» 4 Septiembre 2020.
- [11] S. L. Á. W. F. S. Wilmer, "Las ciudades inteligentes, ecuador: Utmach", 2018.
- [12] M. A. Arbib, "El cerebro metafórico 2: Redes neuronales y más allá", Nueva York, 1989.
- [13] M. W. Dubin, "How the Brain Works", 2013.
- [14] C. G. Inc., "El primer Big Data Hype Cycle," 31 07 2012. Recuperado: <https://www.gartner.com>
- [15] D. Laney, «Grupo Gartner, Data Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety,» 06 02, 2011.
- [16] M. R. J. C. Rafael Cal, "Análisis del Flujo Vehicular," de *Ingeniería de Tránsito y Transporte*.
- [17] S. D. D. Movilidad, "Simur," 2005,2011,2015,2019, 2019. Recuperado: <https://www.simur.gov.co/portal-simur/datos-del-sector/encuestas-de-movilidad>
- [18] J. C. Chahuara, "Control Neuro Difuso", Perú, 2008.
- [19] H. M. T., H. Demuth y M. Beale, "Neural Network Design", Boston, 1995.
- [20] L. F. p. I. E. S. y. e. Desarrollo, «Fedesarrollo,» 30 04, 2016. Recuperado: <https://www.fedesarrollo.org.co>
- [21] C. A. H. A. L. Luis, Recuperado: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-33052012000100008&script=sci_arttext&tlng=p#fig04
- [22] T. M. G. R. B. B. D. S. Zsófia, "Análisis de estabilidad y diseño de observador no lineal utilizandomodelos difusos de Takagi Sugeno", Berlín, Heidelberg, 1985.

- [23] N. N. a. L. M. S. Haykin, 2008. Recuperado: <http://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf>
- [24] J. Green, "The Smart City Playbook: smart, safe, sustainable," 11 2016. Recuperado: <https://www.esmartcity.es/biblioteca/the-smart-city-playbook-smart-safe-sustainable>
- [25] V. F. y. F. Cfr. Smith, "Sistema inteligente de gestión de tráfico", Perú, 2012.
- [26] CCIT, «Cámara Colombiana de Informática y Telecomunicaciones,» Recuperado: <https://www.ccit.org.co/>
- [27] A. Borshchev, "The anylogic company," 2000. Recuperado: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/multimethod-modeling/>
- [28] G. B. R. Alirio, "Documento ciudades inteligentes", Bogotá, 2018.

Análisis al uso potencial de compuestos híbridos con base en polímeros y materiales nanoestructurados de carbono en supercondensadores flexibles

Diego Alejandro Cuartas Marulanda¹

Cristina Isabel Castro Herazo²

Esteban García Tamayo³

Sara Natalia Herrera Penagos⁴

Zulamita Zapata Benabithé⁵

Universidad Pontificia Bolivariana

Colombia

Las problemáticas que enfrenta la estructura energética mundial requieren escenarios y consensos que promuevan el aprovechamiento de las energías renovables. No obstante, debido a la intermitencia natural de estas tecnologías, para su implementación se impone el reto de desarrollar dispositivos de almacenamiento con mayor capacidad que los existentes. Entre estos dispositivos se encuentran los supercondensadores SCs, también conocidos como condensadores electroquímicos, ultracapacitores o pseudocondensadores, que poseen mayor densidad de potencia y ciclos de carga-descarga más cortos respecto a las baterías, pero valores de densidad de energía menores. Por sus características, los SCs son útiles en una amplia gama de aplicaciones, tales como vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos portables y sistemas de recolección y almacenamiento de energía. Actualmente, los investigadores buscan mejores desempeños electroquímicos en los SCs, mediante la generación de nuevos materiales con altas prestaciones de almacenamiento, empleando metodologías con tendencia verde que permitan reducir el impacto ambiental de sus procesos de fabricación. Los materiales nanoestructurados con base de carbono, tales como nanotubos CNTs, grafeno, y óxidos de grafeno GOs, son candidatos aceptables para el desarrollo de SCs, gracias a su moderada área superficial específica, posibilidad de funcionalización y dopaje, buena conductividad y compatibilidad. Ahora bien, el desarrollo de materiales compuestos con base en nanoestructuras de carbono no debe verse limitado hacia aplicaciones industriales, sino que su estudio abre camino hacia toda una nueva área científica. En este trabajo se presenta un contexto general sobre las temáticas relacionadas con la obtención de electrodos para SCs, obtenidos a partir de diferentes polímeros, con especial énfasis en nanocelulosa bacteriana, y nanoestructuras de carbono, y se realiza un análisis crítico que permita identificar las necesidades de investigación en este campo.

¹ Egresado no graduado de Ingeniería en Nanotecnología.

Contacto: diego.cuartasm@upb.edu.co

² Doctora en Ingeniería, Profesora titular e investigadora.

Contacto: cristina.castro@upb.edu.co

³ Ingeniero físico, Doctor en Ingeniería Química, Profesor titular e investigador.

Contacto: esteban.garcia@upb.edu.co

⁴ Ingeniera Química, Doctora en Ingeniería, Profesora de cátedra e investigadora.

Contacto: sara.herrera@upb.edu.co

⁵ Ingeniera Química, Magíster y Doctora en Ingeniería, Profesora titular e investigadora.

Contacto: zulamita.zapata@upb.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las principales fuerzas impulsoras para el desarrollo del sector energético basado en energías alternativas se encuentran elementos favorables y desfavorables. Por un lado, el aumento vertiginoso de la demanda de la energía y la necesidad urgente de solventar los problemas ambientales que trae consigo el uso desmedido de combustibles derivados del petróleo, hacen promisorio el empleo de las energías limpias. Gracias a su bajo impacto ambiental es posible afrontar el desafío de reducir la emisión de gases de efecto invernadero GEI, disminuyendo su aportación al calentamiento global.

Sin embargo, la discontinuidad de dichas energías impide su disponibilidad de forma permanente para su conversión en electricidad, generando la necesidad de almacenamiento a gran escala para proporcionar estabilidad y confiabilidad a los sistemas eléctricos de potencia [1]. Por otro lado, a pesar de que en Colombia se instauró la Ley 1715 de 2014, que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, ésta aún no ha sido implantada en su totalidad. Este tema está inmerso en la cuarta revolución industrial, donde se prevé que los consumidores se convertirán en generadores de su propia energía eléctrica requerida (*cultura maker*) [2, 3].

Lo anterior es un tema poco difundido, pero paulatinamente irá creciendo, provocando problemas al momento de la generación y la facturación, debido a las complicaciones venideras para las empresas generadoras y distribuidoras a la hora de determinar qué políticas aplicar y cómo comprobar cuánta energía deben producir para suplir la demanda. En la actualidad, los principales dispositivos electroquímicos empleados para el almacenamiento de energía son las baterías y los supercondensadores SCs [4].

Las baterías son económicas y prácticas, lo que muestra las características de una tecnología madura con un rendimiento estable. Sin embargo, su corta vida útil, la baja densidad de potencia, y la huella económica negativa que deja la poca o nula reciclabilidad de sus componentes, limita su amplia aplicación [5]. Los SCs, por su parte, muestran un rendimiento superior en contraste con las baterías tradicionales, con ciclos de carga-descarga más cortos, amplio rango de temperaturas de funcionamiento, alta densidad de potencia y energía, larga vida de almacenamiento y un diseño modular fácil de implementar que les permite adaptarse mejor a un entorno de trabajo exigente [6].

Los SCs fabricados con materiales nanoestructurados de carbono C-NMs son dispositivos de almacenamiento de energía que han sido un foco de interés para importantes investigaciones en la última década. Dichos materiales son versátiles, no solo debido a la gran variedad de estructuras y por ende propiedades, sino también por la existencia de un gran rango de precursores y metodologías para su obtención a gran escala. Así, se pueden obtener diferentes estructuras y propiedades de acuerdo con el tipo de precursor y el método de síntesis utilizado.

En este contexto, a pesar de que los C-NMs se han convertido en excelentes componentes básicos para la fabricación de SCs, su aplicación en electrodos flexibles se ve restringida ya que dichos materiales adolecen de una cierta falta de resistencia mecánica, lo que limita su uso. Los electrodos para SCs se pueden obtener en múltiples presentaciones mediante la mezcla o combinación de materiales de diferente naturaleza. Cabe anotar que, según la literatura, se pueden obtener mejores resultados electroquímicos usando materiales compuesto, los cuales constan de tres componentes esenciales: una matriz como fase continua que puede ser cerámica, metálica o polimérica; refuerzos en fase continua o dispersa, incluyendo fibras y partículas; y, una región de interfaz fina, de la cual depende la unión entre la matriz y el reforzante.

Al elegir cuidadosamente la matriz, el refuerzo y el proceso de fabricación, se pueden adaptar las propiedades del material resultante para cumplir con requisitos específicos [7]. Hoy en día, el desarrollo de polímeros compuestos con base en C-NMs permite lograr arquitecturas tridimensionales 3D estrechamente interconectadas y porosas, con mayor robustez, estabilidad mecánica y flexibilidad. Para su uso en SCs flexibles, la celulosa en particular presenta la ventaja de poder modificar su área superficial específica SSA mediante la aplicación de tratamientos térmicos o de activación; por otro lado, la presencia de grupos hidrófilos en su superficie favorece el contacto entre el material activo del electrodo y el electrolito,

proporcionando un canal de difusión efectivo para los iones provenientes del electrolito. Adicionalmente, la celulosa posee una sobresaliente flexibilidad mecánica, además de ser un material renovable y biodegradable [8]. Con base en lo anterior, es de suponer que, la celulosa combinada con C-NMs tales como los GOs, resulta en un material muy prometedor, gracias a la moderada SSA y a la mediana conductividad que estos presentan en función de su contenido en grupos oxigenados y de sus características morfológicas.

2. MÉTODO

Para llevar a cabo el proceso de la revisión de la literatura se contó con información disponible principalmente en libros, revistas de divulgación e investigación científica, y sitios *web*. Dicha información se clasificó desde una perspectiva delimitada y estructurada. De igual manera, las tesis, memorias e informes publicados como resultados de investigación en Maestría y/o Doctorado, constituyeron una fuente de ideas de actualidad, ya estos contienen una serie de valiosas referencias bibliográficas.

Asimismo, se emplearon ecuaciones de búsqueda que contienen términos específicos del tema a través de palabras clave como: supercondensadores, compuestos biohíbridos de base polimérica, almacenamiento de energía, y nanoestructuras de carbono, entre otros. Por otro lado, la información se organizó de manera sistemática, empleando herramientas digitales como JabRef, Zotero, Mendeley, EndNote, debido a que son eficientes, de uso libre y que permiten organizar la información por título, autor, y revista.

Para el análisis cualitativo de un grupo de documentos se empleó la aplicación Refviz, ya que permite obtener un mapa de proximidad de los artículos de acuerdo con la frecuencia de aparición de palabras en el texto, así como la creación de los listados de descriptores primarios.

Luego, se realizó un análisis de co-citación de autores y de co-ocurrencia, para identificar los frentes de investigación y los autores con más citaciones. También se realizó un análisis detallado de los artículos que se identificaron como directamente relacionados con las ideas más importantes y los aspectos más relevantes asociados a la investigación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Supercondensadores: definición y clasificación

Los supercondensadores SCs son dispositivos empleados para el almacenamiento de la energía eléctrica pasiva (sin transformaciones) y estática, para aplicaciones que requieren una alta densidad de potencia, tales como los sistemas de respaldo de energía, dispositivos portátiles de consumo y automóviles eléctricos híbridos, entre otros [9]. Dichos dispositivos presentan altas densidades de potencia en comparación con las baterías [10]. Los SCs almacenan una cantidad de energía significativamente mayor que los condensadores convencionales, pero menor que las baterías, y son similares en construcción a los condensadores convencionales, excepto que los electrodos metálicos se reemplazan por un electrodo altamente poroso [11].

Los SCs se clasifican en tres tipos, a saber: condensadores de doble capa electrolítica EDLCs, pseudocondensadores PCs, y los SCs mixtos [12]. Los EDLCs usan procesos electrostáticos no farádicos para almacenar la energía. Estos dispositivos actúan en función de las cargas acumuladas en la interfaz que se forma entre el electrolito y el electrodo, y son constituidos primordialmente por C-NMs con valores altos de SSA [13]. En los PCs, los electrodos están formados de polímeros conductores u óxidos metálicos, y utilizan el mecanismo de Faraday para almacenar las cargas, poseen una mayor capacidad de almacenamiento de carga (entre 10 y 100 veces más alta), comparada con la de los EDLCs, pero su limitación se debe a su alto costo de fabricación y a su baja estabilidad cíclica [10, 13]. Los SCs mixtos, por su parte, combinan ambos mecanismos para el almacenamiento de la energía eléctrica.

Ninguno de los materiales empleados hasta ahora para la fabricación de SCs es perfecto, y cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas. Por ejemplo, los C-NMs pueden proporcionar gran densidad energética y estabilidad cíclica, pero su baja capacitancia específica limita su aplicación para dispositivos de

alta densidad de energía [14]. Por otro lado, los óxidos e hidróxidos metálicos poseen una apreciable pseudocapacitancia, junto con la doble capa, y una moderada capacitancia específica en función de sus propiedades redox, morfológicas y estructurales [15]. Adicionalmente, estos materiales exhiben un amplio rango de potencial de carga-descarga; sin embargo, su aplicación está restringida por su SSA limitada, baja conductividad, y alto costo. Por su parte, los PCs ofrecen una alta capacitancia específica, buena conductividad, bajo costo y facilidad de fabricación; pero la estabilidad mecánica es relativamente baja y la vida útil es menor, lo cual puede limitar sus prestaciones [16].

Es importante destacar que, entre la variedad de materiales explorados para estas aplicaciones, los PCs han atraído un mayor interés para la aplicación flexible, debido a su naturaleza polimérica flexible inherente, que es un requisito crucial para la electrónica flexible portátil [10]. Otro campo que ha llamado la atención son los sistemas mixtos o híbridos con óxidos metálicos (MO_x)-polímeros conductores y/o CNTs [17], polímeros conductores con GOs [18], entre otros, que se han desarrollado para mejorar tanto la capacitancia, la estabilidad electroquímica y la densidad de energía específicas de los electrodos [10]. En la Figura 1, se muestran los materiales más utilizados para cada tipo de supercondensador.

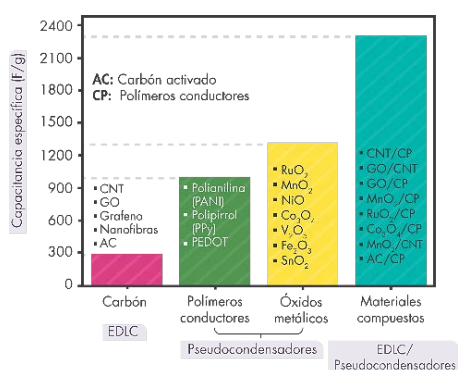


Figura 1. Materiales comúnmente empleados en los diferentes tipos de SCs [10]

Conociendo los tipos de SCs y los materiales utilizados para su construcción, es pertinente mencionar que los SCs también se pueden clasificar en convencionales y flexibles (Figura 2).



Figura 2. Representación gráfica de un supercondensador: a) flexible, y b) convencional [13]

Los SCs convencionales están conformados por una caja exterior, colectores de corriente en forma de láminas metálicas, y electrodos (positivo y negativo) que se disponen inmersos en un electrolito (líquidos o sólidos como cloruro de potasio (KCl) o ácido sulfúrico/alcohol polivinílico (H₂SO₄/PVA)), y son separados entre sí por una capa permeable al transporte de los iones. En los SCs flexibles, la red de carbono altamente conductora y flexible, sirve tanto como electrodos, como colectores de corriente [13, 19].

Ahora bien, definir el tipo y la naturaleza del electrodo a emplear, es un factor muy importante al momento de preparar un supercondensador flexible de alto rendimiento, ya que se requiere tanto de buenas propiedades electroquímicas, como de propiedades mecánicas, en cuanto a resistencia y flexibilidad se refiere [20]. Al respecto, en los EDLCs, se han usado C-NMs con altos valores de SSA, tales como carbones activados [21], CNTs [22], grafeno, y GOs [23], ya sean compactados o bien, embebidos en fibras de carbono [24], textiles [25], papel de celulosa [10], u otros. Los electrodos flexibles de películas de grafeno soportados en politereftalato de etileno (PET) [26], y los CNTs de pared simple SWCNTs embebidos en polidimetilsiloxano (PDMS) [27], polianilina (PANI) [28], y nanocelulosa, han demostrado ser muy prometedores para tales fines [29].

3.2 Materiales de interés para ser utilizados en la elaboración de electrodos para supercondensadores flexibles

3.2.1 Nanocelulosa NC

La nanocelulosa NC se considera una materia prima renovable y multifuncional, con posibilidad para reemplazar muchos materiales no renovables [30]. La NC se clasifica en tres tipos, a saber, microfibras de celulosa o celulosa microfibrilada (CMFs, por sus siglas en inglés para *Celulose Microfibers*), cristales de nanocelulosa o celulosa nanocristalina CNCs y nanocelulosa bacteriana BNC. Entre las características que hace de la NC un material competente para el uso en SCs frente a otros, están su baja densidad, alta resistencia mecánica, elevado módulo de Young y gran relación superficie/volumen [31]. La NC también es apta para usarse como sustrato de materiales conductores en la fabricación de electrodos de compuestos flexibles de alto rendimiento electroquímico. Los electrodos fabricados con NC pueden ser usados en dispositivos de almacenamiento de energía ligeros, de tamaño pequeño, con alta flexibilidad, ciclos de vida más prolongados, y buen rendimiento electroquímico [32, 33].

La NC está compuesta de moléculas repetidas de β -glucosa (desde cientos hasta varios miles de unidades), pues es un homopolisacárido [34, 35]. Los grupos hidroxilo que están ampliamente presentes en su superficie pueden usarse como punto de partida para introducir químicamente nuevas moléculas funcionales [36]. En las paredes celulares de las plantas, las CMFs están incrustados en una matriz que consiste principalmente de lignina para formar un compuesto que proporciona soporte estructural para las células. Las CMFs pueden obtenerse por molienda a alta presión o alta temperatura, o bien, mediante técnicas de microfluidización [37].

Por su parte, los CNCs se pueden extraer mediante hidrólisis ácida, y se diferencian de las CMFs por su grosor, relación de aspecto (largo/ancho) y organización molecular. Finalmente, la BNC es un biopolímero lineal de glucosa altamente cristalino sintetizado principalmente por la bacteria *Gluconacetobacter xylinus*. (anteriormente conocida como *Acetobacter xylinus*). Aunque la producción de BNC se ha estudiado principalmente en *G. xylinus*, otros microorganismos también poseen la capacidad de sintetizar BNC, como *Gluconacetobacter*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Rhizobium*, y *Gram Positive Sarcina ventriculi* [38].

En contraste con las CNFs y los CNCs que se extraen principalmente de fuentes de celulosa vegetal, la BNC es obtenida por procesos biotecnológicos donde se emplean fuentes de carbono de bajo peso molecular como la D-glucosa. Al no contener lignina u otras sustancias como hemicelulosa y pectina a la BNC se le considera celulosa casi pura. La BNC se caracteriza por presentar una cadena polimérica larga con una cristalinidad cercana al 90%. Cabe señalar que, la BNC también se puede utilizar como materia prima para preparar CNFs y CNCs [38].

En general la NC ha llamado la atención para su uso como sustrato en electrodos de SCs flexibles, debido a su SSA ($\sim 100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y grupos hidroxilos expuestos. La presencia de grupos polares $-\text{OH}$ permite la hidrofiliidad, mientras que la exposición de grupos hidrófobos como $-\text{CH}$ promueve la formación de caras hidrofóbicas en las fibrillas elementales. Sumado a esto, los sitios de enlace del hidrógeno permiten la interacción de la celulosa con otros polímeros para formar compuestos fuertes. La porosidad interna la fibra, aunado a la presencia de los grupos hidrófilos en su estructura, garantiza un buen contacto entre el electrodo y el electrolito, proporcionando así un canal de difusión efectivo para los iones provenientes del electrolito [11].

Con relación al uso de NC en SCs, se encuentra que, en las fibras de NC se da un efecto de expansión lineal debido a la absorción de agua, ya que, gracias a la porosidad interna de la fibra y a la presencia de cadenas de grupos hidrófilos (hidroxilos) en su estructura, las fibras de NC tienen la capacidad de absorber la humedad. Estas singularidades permiten en su aplicación como electrodos, la absorción eficaz de electrolitos acuosos a través de canales ideales que favorecen el transporte de iones. Asimismo, para el caso de electrolitos de polímeros de gel, la estructura y singularidades superficiales de la NC promueve el buen contacto electrodo-electrolito y la correcta difusión de los iones en la interfaz de los electrodos.

Finalmente, las CNFs presentan en su superficie, una gran cantidad de grupos carboxilo que permite combinarlas con C-NMs conductores como grafeno, rGOs y CNTs, para formar compuestos con interfaz de alta calidad. Para el caso de compuestos laminados, una correcta interfaz proporciona una ruta continua de conducción entre las diferentes nano-láminas de materiales grafénicos, previniendo eficazmente su agregación, y a la vez, resolviendo los problemas difusionales que se dan con la aglomeración de estas láminas [39].

3.2.2 Nanotubos de carbono CNTs

Los nanotubos de carbono CNTs son una configuración a nivel nanoscópico de átomos de carbono dispuestos en forma de mallas hexagonales que forman una estructura cilíndrica, semejantes a un tubo. Las características de estas estructuras de capas de grafeno enrolladas varían sustancialmente en función de la orientación de los hexágonos que las forman con relación a su eje, destacando porque superan en sus propiedades físicas a la mayoría de los materiales conocidos. Entre los aspectos más importantes de los CNTs se encuentran su peso ligero, las minúsculas dimensiones que les confiere una alta relación de aspecto (proporción entre su diámetro y su longitud), excelente resistencia a la tracción, y buenas características de conducción, que los hacen útiles de ser empleados como reforzantes en diferentes materiales como polímeros, metales y cerámicos [40].

Los CNTs son conocidos por su alta conductividad y resistencia mecánica, por lo tanto, han sido ampliamente estudiados para su uso en EDLCs [41]. Se ha informado que la presencia de defectos en la capa más externa de los CNTs mejora la capacitancia específica de los SCs, debido a una mayor acumulación de carga en su superficie. En algunos trabajos donde se emplearon electrodos fabricados con polímeros conductores y CNTs, se reporta la ventaja de poseer valores altos de pseudocapacitancia [42].

Sin embargo, una debilidad importante de este tipo de electrodos es su inestabilidad mecánica, que se da por cambios dimensionales generados por la continua inserción y liberación de iones durante los procesos cíclicos de carga-descarga. Los compuestos binarios de polímeros conductores y CNTs demuestran una mejora significativa de la estabilidad mecánica y del rendimiento capacitivo de los electrodos [10]. La capacitancia específica de los electrodos construidos con CNTs está muy influenciada por la pureza y la morfología del material de refuerzo, y su superficie es principalmente mesoporosa, asociado a las características texturales de las capas más externas de los tubos [8].

Los CNTs se pueden soportar sobre un sustrato conductor sin necesidad de aglutinante, lo que minimiza la resistencia de contacto entre el material activo y el colector, y simplifica la fabricación de los electrodos. Atribuido a las propiedades hidrofóbicas de las superficies de los CNTs, la capacitancia específica de los CNTs purificados está en el rango de 20 a 80 F g⁻¹. La capacitancia específica se puede aumentar con la aplicación de procesos oxidativos posteriores, hasta valores de ~130 F g⁻¹. En algunos estudios, MWCNTs electrodepositados con polipirrol PPy han logrado una capacitancia de ~170 F g⁻¹, no obstante, la degradación del polímero hace que un ciclo de vida superior a 100.000 ciclos no sea alcanzable. Compuestos similares donde se utilizan SWCNTs en lugar de MWCNTs han alcanzado capacitancias específicas de hasta 265 F g⁻¹. En estos compuestos, el PPy actúa también como un agente conductor [38].

La degradación de estos compuestos se puede acelerar debido a una posible sobrecarga-sobredescarga durante la operación. Del mismo modo, se han utilizado electrodos tipo película, constituida de SWCNTs, crecidos por deposición por CVD con los cuales se construyeron SCs simétricos de diseño compacto. Dichos electrodos mostraron una capacitancia gravimétrica de 140 F g⁻¹; y la densidad de energía y la densidad energética alcanzaron valores de 43.7 W h kg⁻¹ y 197.3 W h kg⁻¹, respectivamente.

Asimismo, en otro estudio prepararon láminas de SWCNTs utilizando un método de filtración en vacío con un filtro de membrana. Estas láminas de SWCNTs presentaron una densidad específica con valores entre 10.2 y 19.4 g cm⁻², y capacitancias gravimétricas entre 18.0 y 40.7 F g⁻¹, en una configuración de tres electrodos [43]. Por otro lado, el crecimiento directo de CNTs sobre un electrodo de tela de carbono mejora el desempeño electrónico y, en consecuencia, el rendimiento del dispositivo para aplicación en celdas de combustible [44].

3.2.3 Grafeno

El grafeno se conoce como el resultado del aislamiento de una sola capa atómica del grafito, tal y como fue descrito en [45]. Las propiedades fundamentales del grafeno hacen de este un material prometedor para una multitud de aplicaciones, gracias a su estructura 2D de espesor atómico, alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia mecánica (Modulo de Young de 1 TPa), resistencia a la tensión (130 GPa) y gran SSA, tiene amplias aplicaciones en sistemas para el almacenamiento de la energía eléctrica [46]. Gracias a la alta movilidad electrónica ($\sim 200.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), el grafeno tiene una conductividad eléctrica muy elevada. Así mismo, la conductividad térmica del grafeno es muy alta, comparable, e incluso superior, a la de los CNTs a temperatura ambiente ($5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) [47].

Por otro lado, se ha informado que la capacitancia intrínseca del grafeno es de $\sim 21 \mu\text{F cm}^{-2}$; donde este valor delimita el límite superior para la capacitancia eléctrica de doble capa para todos los C-NMs. Con base en esto, los SCs fabricados con electrodos de grafeno podrían mostrar valores de capacitancia tan altos como $\sim 550 \text{ F g}^{-1}$, en el caso en el que toda la superficie fuera utilizada. Pero, para comprender el potencial máximo del grafeno es importante saber la densidad energética de una celda empaquetada en su totalidad y no solamente la capacitancia del material. Por otra parte, otros factores como el grosor y la densidad de la película de grafeno y los demás componentes de la celda (colector y separador), la naturaleza del electrolito, entre otros, son parámetros que deben ser tomados en cuenta.

En práctica, la densidad energética de los SCs de grafeno logrado hasta ahora se encuentra entre 15 y 35 W h kg^{-1} , y menos de 60 W h kg^{-1} , muy por debajo de los valores teóricos [48]. Por otro lado, se fabricó una película flexible de grafeno nanoporoso dopado con nitrógeno, mediante una reacción hidrotermal con amoníaco. La capacidad específica de la película fue de 468 F g^{-1} en una solución acuosa de electrolito de 6 M KOH a una velocidad de barrido de 2 mV s^{-1} . La retención de la capacidad tras 10.000 ciclos de carga-descarga a una densidad de corriente de 1 A g^{-1} fue superior al 81% [49].

Con base en la literatura, se afirma que los materiales de grafeno en polvo requieren el uso de aglutinantes para la preparación de los electrodos; esto conlleva a una reducción significativa de los valores de capacitancia esperados. No obstante, recientemente se han estudiado diferentes metodologías que hacen posible obtener arreglos 3D de grafeno mediante autoensablado, lo cual puede evitar el empleo de aglutinantes. Estructuras 3D de grafeno, incluidos geles, espumas, y redes se pueden preparar por métodos que incluyen reducción solvotérmica, reducción química, reducción electroquímica y el autoensamblaje *in situ*. Al respecto, en un estudio llevado a cabo por Walsh, se introdujeron nanoporos en hojas de grafeno, la cual muestra una textura dura, además de buenas propiedades mecánicas luego de un moldeo por compresión [50].

3.2.4 Óxido de grafeno GO

Desde mediados del siglo XIX, se sabe que la oxidación del grafito en medio ácido conduce a un material aislante, higroscópico y con un alto contenido en oxígeno, conocido como óxido de grafito GrO. El GrO ha tenido relevancia debido a la facilidad con que puede ser exfoliado en medio acuoso por sonicación, y así obtener dispersiones de óxido de grafeno GO. El GO, puede ser reducido por diversos métodos, tales como, reducción química (empleando hidracina (N_2H_4) [51], dimetilhidracina UDMH, con fórmula química $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$) [51], borohidruro de sodio (NaBH_4) [52], tratamiento térmico [53], y reducción fotocatalítica [54], entre otros, obteniéndose óxido de grafeno reducido rGO.

El rGO se caracteriza por contener menos grupos funcionales oxigenados OCFGs, y en cierta medida, una recuperada estructura tipo π conjugada del grafeno. De esta forma, el rGO exhibe una conductividad eléctrica más alta que el GO, y características hidrofóbicas en vez de hidrofílicas (como en el caso del GO). El rGO es una alternativa muy viable al uso del grafeno, ya que se obtiene a un menor costo que un grafeno de mayor calidad estructural [55]. La aglomeración de las láminas de rGO tras los procesos de reducción es un problema persistente que debe resolverse a la mayor brevedad, ya que es muy difícil lograr su dispersión en medios acuosos [51]. Cabe anotar que, una vez se realiza la reducción del GO, las propiedades de rGO obtenido son bastante diferentes a las del grafeno, debido a la presencia de OCFGs remanentes en el rGO. La

presencia de grupos funcionales activos en el GO permite la funcionalización covalente de sus láminas de manera similar a la funcionalización covalente de CNTs oxidados, que les permite interactuar de manera eficaz con matrices poliméricas, y con ello, formar materiales compuestos [50].

Además, se pueden agregar materiales espaciadores nanoestructurados para evitar el apilamiento de las hojas de grafeno tales como las *graphene-balls* o bolas de grafeno, provocando que los materiales grafénicos sean dispersables en solventes comunes [46]. También se ha reportado el uso de hojas de grafeno sobre películas de CNTs a través de electrohilado, dichas películas fueron sometidas a torsión formando hilados híbridos de CNTs/grafeno que se emplearon como electrodos. Los electrodos alcanzaron una capacitancia gravimétrica de 111 F g^{-1} , que fue 425% mayor a las de los hilos conformados únicamente de CNTs. La presencia de grafeno condujo a una conductividad eléctrica mayor y a una estructura más porosa; lo cual fue beneficioso para la humectación de los electrodos por en electrolito [56].

3.3 Aplicación de diferentes polímeros y nanomateriales en electrodos para supercondensadores flexibles

En relación con el uso de polímeros conductores como materiales activos de electrodos para SCs, se han estudiado mayormente PANI, PPy, los derivados del politetrafluoroetileno PTFE, y recientemente la nanocelulosa. Por ejemplo, en [57] sintetizaron electrodos compuestos de PANI/SWCNTs mediante la deposición potencioestática *in situ* de PANI sobre SWCNT a un potencial de 0,75 V. Se encontró que la capacitancia específica de los compuestos está fuertemente influenciada por su microestructura, que a su vez está correlacionada con el porcentaje en peso de PANI depositado. Se logró una capacitancia específica de 463 F g^{-1} a 10 mA cm^{-2} para un compuesto con un contenido de 73% (p/p) de PANI.

Por otro lado, en otra investigación se fabricó un electrodo compuesto de PANI/MWCNTs sintetizado por polimerización química *in situ*, logrando una capacidad específica de 606 F g^{-1} a 1.0 A g^{-1} en una configuración de dos electrodos [58]. Por su parte, Zhang y colaboradores [59] depositaron con éxito PANI sobre CNTs alineados verticalmente por la técnica de electrodeposición, donde el material resultante alcanzó una capacitancia específica de 1030 F g^{-1} con una retención de la capacidad del 95% a 118 A g^{-1} y alta estabilidad cíclica. Asimismo, en un trabajo de Lin se sintetizó películas compuestas de PANI/MWCNTs por el método de electrodeposición. Estas películas eléctricamente conductoras funcionaron como electrodos efectivos para SCs transparentes y flexibles con una capacitancia específica máxima de 233 F g^{-1} a una densidad de corriente de 1 A g^{-1} [60]. También, se han fabricado hilos compuestos de PANI/CNTs, mostrando una excelente capacidad electroquímica, alta resistencia mecánica y gran flexibilidad. Los autores afirmaron que, cuando se tejen hilos PANI/CNTs solos o en combinación con hilos textiles convencionales, los SCs se pueden flexionar y estirar repetidamente sin una pérdida significativa de la capacitancia ($\sim 38 \text{ mF cm}^{-2}$) [61].

En el estudio de Wang y otros [62] se empleó un material compuesto de hidrogel de grafeno orientado OGH y PANI. Las láminas PANI/OGH exhibieron una excelente combinación entre alta capacitancia y larga estabilidad cíclica (hasta 1000 ciclos). Sin embargo, los autores concluyeron que un incremento en peso de PANI entre el 6 y el 24%, disminuye drásticamente la capacidad específica de los electrodos desde 1739 hasta 574 F g^{-1} . También se han fabricado electrodos de papel/rGO/PANI, obteniéndose una gran capacitancia gravimétrica de 464.0 F g^{-1} en un sistema de tres electrodos. Los SCs electrodos exhibieron una extraordinaria estabilidad mecánica en diversas situaciones de deformación a las que fueron sometidos, tales como, enrollado, doblado y plegado, respectivamente [63].

Con relación al uso de PPy, Lee construyó membranas de CNTs/poli-3,4-etilendioxitiofeno PEDOT, las cuales retorcieron para producir hilos compuestos y obtener electrodos flexibles parecidos a fibras altamente conductoras. Los hilos CNTs/PEDOT mostraron altas capacitancias (a una velocidad de barrido de 1 V s^{-1} , la capacitancia volumétrica y área fueron de 147 F cm^{-3} y 73 mF cm^{-2} , respectivamente, en una celda de tres electrodos). De otro lado, Fang [64, 65] obtuvo materiales electrodos para SCs auto-soportados de tipo PPy/CNTs mediante la técnica de electrodeposición pulsada que permitió que, monómeros de PPy se difundieran en las paredes de CNTs, individuales, logrando una mejora significativa en la uniformidad del recubrimiento de PPy en CNTs. Se alcanzó una capacitancia específica de 427 F g^{-1} .

Davies [66] fabricó películas flexibles compuestas de grafeno/PPy utilizando el método de electropolimerización pulsada. Con dicho material se pudo alcanzar altos valores de densidad de energía y de potencia, debido a la nucleación favorable de las cadenas de PPy en la superficie del grafeno. La implementación del PPy mejoró significativamente la conductividad eléctrica de los papeles obtenidos, proporcionando una gran pseudocapacitancia. Los SCs simétricos ensamblados con los electrodos de papel/PPy, presentaron una capacitancia específica de 420 mF cm^{-2} para un sistema de tres electros [13]. En otro estudio se fabricó una membrana flexible compuesta de rGO y nanocables de PPy mediante la reducción *in situ* de rGO en presencia de PPy. En dicho trabajo se obtuvo una capacitancia por unidad de área de 175 mF cm^{-2} y excelente estabilidad cíclica [67].

Ahora bien, respecto al uso de otros diferentes refuerzos en la fabricación de electrodos para SCs, mediante los trabajos de Lee y Goodenough [44], Hu y Chen [65], y Miller y Simon [68], se demostró que el dióxido de manganeso MnO_2 es un material propicio para aplicaciones de almacenamiento de energía, gracias su bajo impacto ambiental, relación costo-efectividad y buena capacitancia específica que osciló entre 200 F g^{-1} y 1000 F g^{-1} cuando se evaluó en sistemas de tres electrodos. En este sentido, Huang [25] produjo diferentes nanocables NWs por la técnica de electropolimerización directa. Esta técnica es muy prometedora para la fabricación de polímeros conductores ya que no requiere el uso de aglomerantes. En torno a estas temáticas, los autores reportaron la obtención de un cable, a partir de la torsión de un haz de fibras de acero inoxidable, que se usó como soporte estructural fibroso para la deposición de rGOs, MnO_2 y PPy. Con ello se obtuvo finalmente un electrodo fibrilar recubierto con un material compuesto base rGOs/ MnO_2 /PPy. El soporte estructural de acero fue flexible, mecánicamente robusto y altamente conductor que proporcionó una capacitancia 36.6 mF cm^{-1} empleando una configuración de tres electrodos.

Por otro lado, los electrodos basados en nanocelulosa y grafeno muestran ventajas significativas debido a su relativo bajo costo, flexibilidad, versatilidad, ya que son amigables con el medio ambiente. [8]. Se han empleado CNFs y PANI para fabricar electrodos flexibles (20% p/p de nanofibras), mostrando una capacitancia específica máxima de $421,5 \text{ F g}^{-1}$ a una densidad de corriente de 1 A g^{-1} , en una configuración de dos electrodos. Además, dichos electrodos híbridos exhibieron un buen balance entre la densidad de energía y la potencia, un excelente rendimiento electroquímico y una retención de capacitancia bajo flexión repetida durante 1000 ciclos [69]. En [70] se desarrolló un supercondensador de gran flexibilidad, utilizando CNFs/rGO/CNTs como electrodos. Los SCs resultantes mostraron una gran capacitancia específica de 252 F g^{-1} a una densidad carga de 0.5 A g^{-1} , y una notable estabilidad cíclica (más del 99.5% de la capacitancia se mantuvo después de 1000 ciclos a una densidad de corriente de 1 A g^{-1}) en una configuración de dos electrodos.

Por su parte, Sharma y otros, investigaron el desarrollo de un supercondensador 3D flexible de alto rendimiento basado en celulosa/grafito/PANI el cual se obtuvo mediante la electrodeposición de PANI/NWs sobre una superficie celulosa/grafito. El SC mostró una capacitancia específica de 7142 mF cm^{-2} y una capacitancia gravimétrica de 357 F g^{-1} a una densidad de corriente de 80 mA cm^{-2} , en un sistema de tres electrodos; mientras que, por otro lado, se obtuvo una capacitancia específica de 5120 mF cm^{-2} y una capacitancia gravimétrica de 256 F g^{-1} a una densidad de corriente 100 mA cm^{-2} en un sistema de dos electrodos, empleando como electrolito $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. El alto rendimiento correspondió, principalmente a las características porosas de las capas de grafito y PANI/NWs que proporcionaron numerosos sitios electroactivos para llevar a cabo reacciones redox, con baja resistencia a la difusión de los iones [71].

Algunos estudios han mostrado que los materiales compuestos de base NC/GOs exhiben una buena densidad de energía, ya que pueden tener un flujo de energía por unidad de área de hasta $20 \mu\text{W h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ($\sim 6 \text{ W h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) a una potencia por unidad de área de 15.5 mW cm^{-2} . Estos también poseen estabilidad en ciclado, llegando a retener aproximadamente el 99.1% de la capacidad inicial después de 5000 ciclos de carga-descarga y, además, muestran buena flexibilidad mecánica cuando se usan como componentes de electrodos. Por todo lo anterior, dichos materiales se consideran excelentes candidatos para ser empleados en dispositivos de almacenamiento de energía portátil y renovable [72, 73].

Yun Liu [8] obtuvo materiales base CNFs con una potencia de $1749,1 \text{ mW g}^{-1}$, ciclos de carga y descarga relativamente rápidos, y una alta estabilidad cíclica (~ 20000 ciclos al 100%), exhibiendo, además, una SSA

alta (CNFs separadas ~ 50 nm de ancho formando redes ultrafinas), una transferencia de electrones de 171 S m^{-1} , y una capacitancia específica de 1274.2 F g^{-1} , en una configuración de tres electrodos. De otro lado, Xing [8] sintetiza nanocompuestos de PANI soportada en CNFs, a través de la polimerización *in situ* de la anilina sobre las CNFs en presentación de escamas, logrando una conductividad eléctrica de hasta 5.1 S cm^{-1} y una capacitancia específica de 273 F g^{-1} a una densidad de corriente de $0,2 \text{ A g}^{-1}$. En otros trabajos, se evaluó la incorporación *in situ* de escamas de GOs y PEDOT/poliestireno adenosulfonato (PSS) en una matriz de BNC para la fabricación de materiales flexibles. Los electrodos de BNC exhibieron un alto rendimiento electroquímico, en configuraciones de tres electrodos (373 F g^{-1} a 1 A g^{-1}), y buena estabilidad cíclica (~ 85% de retención de capacitancia durante 1000 ciclos). De la misma forma, se mostró una notable flexibilidad, estabilidad en el rendimiento bajo deformación mecánica extrema, y una retención de capacidad de aproximadamente 88% durante 4500 ciclos [74].

3.4 Materiales compuestos NC/grafeno

Los materiales compuestos de NC -grafeno se pueden preparar como películas delgadas y como estructuras porosas 3D [75]. Un electrodo flexible en estado de gel puede estar compuesto de hidrogeles y/o aerogeles. Un hidrogel es una macroestructura ensamblada mediante enlaces de hidrógeno, fuerzas de *Van der Waals* entre grupos funcionales, y enlaces conjugados tipo $\pi - \pi$. Los compuestos NC /grafeno en estado de gel pueden mantener un equilibrio entre la atracción $\pi - \pi$ y la solvatación repulsiva de las láminas de grafeno, permitiendo la preparación de electrodos con rendimiento ultra alto. Los electrodos de hidrogel NC/grafeno se fabrican mediante reticulación química o reticulación física (Figura 3) [8, 76].

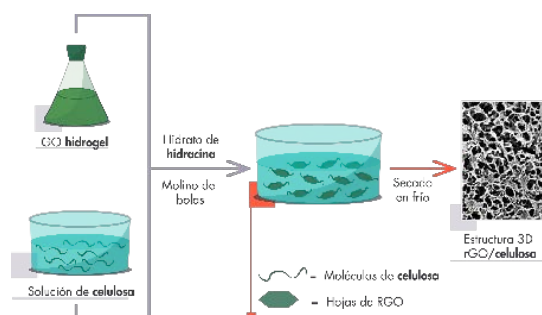


Figura 3. Esquema síntesis hidrogel [77]

La producción de hidrogeles compuestos de NC/grafeno y NC/GOs también puede ir acompañada de un tratamiento de cizallamiento mecánico empleando un molino de bolas, que permite obtener hidrogeles más uniformes en dispersión y térmicamente más estables. En estos materiales, las escamas de GOs promueven la preservación de la estructura 3D, formando una estructura porosa durante la etapa de secado por congelación (liofilización). Por su parte, los aerogeles se preparan a partir de hidrogeles mediante secado supercrítico o liofilización (Figura 4). El secado por liofilización es simple y no requiere cambios de solvente ni tiempos prolongados para la elaboración de los geles [78]. Estos hidrogeles a menudo tienen alta densidad de corriente, excelente estabilidad del ciclo de carga-descarga y buena flexibilidad mecánica.

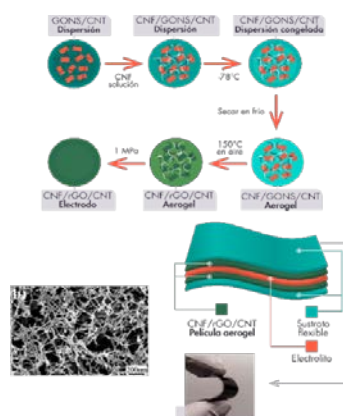


Figura 4. Esquema síntesis aerogel [70]

Los compuestos de NC/grafeno en estado gel tienen una estructura 3D porosa exenta de aglutinantes, lo que reduce en gran medida el fenómeno de la aglomeración del grafeno. En consecuencia, los SCs preparados a partir de compuestos gelificados de NC/grafeno muestran un buen rendimiento electroquímico. Sin embargo, la aplicación de estos materiales en SCs se ve limitada porque la capacitancia específica que se obtiene es baja debido a la alta viscosidad y las dificultades de difusión del gel [79].

Una opción para aumentar la capacitancia específica de estos electrodos puede ser la adición de materiales pseudocapacitivos en la superficie del gel. Al respecto, Zheng y su equipo obtuvieron electrodos de materiales de aerogel de NC/GOs/CNTs. Se alcanzaron valores de capacitancia específica alrededor de los 252 F g^{-1} a una densidad de corriente de 0.5 A g^{-1} y una retención de 99.5% del valor inicial después de 1000 ciclos cuando el ensayo se llevó a cabo empleando una densidad de corriente de 1 A g^{-1} [70].

3.4.1 Películas

La NC y el grafeno pueden formar película delgada para preparar electrodos a base de papel. Muestran una conductividad excelente, con una preparación simple y sin el dopado de agentes conductores o aglutinantes (Figura 5). La suspensión mixta de NC/grafeno se puede utilizar para formar una película mediante filtración al vacío o deposición química de vapor. Por tal motivo es la estructura más común para el supercondensador basado en NC/grafeno [80].

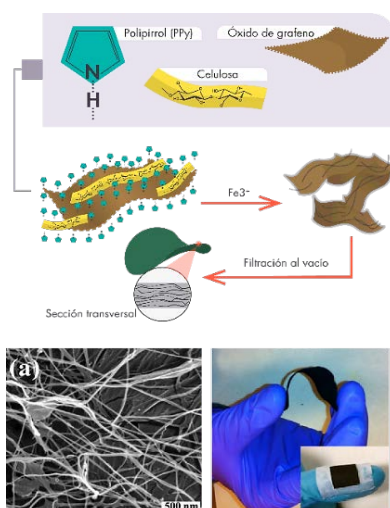


Figura 5. Película nanocelulosa, esquema [80]

3.4.2 Red porosa tridimensional

Además de los hidrogeles y los aerogel, existe una gran variedad de estructuras de red porosas 3D. Las estructuras de red porosas 3D tipo NC/grafeno poseen alta conductividad, grandes valores de SSA y canales de difusión cortos que son idóneos para que se dé la difusión rápida de los iones provenientes del electrolito. Las características estructurales únicas de estos materiales permiten aliviar el colapso estructural que se puede dar durante los ciclos de carga y descarga cuando se emplean aditivos como el PPy u otros [81]. En la Figura 6, se muestra un esquema de la síntesis de una red porosa 3D.

La NC se puede dispersar y autoensamblar bajo la acción del ultrasonido. Los híbridos de NC/grafenos reticulados por enlaces covalentes se pueden obtener mediante esterificación entre grupos hidroxilo. Se fabricaron compuestos comenzando con la dispersión del grafeno en agua y la posterior adición de pirrol y su polimerización *in situ*. El material mostró una capacitancia específica de 556 F g^{-1} en un capacitor con configuración asimétrica. Después de 2000 ciclos, el compuesto mantuvo el 93.5% de la capacitancia inicial.

3.5 Fabricación de SCs

Para la construcción de SCs generalmente se mezcla el material activo con agentes de la conductividad y aglutinantes en diferentes proporciones [83]. La presencia de aglutinantes conduce a la disminución de los

valores de conductividad eléctrica. Por otro lado, el uso de aditivos y el requerimiento de separadores de los electrodos, aumentan el volumen de los electrodos y el volumen de la celda, respectivamente, afectando significativamente la flexibilidad de los mismos[83]. Al respecto, también se han preparado electrodos de compuestos Ni(OH)₂/celulosa/grafeno sin necesidad de aglutinantes, reduciendo el peso de los electrodos y evitando el decremento del rendimiento electroquímico de los mismos.

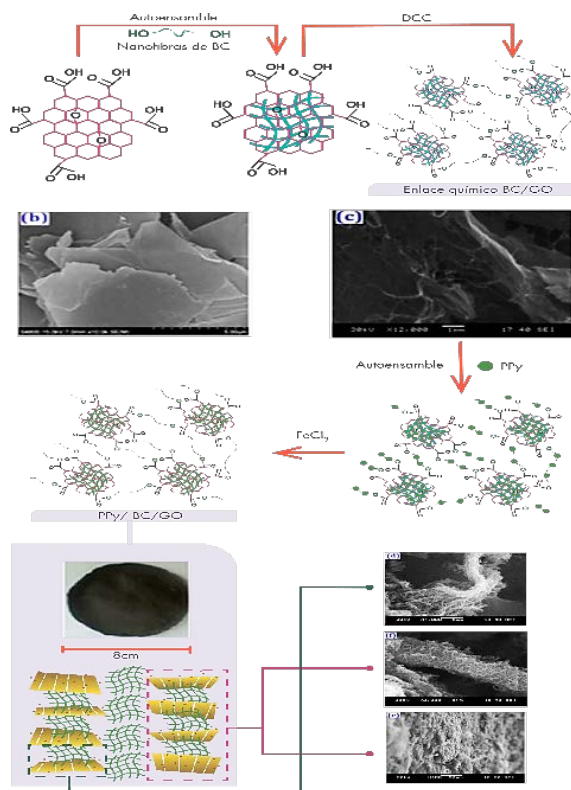


Figura 6. Esquema síntesis NC red porosa 3D [82]

En los últimos años se han conseguido grandes desarrollos en cuanto a la fabricación de SCs sólidos con colectores de corriente autoportantes, flexibles y libres de metales [84]. En dichos dispositivos el electrolito sólido (en película o en gel) se dispone entre láminas de material activo, posteriormente el arreglo electrodo-electrolito se presiona para garantizar el contacto entre los componentes del supercondensador. Este tipo de configuración laminar no solo reduce el grosor y el peso de los SCs, sino que también simplifica su proceso de fabricación y reduce significativamente los costos asociados.

El electrolito sólido utilizado como capa intermedia proporciona iones aniónicos y catiónicos que participan en el almacenamiento de la energía. Los colectores empleados en SCs sólidos poseen características de conducción eléctrica, brindan flexibilidad mecánica y estabilidad electroquímica, y proporcionan canales propicios para el transporte de electrones que intervienen en las reacciones electroquímicas. Dichos canales, además, aceleran la transferencia de carga, reduciendo la polarización electroquímica y mejorando la eficiencia de los ciclos carga-descarga [84]. El uso de compuestos NC/grafeno se ve limitado para este tipo de aplicaciones en SCs sólidos, debido principalmente a que la celulosa posee una elevada resistividad eléctrica que inhibe la transferencia de electrones en su superficie.

Por otro lado, el problema de agregación del grafeno genera una gran resistencia de contacto interno entre el electrodo y el electrolito. Para el caso del rGO, los grupos hidrófilos presentes de rGO hacen que la conductividad de este material sea considerablemente menor respecto de la del grafeno, lo que conlleva a que el transporte de electrones no satisfaga altas corrientes de trabajo en aplicaciones a gran escala. problemas como la demanda del supercondensador. Por lo anterior, los SCs sólidos basados en compuestos NC/grafeno requieren de un mayor estudio en cuanto materiales para la fabricación de colectores [84]. Generalmente, un colector de corriente se compone de láminas metálicas y películas de polímero sintético con revestimiento conductor (i.e., láminas de oro o un sustrato plástico con recubrimiento de oro). En los últimos años, se ha utilizado películas finas de grafeno como colector de

corriente. El material activo de dichas películas posee buena accesibilidad, lo que se atribuye a la gran SSA y porosidad de estos. Al mismo tiempo, la resistencia en la interfaz entre grafeno-electrolito es baja, permitiendo satisfacer la conductividad requerida para la aplicación [84].

3.6 Rendimiento de SCs basados en compuesto NC/grafeno

Como se ha dicho anteriormente, cualidades como flexibilidad mecánica, rendimiento electroquímico, estabilidad cíclica, naturaleza renovable y biodegradabilidad, desempeñan un papel preponderante al momento de evaluar el rendimiento de los SCs.

Al respecto, la NC muestra una buena flexibilidad y es un material sustrato flexible y asequible, pese a estas ventajas, la NC por sí misma no es conductora de la electricidad, y debe combinarse con otros materiales conductores para mostrar mejor estabilidad y rendimiento electroquímico [85]. El grafeno, por otro lado, tiene una alta conductividad eléctrica y no requiere de aditivos conductores o aglutinantes inactivos cuando se utiliza como material de electrodo supercondensador flexible.

Por tal motivo, simplifica el proceso de preparación del electrodo, además que evita la disminución del rendimiento electroquímico del electrodo que se produce por aditivos o aglutinantes, y es que cuando el ligante polimérico se mezcla con el material activo, inevitablemente, la capacitancia es limitada [86]. Al usar la NC como vehículo combinado con grafeno, también sirve como espaciador que evita la aglomeración entre láminas de grafeno. Los materiales de electrodo de supercondensador flexibles requieren una buena absorción de agua, y el pequeño tamaño de la NC conduce a una mayor exposición a hidroxilo, permitiendo una buena absorción de agua.

3.7 Flexibilidad mecánica

Los electrodos basados en NC/grafeno pueden cumplir con los requisitos de flexibilidad debido a la buena flexibilidad mecánica del grafeno y la NC, y es que el material de NC a puede permanecer sin cambios durante repetidos ejercicios de plegado/desplegado, torsión y estiramiento. Al mismo tiempo, la estructura jerárquica 3D y la estructura molecular de cadena rígida de la NC a facilitan la composición con sustratos flexibles y otros materiales. Los electrodos se caracterizan por tener una estructura porosa que es fácil de doblar o cortar. Además, tiene un buen rendimiento de velocidad cuando se usa como electrodo de supercondensador, y el área bajo la curva en voltamperometría cíclica es mayor que la obtenida cuando solo se usa óxido de grafeno para el electrodo, mostrando las ventajas de la estructura 3D [87]. En la Figura 7, se muestran ensayos mecánicos y flexibilidad para NC.

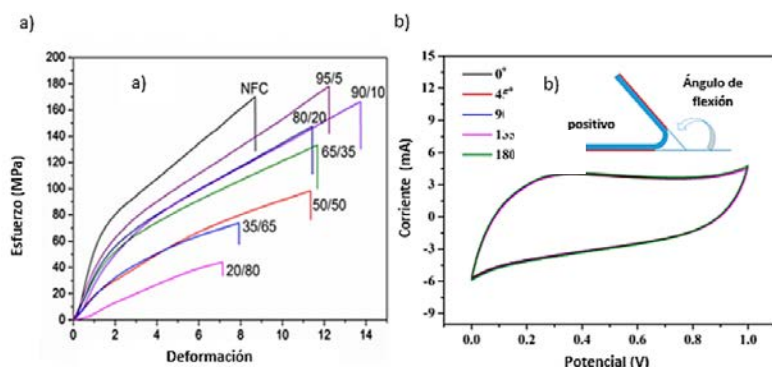


Figura 7. a) Curvas típicas de tensión-deformación de compuestos CNF/PANI [88], b) Curvas de voltamperometría cíclica de un supercondensador (CNFs/rGOs/CNTs) a diferentes ángulos de flexión [85]

3.8 Rendimiento electroquímico

El grafeno tiene una conductividad eléctrica muy alta, una gran SSA y cantidad de estructuras entre capas. Además, la superficie del grafeno y el GO puede contener muchos grupos funcionales, lo que es beneficioso para la implementación del composite. Con relación a esto, se incrustaron rGO en una rejilla de NC, proporcionando un marco híbrido unidimensional y bidimensional altamente conductivo. El material

exhibió un buen desempeño electroquímico, con una capacitancia específica de 216 F g^{-1} a una densidad de corriente de 1 A g^{-1} [89] (Figura 8). Por otro lado, la modificación de la celulosa con grupos amino, sulfónico, u otros grupos funcionales injertados incrementa el número de enlaces de hidrógeno entre su superficie y la de otros materiales, mejorando la resistencia mecánica del material compuesto y beneficiando la conductividad del material [90].

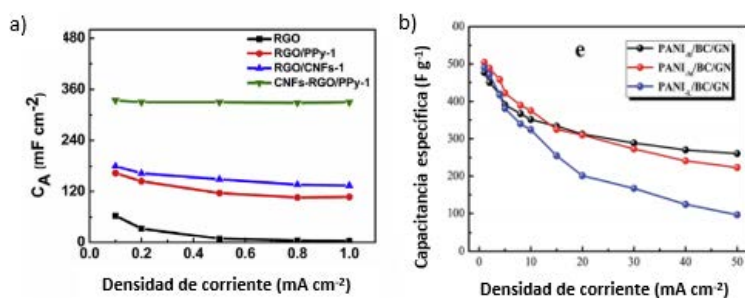


Figura 8. Rendimiento electroquímico a) rGO/CNF/PPy [91] b) PANI b) PANI/BNC/grafeno [92].

3.9 Estabilidad cíclica

Se sabe que los SCs tienen una buena estabilidad en ciclado en comparación con las baterías de iones de litio y los condensadores convencionales. La vida útil de la batería disminuye porque la batería sufre cambios químicos irreversibles o cambios de fase irreversibles durante los procesos de carga y descarga. Por otro lado, la estructura del material del electrodo en un supercondensador casi no cambia, lo que garantiza la estabilidad cíclica. A pesar de ello, la estabilidad del ciclo electroquímico disminuye debido a la presencia del electrolito y otras impurezas durante el reciclaje del supercondensador. En los SCs pseudocapacitivos, los grupos OCFGs remanentes conducen a reacciones redox durante el proceso de oxidación, dando como resultado una desviación de la curva de circulación y una disminución en la estabilidad del supercondensador. En este caso el grafeno muestra buena estabilidad cíclica cuando se utiliza como electrodo supercondensador debido a la baja presencia de impurezas oxigenadas [11].

En los EDLCs, la gran SSA del material del electrodo asegura una gran área de contacto entre el electrodo y el electrolito, garantizando una excelente estabilidad del ciclo. Aunque la celulosa no conduce electricidad, todavía juega un papel importante en los materiales de los electrodos, cuando el electrodo está impregnado con electrolito, la fibra de celulosa puede absorber bien el electrolito debido a su estructura hidrofílica. La estructura porosa de la membrana compuesta preparada con celulosa puede mejorar la permeabilidad del electrolito, acortar la distancia de transporte de iones y mejorar la estabilidad del ciclo [13]. Los materiales base NC/grafeno pueden considerarse una opción viable para aplicaciones en electrodos con buena estabilidad en ciclado (Figura 9).

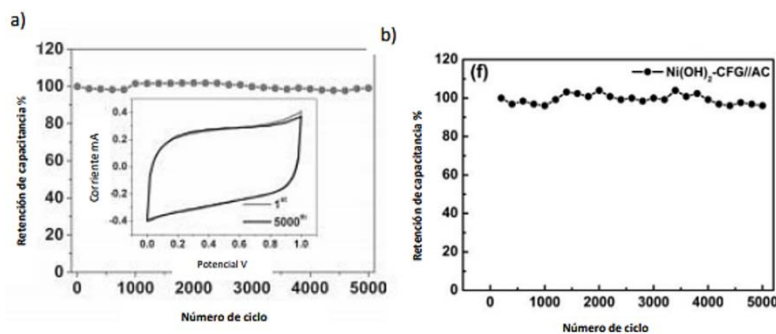


Figura 9. Estabilidad cíclica a) celulosa/grafeno [93], b) Ni(OH)₂ Fibra de celulosa/grafeno [94]

3.10 Naturaleza renovable y biodegradabilidad

El desarrollo de los dispositivos utilizados en la vida diaria se ha orientado hacia la biodegradabilidad, biocompatibilidad y renovabilidad. Los materiales provenientes del petróleo tienen un impacto

medioambiental muy grande debido a su no biodegradabilidad; por lo tanto, los materiales biodegradables provenientes de biomasa son un desarrollo importante. La celulosa es biodegradable, biocompatible y flexible y muestra una alta resistencia mecánica. Como material inteligente, la celulosa puede aplicarse en diversos campos de la industria, desde sensores, hasta electrodos renovables y separadores para SCs [95].

4. CONCLUSIONES

Los materiales gráfenicos son prometedores para ser usados en electrodos de SCs, debido a su alta conductividad, gran SSA, bajo peso y gran flexibilidad mecánica. No obstante, se debe tomar en cuenta que aún es necesario contar con una comprensión más profunda acerca de los mecanismos de almacenamiento, especialmente para las reacciones que se dan en la interfaz electrodo-electrolito. En adición a esto, se debe trabajar fuertemente en el diseño de electrodos con estructuras porosas que permitan formar redes interconectadas, para con ello, poder controlar las interacciones entre los materiales tipo grafeno, matrices poliméricas, y otros agentes pseudocapacitivos, logrando así electrodos flexibles con alto rendimiento electroquímico.

A pesar de que diversos investigadores han demostrado que los SCs fabricados con grafeno y GOs poseen características de rendimiento superior a la de los disponibles comercialmente, la falta de técnicas viables para su producción en masa limita significativamente su potencial. La gran mayoría de las técnicas empleadas para la producción a gran escala de materiales gráfenicos dependen de la eficiencia de la exfoliación de grafito expandido (dando como resultado láminas de grafeno multicapa con área superficial limitada) o de la reducción de GrO (materiales con conductividad eléctrica baja causada por la presencia de OCFGs residuales y defectos microestructurales). Por otro lado, la reducción de GrO sigue siendo un desafío, debido a que su proceso de síntesis incluye procedimientos complicados y métodos de purificación, que a menudo requieren en uso de productos químicos tóxicos y corrosivos que causan problemas ambientales.

En la actualidad el desarrollo de SCs más ligeros, económicos, amigables con el medio ambiente, resistentes y con buena flexibilidad, está generando una fuerte demanda. Para este fin, el estudio de la celulosa como material constituyente de electrodos para SCs flexibles es un foco de interés científico e industrial, debido a que es un biopolímero abundante en la naturaleza, con una gran cantidad de atributos que incluyen, una buena porosidad, hidrofiliidad y excelentes propiedades mecánicas, haciendo de este un material idóneo para su combinación con otros que sean adecuados para el almacenamiento de la energía, ya sean polímeros conductores, C-NMs y óxidos metálicos, entre otros.

Definir el tipo y la naturaleza del electrodo a emplear, es un factor muy importante al momento de preparar un SC flexible, ya que se requiere tanto de buenas propiedades electroquímicas, como de propiedades mecánicas adecuadas. En los SCs de doble capa, el empleo de C-NMs eriales carbonosos como carbones activados, los CNTs, grafeno, y GOs, compactados y/o embebidos en PANI, PET, PDMS, y celulosa, han demostrado ser muy prometedores para tales fines

La nanocelulosa bacteriana (BNC) es un material prometedor para su uso en la fabricación de compuestos funcionales para SCs flexibles mediante crecimiento *in situ* o adsorción de nanoestructuras presintetizadas en su superficie, lo que permite el desarrollo de nuevos materiales con excelentes propiedades mecánicas, buen contenido y distribución controlada de la porosidad, facilidad de síntesis, con posibilidad de funcionalización química. No obstante, para su producción a gran escala, se debe tener presente que las técnicas de fabricación actuales que implican etapas de cultivo, extracción, purificación, activación por pirólisis, entre otras, que limitan las perspectivas en términos de factibilidad económica y escalabilidad. Por lo tanto, existe una necesidad de desarrollar nuevos métodos de producción de BNC que sean eficientes, escalables, y de menor costo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Newton Fund Institutional Link y a MinCiencias Colombia por la financiación del Proyecto *Nanocellulose obtained from Colombian Figue plant Biomass Waste for applications in energy storage materials*, del cual hace parte la presente revisión.

REFERENCIAS

- [1] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," vol. 13, pp. 1513–1522, 2009.
- [2] S. Carvajarl and D. Meerbeke, "Análisis De La Regulación De Fncer En Colombia ¿Suficiencia O Insuficiencia Normativa?," vol. 53, no. 9, pp. 8–9, 2019.
- [3] R. Ladino, "La energía solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia," *Pontif. Univ. Javeriana*. Bogota, D.C., Marzo 2011, pp. 1–136, 2011.
- [4] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [5] D. P. Dubal, O. Ayyad, V. Ruiz, and P. Gómez-Romero, "Hybrid energy storage: The merging of battery and supercapacitor chemistries," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 7, pp. 1777–1790, 2015.
- [6] B. K. Kim, S. Sy, A. Yu, and J. Zhang, "Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion," *Handb. Clean Energy Syst.*, pp. 1–25, 2015.
- [7] T.-D. Ngo, "Introduction to Composite Materials," *Compos. Nanocomposite Mater. - From Kno. to Ind. Appl.*, 2020.
- [8] J. Xing, P. Tao, Z. Wu, C. Xing, X. Liao, and S. Nie, "Nanocellulose-graphene composites: a promising nanomaterial for flexible supercapacitors," *Carbohydr. Polym.*, 2018.
- [9] A. González, E. Goikolea, J. A. Barrera, and R. Mysyk, "Review on supercapacitors: Technologies and materials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1189–1206, 2016.
- [10] I. Shown, A. Ganguly, L. Chen, and K. Chen, "Conducting polymer-based flexible supercapacitor," pp. 2–26, 2014.
- [11] K. Kakaei, M. D. Esrafil, and A. Ehsani, "Graphene-Based Electrochemical Supercapacitors," *Interface Sci. Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 339–386, 2019.
- [12] W. K. Chee, H. N. Lim, Z. Zainal, N. M. Huang, I. Harrison, and Y. Andou, "Flexible Graphene-Based Supercapacitors: A Review," *J. Phys. Chem. C*, vol. 120, no. 8, pp. 4153–4172, 2016.
- [13] S. Palchoudhury, K. Ramasamy, R. K. Gupta, and A. Gupta, "Flexible Supercapacitors : A Materials Perspective," vol. 5, no. January, pp. 1–9, 2019.
- [14] A. Ghosh and Y. H. Lee, "Carbon-based electrochemical capacitors," *ChemSusChem*, vol. 5, no. 3, pp. 480–499, 2012.
- [15] N. L. Wu, "Nanocrystalline oxide supercapacitors," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 75, no. 1–3, pp. 6–11, 2002.
- [16] M. Zhi, C. Xiang, J. Li, M. Li, and N. Wu, "Nanostructured carbon-metal oxide composite electrodes for supercapacitors: A review," *Nanoscale*, vol. 5, no. 1, pp. 72–88, 2013.
- [17] Q. Xiao and X. Zhou, "The study of multiwalled carbon nanotube deposited with conducting polymer for supercapacitor," *Electrochim. Acta*, vol. 48, no. 5, pp. 575–580, 2003.
- [18] J. Yan *et al.*, "Preparation of a graphene nanosheet/polyaniline composite with high specific capacitance," *Carbon N. Y.*, vol. 48, no. 2, pp. 487–493, 2010.
- [19] S. Shi *et al.*, "Flexible supercapacitors," *Particuology*, vol. 11, no. 4, pp. 371–377, 2013.
- [20] K. Jost, G. Dion, and Y. Gogotsi, "Textile energy storage in perspective," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 28, pp. 10776–10787, 2014.
- [21] L. Dong *et al.*, "Simultaneous Production of High-Performance Flexible Textile Electrodes and Fiber Electrodes for Wearable Energy Storage," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 8, pp. 1675–1681, 2016.
- [22] J. Smithyman and R. Liang, "Flexible supercapacitor yarns with coaxial carbon nanotube network electrodes," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 184, no. 1, pp. 34–43, 2014.
- [23] L. Kou *et al.*, "Coaxial wet-spun yarn supercapacitors for high-energy density and safe wearable electronics," *Nat. Commun.*, vol. 5, no. May, pp. 1–10, 2014.
- [24] S. Biniak, B. Zieleńdziak, and J. Siedlewski, "The electrochemical behaviour of carbon fibre electrodes in various electrolytes. Double-layer capacitance," *Carbon N. Y.*, vol. 33, no. 9, pp. 1255–1263, 1995.
- [25] Y. Huang *et al.*, "From industrially weavable and knittable highly conductive yarns to large wearable energy storage textiles," *ACS Nano*, vol. 9, no. 5, pp. 4766–4775, 2015.
- [26] S. Shi, C. Xu, C. Yang, Y. Chen, J. Liu, and F. Kang, "Flexible asymmetric supercapacitors based on ultrathin two-dimensional nanosheets with outstanding electrochemical performance and aesthetic property," *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–7, 2013.
- [27] X. Chen, H. Lin, P. Chen, G. Guan, J. Deng, and H. Peng, "Smart, stretchable supercapacitors," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 26, pp. 4444–4449, 2014.
- [28] X. Chen *et al.*, "Electrochromic fiber-shaped supercapacitors," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 48, pp. 8126–8132, 2014.
- [29] D. Liubing *et al.*, "Flexible electrodes and supercapacitors for wearable energy storage: A review by category," 2016.
- [30] Z. Wang, P. Tammela, M. Strømme, and L. Nyholm, "Cellulose-based Supercapacitors: Material and Performance Considerations," *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 18, pp. 1–22, 2017.
- [31] L. Nyholm, G. Nyström, A. Mihranyan, and M. Strømme, "Toward flexible polymer and paper-based energy storage devices," *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 33, pp. 3751–3769, 2011.

- [32] Z. Wang *et al.*, "Surface Modified Nanocellulose Fibers Yield Conducting Polymer-Based Flexible Supercapacitors with Enhanced Capacitances," *ACS Nano*, vol. 9, no. 7, pp. 7563–7571, 2015.
- [33] Q. Zhong, J. Zhong, B. Hu, Q. Hu, J. Zhou, and Z. L. Wang, "A paper-based nanogenerator as a power source and active sensor," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 6, pp. 1779–1784, 2013.
- [34] D. Klemm, B. Heublein, H. P. Fink, and A. Bohn, "Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 44, no. 22, pp. 3358–3393, 2005.
- [35] R. J. Moon, A. Martini, J. Nairn, J. Simonsen, and J. Youngblood, *Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites*, vol. 40, no. 7. 2011.
- [36] K. Hua *et al.*, "Translational study between structure and biological response of nanocellulose from wood and green algae," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 6, pp. 2892–2903, 2014.
- [37] H. P. S. Abdul Khalil *et al.*, "Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 99, pp. 649–665, 2014.
- [38] A. F. Jozala *et al.*, "Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 100, no. 5, pp. 2063–2072, 2016.
- [39] K. Gao, Z. Shao, X. Wang, Y. Zhang, W. Wang, and F. Wang, "Cellulose nanofibers/multi-walled carbon nanotube nanohybrid aerogel for all-solid-state flexible supercapacitors," *RSC Adv.*, vol. 3, no. 35, pp. 15058–15064, 2013.
- [40] N. K. Mehra, V. Mishra, and N. K. Jain, "A review of ligand tethered surface engineered carbon nanotubes," *Biomaterials*, vol. 35, no. 4, pp. 1267–1283, 2014.
- [41] L. Zhang and X. S. Zhao, "Carbon-based materials as supercapacitor electrodes," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 38, no. 9, pp. 2520–2531, 2009.
- [42] Y. Y. Horng, Y. C. Lu, Y. K. Hsu, C. C. Chen, L. C. Chen, and K. H. Chen, "Flexible supercapacitor based on polyaniline nanowires/carbon cloth with both high gravimetric and area-normalized capacitance," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 13, pp. 4418–4422, 2010.
- [43] J. N. Barisci, G. G. Wallace, and R. H. Baughman, "Electrochemical studies of single-wall carbon nanotubes in aqueous solutions," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 488, no. 2, pp. 92–98, 2000.
- [44] C. Hu and W. Chen, "Effects of substrates on the capacitive performance of $\text{RuO}_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$ and activated carbon – RuO_x electrodes for supercapacitors," vol. 49, pp. 3469–3477, 2004.
- [45] K. S. Novoselov *et al.*, "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films," vol. 146, no. 2, pp. 93–94, 2004.
- [46] M. Aliofkhaezrai, *Advances in graphene science Edited by Mahmood Aliofkhaezrai*.
- [47] A. A. Balandin *et al.*, "Superior thermal conductivity of single-layer graphene," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 902–907, 2008.
- [48] J. Proctor, D. Melendrez, and A. Vijayaraghavan, *An introduction to graphene and carbon nanotubes*. 2016.
- [49] S. Yue *et al.*, "Fabrication of flexible nanoporous nitrogen-doped graphene film for high-performance supercapacitors," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 21, no. 6, pp. 1653–1663, 2017.
- [50] E. D. Walsh *et al.*, "Dry-Processed, Binder-Free Holey Graphene Electrodes for Supercapacitors with Ultrahigh Areal Loadings," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 43, pp. 29478–29485, 2016.
- [51] S. Stankovich *et al.*, "Graphene-based composite materials," *Nature*, vol. 442, no. 7100, pp. 282–286, 2006.
- [52] H. J. Shin *et al.*, "Efficient reduction of graphite oxide by sodium borohydride and its effect on electrical conductance," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 12, pp. 1987–1992, 2009.
- [53] Y. Zhu *et al.*, "Exfoliation of graphite oxide in propylene carbonate and thermal reduction of the resulting graphene oxide platelets," *ACS Nano*, vol. 4, no. 2, pp. 1227–1233, 2010.
- [54] O. Akhavan, "Photocatalytic reduction of graphene oxides hybridized by ZnO nanoparticles in ethanol," *Carbon N. Y.*, vol. 49, no. 1, pp. 11–18, 2011.
- [55] J. Carlos and G. Gallegos, "Sistemas Híbridos De Polianilina Y Artificiales Y Supercondensadores," p. 248, 2012.
- [56] J. Foroughi *et al.*, "Highly Conductive Carbon Nanotube-Graphene Hybrid Yarn," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 37, pp. 5859–5865, 2014.
- [57] V. Gupta and N. Miura, "Influence of the microstructure on the supercapacitive behavior of polyaniline/single-wall carbon nanotube composites," *J. Power Sources*, vol. 157, no. 1, pp. 616–620, 2006.
- [58] S. R. Sivakumar, W. J. Kim, J. A. Choi, D. R. MacFarlane, M. Forsyth, and D. W. Kim, "Electrochemical performance of polyaniline nanofibres and polyaniline/multi-walled carbon nanotube composite as an electrode material for aqueous redox supercapacitors," *J. Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 1062–1068, 2007.
- [59] H. Zhang, G. Cao, Z. Wang, Y. Yang, Z. Shi, and Z. Gu, "Tube-covering-tube nanostructured polyaniline/carbon nanotube array composite electrode with high capacitance and superior rate performance as well as good cycling stability," *Electrochem. commun.*, vol. 10, no. 7, pp. 1056–1059, 2008.
- [60] H. Lin *et al.*, "Conducting polymer composite film incorporated with aligned carbon nanotubes for transparent, flexible and efficient supercapacitor," *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–6, 2013.
- [61] K. Wang, Q. Meng, Y. Zhang, Z. Wei, and M. Miao, "High-performance two-ply yarn supercapacitors based on carbon nanotubes and polyaniline nanowire arrays," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 1494–1498, 2013.
- [62] Y. Wang, X. Yang, L. Qiu, and D. Li, "Revisiting the capacitance of polyaniline by using graphene hydrogel films as a substrate: The importance of nano-architecturing," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 477–481, 2013.

- [63] L. Liu, Z. Niu, L. Zhang, W. Zhou, X. Chen, and S. Xie, "Nanostructured Graphene Composite Papers for Highly Flexible and Foldable Supercapacitors," pp. 1–8, 2014.
- [64] Y. Fang *et al.*, "Self-supported supercapacitor membranes: Polypyrrole-coated carbon nanotube networks enabled by pulsed electrodeposition," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 2, pp. 674–679, 2010.
- [65] H. Y. Lee and J. B. Goodenough, "Supercapacitor Behavior with KCl Electrolyte," vol. 223, pp. 220–223, 1999.
- [66] A. Davies *et al.*, "Graphene-based flexible supercapacitors: Pulse-electropolymerization of polypyrrole on free-standing graphene films," *J. Phys. Chem. C*, vol. 115, no. 35, pp. 17612–17620, 2011.
- [67] J. Zhang, P. Chen, B. H. L. Oh, and M. B. Chan-Park, "High capacitive performance of flexible and binder-free graphene-polypyrrole composite membrane based on in situ reduction of graphene oxide and self-assembly," *Nanoscale*, vol. 5, no. 20, pp. 9860–9866, 2013.
- [68] J. R. Miller and P. Simon, "Electrochemical Capacitors for Energy Management," vol. 651, no. 2008, 2012.
- [69] H. Wang, E. Zhu, J. Yang, P. Zhou, D. Sun, and W. Tang, "Bacterial Cellulose Nanofiber-Supported Polyaniline Nanocomposites with Flake-Shaped Morphology as Supercapacitor Electrodes," 2012.
- [70] Q. Zheng, Z. Cai, and S. Gong, "Cellulose Nano fiber/Reduced Graphene Oxide/Carbon Nanotube Hybrid Aerogels for Highly Flexible and All-Solid-State Supercapacitors," 2015.
- [71] K. Sharma, K. Pareek, R. Rohan, and P. Kumar, "Flexible supercapacitor based on three-dimensional cellulose/graphite/polyaniline composite," *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 604–611, 2019.
- [72] K. Gao *et al.*, "Cellulose nanofiber-graphene all solid-state flexible supercapacitors," *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, no. 1, pp. 63–67, 2013.
- [73] C. Yan *et al.*, "Highly Stretchable Piezoresistive Graphene – Nanocellulose Nanopaper for Strain Sensors," pp. 2022–2027, 2014.
- [74] Q. Jiang *et al.*, "In situ Grown Bacterial Nanocellulose/Graphene Oxide Composite for Flexible Supercapacitor," 2017.
- [75] D. Ghosh and S. O. Kim, "Chemically modified graphene based supercapacitors for flexible and miniature devices," *Electron. Mater. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 719–734, 2015.
- [76] D. Yang, J. Shen, X. Yang, and M. A. Zifeng, "Progress in graphene based devices and sensors." pp. 1–29, 2011.
- [77] W. Ouyang, J. Sun, J. Memon, C. Wang, J. Geng, and Y. Huang, "Scalable preparation of three-dimensional porous structures of reduced graphene oxide/cellulose composites and their application in supercapacitors," *Carbon N. Y.*, vol. 62, pp. 501–509, 2013.
- [78] A. Javadi *et al.*, "Polyvinyl alcohol-cellulose nanofibrils-graphene oxide hybrid organic aerogels," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 13, pp. 5969–5975, 2013.
- [79] K. Wang *et al.*, "Flexible solid-state supercapacitors based on a conducting polymer hydrogel with enhanced electrochemical performance," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 46, pp. 19726–19732, 2014.
- [80] F. Paquin, J. Rivnay, A. Salleo, N. Stingelin, and C. Silva, "Nanocellulose coupled flexible polypyrrole/graphene oxide composite paper electrodes with high volumetric capacitance," *J. Mater. Chem. C*, 3, pp. 10715–10722, 2015.
- [81] X. Cao, Z. Yin, and H. Zhang, "Three-dimensional graphene materials: Preparation, structures and application in supercapacitors," *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 1850–1865, 2014.
- [82] Y. Liu, J. Zhou, J. Tang, and W. Tang, "Three-Dimensional, Chemically Bonded Polypyrrole/Bacterial Cellulose/Graphene Composites for High-Performance Supercapacitors," *Chem. Mater.*, vol. 27, no. 20, pp. 7034–7041, 2015.
- [83] C. Zhong, Y. Deng, W. Hu, J. Qiao, L. Zhang, and J. Zhang, "A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 21, pp. 7484–7539, 2015.
- [84] B. Mehrabi-Matin, S. Shahrokhian, and A. Irajizad, "Silver Fiber Fabric as the Current Collector for Preparation of Graphene- Based Supercapacitors," *Electrochim. Acta*, vol. 227, pp. 246–254, 2017.
- [85] Y. J. Kang *et al.*, "All-solid-state flexible supercapacitors fabricated with bacterial nanocellulose papers, carbon nanotubes, and triblock-copolymer ion gels," *ACS Nano*, vol. 6, no. 7, pp. 6400–6406, 2012.
- [86] Y. Shao *et al.*, "Graphene-based materials for flexible supercapacitors," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 11, pp. 3639–3665, 2015.
- [87] N. D. Luong, J. T. Korhonen, A. J. Soininen, J. Ruokolainen, L. S. Johansson, and J. Seppälä, "Processable polyaniline suspensions through in situ polymerization onto nanocellulose," *Eur. Polym. J.*, vol. 49, no. 2, pp. 335–344, 2013.
- [88] L. Ma, R. Liu, H. Niu, M. Zhao, and Y. Huang, "Flexible and freestanding electrode based on polypyrrole/graphene/bacterial cellulose paper for supercapacitor," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 137, pp. 87–93, 2016.
- [89] Y. Chang *et al.*, "Embedding Reduced Graphene Oxide in Bacterial Cellulose-Derived Carbon Nanofibril Networks for Supercapacitors," *ChemElectroChem*, vol. 4, no. 10, pp. 2448–2452, 2017.
- [90] G. Ning, Z. Fan, G. Wang, J. Gao, W. Qian, and F. Wei, "Gram-scale synthesis of nanomesh graphene with high surface area and its application in supercapacitor electrodes," *Chem. Com.*, vol. 47, no. 21, pp. 5976–5978, 2011.
- [91] M. Mo, C. Chen, H. Gao, M. Chen, and D. Li, "Wet-spinning assembly of cellulose nanofibers reinforced graphene/polypyrrole microfibers for high performance fiber-shaped supercapacitors," *Electrochim. Acta*, vol. 269, pp. 11–20, 2018.

- [92] R. Liu, L. Ma, S. Huang, J. Mei, J. Xu, and G. Yuan, "Large areal mass, flexible and freestanding polyaniline/bacterial cellulose/graphene film for high-performance supercapacitors," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 109, pp. 107426–107432, 2016.
- [93] Z. Weng, Y. Su, D. W. Wang, F. Li, J. Du, and H. M. Cheng, "Graphene-cellulose paper flexible supercapacitors," *Adv. Energy Mater.*, vol. 1, no. 5, pp. 917–922, 2011.
- [94] L. L. Zhang *et al.*, "A vertical and cross-linked Ni(OH)₂ network on cellulose-fiber covered with graphene as a binder-free electrode for advanced asymmetric supercapacitors," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 37, pp. 19077–19084, 2015.
- [95] J. Zhang *et al.*, "Renewable and superior thermal-resistant cellulose-based composite nonwoven as lithium-ion battery separator," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 1, pp. 128–134, 2013.

Desarrollo de un sistema portátil para lombricultura con control de humedad por goteo y monitoreo de temperatura

Edgar Andrey Parrado Carpintero¹

Alben Melo Vega²

Corporación Universitaria del Meta
Colombia

La presente investigación está dirigida a la creación de un sistema que les facilite a los lombricultores el control de humedad de la tierra de sus cultivos de lombrices, una idea que nace en el parque metropolitano María Lucía, propiedad de la Universidad del Meta, Colombia, donde se llevan a cabo proyectos de Ingeniería ambiental e ingeniería de alimentos, en específico cultivos, huertas, biodigestores, mariposario y lombricultura, entre otros. Estos proyectos son atendidos por los estudiantes y profesores encargados de los procesos, pero durante recesos académicos o vacacionales, los profesores sin contrato y los estudiantes sin matrícula dejan a la deriva estas investigaciones, hasta cuando se retoman las clases. El personal encargado de esta propiedad a veces no puede ocuparse de estos proyectos y se ha encontrado, al comienzo de los semestres, que algunas huertas se secaron, la maleza cubre cultivos y que las lombrices se murieron o se las comieron otros animales. Con la actual situación de clases virtuales el problema se acrecentó. Por lo tanto, se plantea un sistema portátil (Módulo) con el objetivo de controlar automáticamente la humedad de la tierra con un micro riego por goteo. Monitorear la temperatura de la tierra de las lombrices requiere implementar un prototipo de lombricultura en un recipiente apropiado (Tanque 250L), que tenga incorporada una llave para salida de humus, mangueras del microrriego, electroválvula, sensores de humedad y temperatura, tapa en malla contra depredadores, además del módulo electrónico que lleve el control del sistema y muestre la información en una pantalla. Al proponer el cultivo portátil se busca fácil movilidad y sobre todo tener la supervisión independiente, así como que un solo tanque elevado pueda dar abasto a varios cultivos, para que se pueda pensar en el emprendimiento del pequeño lombricultor.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica.

Contacto: andrey.parrado@hotmail.com

² Ingeniero Electrónico y Magíster en Educación.

Contacto: alben.melo@unimeta.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La universidad cuenta con una propiedad a las afueras de la ciudad de Villavicencio conocida como el Parque Metropolitano María Lucía, la cual se usa para prácticas, visitas de campo, entre otras; además en donde funcionan proyectos ambientales como el Jardín Botánico Francisco Javier Matiz, el Parque Ecológico Fray Diego García y el centro de investigaciones de ingeniería de alimentos. Allí se estaba desarrollando el macro proyecto: *Huerta agroecológica y elaboración de abonos orgánicos como estrategia educativa y de seguridad alimentaria*, que involucra varios programas de la escuela de ingenierías, este dio origen a la participación del presente proyecto de ingeniería electrónica. En la Figura 1 se muestra el rótulo que identifica en el sitio donde se desarrolla el proyecto.



Figura 1. Macro Proyecto

Como se ve en la Figura 2, la extensión y gran zona verde es apta para proyectos agroecológicos, también se alcanza a apreciar el sector construido donde se llevará a cabo el proyecto de lombricultura. Para la institución contar con estos espacios es fundamental para implementar la interdisciplinariedad e incorporación de nuevas áreas del conocimiento.



Figura 2. Parque Metropolitano

2. MARCO CONCEPTUAL

Uno de los proyectos más destacados a nivel nacional es la realización de un sistema de monitoreo de variables de temperatura y humedad relativa para el laboratorio de agromática del SENA Cartago, la implementación del sistema realizado bajo invernadero permitió reducir el impacto generado por altos niveles de humedad y presencia de insectos [1].

A nivel internacional se cuenta con un proyecto realizado en México en el año 2008, se trata de un sistema de riego automatizado que se creó con la intención de medir la humedad del suelo y determinar el momento oportuno y cantidad de riego que requiere cierto tipo de cultivo [2].

2.1 Lombricultura

Es una biotecnología orientada a la utilización de la lombriz como herramienta de trabajo para el reciclaje de materia orgánica (Figura 3) que permite enfrentar problemas de contaminación orgánica [3].



Figura 3. Cultivo típico de lombrices

2.1.1 La lombriz roja

Entre las pocas especies de lombrices que pueden explotarse en cautividad está la lombriz roja de California (Figura 4), de la cual se han obtenido, por selección, varios tipos, que se pueden explotar en terrenos al aire libre de cualquier zona de clima mediterráneo sin necesidad de ningún tipo de alojamiento fijo. La selección de esta lombriz está orientada inicialmente a aumentar la cantidad de comida ingerida, con el fin de incrementar la producción de humus, pero no se obtuvieron resultados positivos, por lo que la selección se encamina a prolongar su vida y aumentar la frecuencia de la reproducción. La lombriz roja, cuando es adulta, mide de 5 a 6 centímetros, su diámetro oscila entre 3 y 5 milímetros, es de color rojo oscuro y pesa aproximadamente un gramo. Cuando las condiciones del medio son favorables, esta lombriz ingiere diariamente una cantidad de comida equivalente a su propio peso, del cual expele un 60 por 100 en forma de humus.



Figura 4. Lombrices rojas

La lombriz roja puede vivir hasta 16 años. Cuando la temperatura y la humedad del medio donde vive son adecuadas, se aparea cada 7 días. Las cápsulas se abren pasados entre 14 y 21 días de incubación, según sea la temperatura del medio, y de cada una de ellas sale un número de crías que oscila entre 2 y 20. Las lombrices recién nacidas son de color blanco, que se vuelve rosado a los 5 o 6 días y se convierte definitivamente en rojo oscuro a los 15 o 20 días.

El tamaño de individuo adulto se alcanza a la edad de 7 meses. La actividad sexual disminuye en los meses fríos y en los calurosos, siendo mayor durante los meses templados. La máxima actividad sexual se logra cuando la temperatura del medio donde habita oscila alrededor de los 20 grados centígrados. A diferencia de la lombriz común, que tiende a alejarse del lugar donde inicialmente se ha instalado, la lombriz roja no se aleja de sus alojamientos (Figura 5), salvo en el caso de que surjan unas condiciones muy desfavorables. La lombriz roja no deposita sus deyecciones sobre la superficie del suelo, con lo cual no existe la posibilidad de que una parte de éstas sea arrastrada por el viento o por el agua. En términos generales, al cabo de un año, un módulo inicial de lombriz roja se multiplica de 8 a 12 veces [4].



Figura 5. Cultivo de lombrices a gran escala

2.1.2 Temperatura en lombricultura

Las lombrices son delicadas y no soportan que la temperatura del sustrato cambie bruscamente. Esta puede variar entre los 15 y 26° C, a una temperatura menor de 0° C, las lombrices pueden morir si se exponen a más de 30 ° C, dejan de reproducirse; y a temperaturas mayores, también pueden morir [5].

2.1.3 El riego

Es una práctica cultural que requiere optimizar en lo posible la eficiencia en la aplicación de agua, entendiendo como tal la fracción del agua aplicada que es utilizada para satisfacer las necesidades del cultivo y las de lavado (Figura 6). Para ello es necesario minimizar las pérdidas por evaporación, escorrentía, percolación profunda y otras pérdidas menores, para lo cual se requiere que el sistema esté bien diseñado, manejado y conservado [6].



Figura 6. Riego por goteo

El riego por goteo suministra agua de manera lenta y uniforme a baja presión a través de mangueras de plástico instaladas dentro o cerca de la zona a humedecer. Es una alternativa a los sistemas de riego por aspersores o surcos [7].

3. MÉTODO

Para este trabajo se usó la metodología Cuantitativa con método proyectual que son un Conjunto de procedimientos utilizados durante un proceso de trabajo para resolver un problema de diseño. Requiere habilidades y conocimientos específicos para un desarrollo lógico y creativo en la toma de decisiones [8].

3.1 Análisis inicial

Uno de los mayores problemas que enfrenta un cultivo de lombrices es la humedad del suelo, estos animales requieren un hábitat húmedo para su existencia debido que respiran a través de la piel a lo largo de su cuerpo por esta razón tampoco se puede exceder en el riego del cultivo, esto puede generar inundaciones y por ende provocar la muerte de las lombrices. Es común en la lombricultura crear rutinas de riego temporizadas o de forma manual para evitar la resequead del sustrato o hábitat de las lombrices, pero esto no garantiza que se proporcione la ración de agua adecuada que requiere el cultivo.

En varias ocasiones se intentaron crear cultivos de lombrices con el fin de satisfacer la necesidad del Parque Metropolitano en un proyecto de cero fertilizantes químicos para sus cultivos, pero estos intentos fallaron, y al revisar cual era el factor que llevaba a la muerte de las lombrices se concluyó que se debía a la falta de

humedad del hábitat de las lombrices y al no contar con una persona idónea o disponible para suplir las necesidades del cultivo, así que el proyecto terminaba en fracaso.

La lejanía del Parque Metropolitano de la ciudad, es uno de los detalles inamovibles, este no permite a los profesores o estudiantes estar al pendiente de las huertas o cultivos, podían pasar semanas antes de que se hicieran las visitas de seguimiento. Además, hay que tener en cuenta los lapsos de tiempo entre vacaciones y semestres, que por lo general podrían ser de dos meses, tiempo que los estudiantes no son oficialmente parte de la institución, también como algunos profesores por su tipo de contratación. Entonces cuando se retoman actividades académicas (inicio de semestre) se encuentran con la destrucción total o parcial de los proyectos.

Actualmente el sitio donde funcionaban los cultivos de lombrices eran los compartimentos sin usar donde se les da alimento a las vacas en los corrales. Así como se ve en la Figura 7, dichos espacios se llenaban de tierra para criar las lombrices.



Figura 7. Compartimientos cultivos de lombrices

Debido a la emergencia sanitaria por covid-19, todos los proyectos del parque quedaron a la deriva, medidas de aislamiento y bioseguridad no permitían ir al sitio. Así fueron varios meses. Por tal motivo ahora que se retomó el proyecto se evidencian los compartimentos totalmente limpios. Una prueba más de que estos cultivos no pueden sobrevivir si no se está en constante vigilancia. Aunque allá hay personal de la institución, encargados, ellos no tienen la potestad de interferir en proyectos académicos, a menos que se les deleguen algunas funciones básicas, echarle agua sería una, echarle alimento otra, pero ellos no saben cada cuanto, que cantidad, etc.

El proyecto busca una solución no solo automatizada sino también de emprendimiento para el pequeño productor. Se busca que el sistema suministre al cultivo de lombrices la ración adecuada de agua y garantice el monitoreo de temperatura. La ingeniería electrónica entraría a crear un prototipo portátil que controla la humedad del hábitat de las lombrices mediante un sistema de riego autónomo por goteo que es controlado por sensores implantados en el sustrato y del mismo modo ver la temperatura.

Al decir sistema portátil hace referencia a un prototipo que tenga la facilidad de ser movido, de ser independiente, de llegar a tener varios módulos de lombricultura en un mismo sitio, pero cada uno con su control de humedad independiente. La idea nació al analizar la situación de pandemia, en la cual no se podía ir al parque metropolitano para hacer el reconocimiento y dar comienzo a las pruebas en campo. Así que una opción era implementar en cultivo en la sede urbana de la universidad o incluso en la propia casa.

Usar un tanque bajito de polietileno de 250 litros para el primer prototipo fue la elección que hasta el momento se tiene (Figura 8). Cuenta con varios agujeros que se pueden adaptar, por ejemplo, uno por debajo para el desagüe del humus, un producto generado por lombricultura para otras aplicaciones, por encima también cuenta con adaptaciones para mangueras o tubería. Aunque estos tanques vienen con tapa, la idea es no usarla, pero si diseñar una en malla que proteja las lombrices de aves u otros animales que puedan acabar con el cultivo. La figura 8 muestra el tanque, el tamaño permite llevar y traer con facilidad, además el volumen de almacenamiento es adecuado para el propósito planteado.



Figura 8. Tanque de polietileno de 250L

El proyecto contempla que este tanque tenga su módulo electrónico que mida la humedad y temperatura, controle una electroválvula que trae el agua de un tanque elevado que hay cerca, este garantiza que haya suministro de agua fijo, pues este tanque también le da agua a la edificación que hay en el parque. En la siguiente figura se puede apreciar el tanque elevado y la edificación del parque.

3.2 Consulta y documentación

Se hizo la visita de reconocimiento y se cuenta con un tanque elevado el cual suministra agua al hotel campestre y al área aledaña del proyecto de lombrices y está situado a tan solo 200 metros de distancia. De acuerdo con las condiciones que se encuentran actualmente en el parque metropolitano se puede implementar en una de las unidades modulares existentes un cultivo con 100.000 lombrices para implementar el sistema control de humedad y monitoreo de temperatura. Como ya no había ninguna lombriz ni tierra, hubo que empezar desde cero.

En esta primera fase se hizo toda la revisión y documentación teórica de lo que se necesitaba saber con respecto a lombricultura y el diseño del proyecto. En esta etapa se planteó el proyecto como tal, aquí fue donde se decidió hacer el sistema portátil, después de conocer las condiciones para avanzar en el proyecto.

3.3 Análisis y diseño electrónico

Luego de tener bastante información de todos los aspectos, lombricultura y electrónica, se analizaron algunos datos referentes a las fallas en los anteriores proyectos de lombrices. Entonces la mejor opción que ofrece la electrónica sería controlar la humedad y medir la temperatura. Este proyecto está planteado de manera básica, quiere decir que con electrónica se podrían lograr más automatización, pero acá se tiene como un primer prototipo para pruebas y luego mejorar el alcance hacia un prototipo más avanzado.

La humedad óptima del sustrato debe estar en un rango del 70 al 80 por ciento. Hay que evitar los riegos excesivos, pues cuando la humedad es muy elevada se provoca una compactación de los lechos, lo que dificulta la aireación y, además, se produce un lavado de parte de las proteínas, con la consiguiente pérdida de valor alimenticio.

Basado en esta información se investiga y se llega a la conclusión que el sensor comercial que más se acerca a lo requerido en el presente proyecto es el sensor de humedad FC-28 que permite medir de forma directa la humedad del suelo por medio de 2 electrodos resistivos, este electrodo va conectado a una tarjeta de acondicionamiento (YL-38) que entrega una salida analógica (Figura 9).



Figura 9. Sensor de Humedad de la tierra

Para obtener una medición más estándar se propone usar 4 sensores ubicados de manera proporcional en el tanque. En la Figura 10 se observa que mediante una estructura rígida se ubican los sensores, esta estructura permitirá que la distancia entre ellos sea constante y que abarquen el área de la tierra.

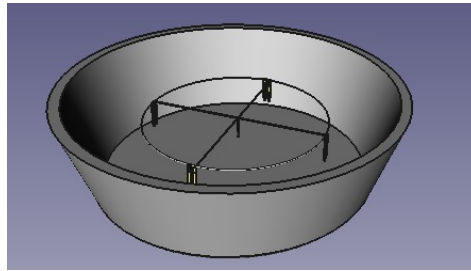


Figura 10. Distribución de Sensores de humedad en el tanque

La temperatura óptima se sitúa alrededor de los 19 ó 20 grados centígrados. El calor excesivo también perjudica a la lombriz. El riego rebaja la temperatura del medio ambiente durante los días calurosos. Una malla extendida sobre los lechos proporciona un poco de sombra y no dificulta el riego. Cuando la temperatura desciende por debajo de siete grados centígrados las lombrices se aletargan y, por consiguiente, no comen ni se reproducen.

Basado en esta información se llega a la conclusión que se requiere un sensor de temperatura que además de tener la facilidad instalarse bajo tierra, tenga la característica de medir temperaturas bajo cero. Uno de los sensores de temperatura que cumple con las características para la implementación del proyecto es el DS18B20 (Figura 11).



Figura 11. Sensor de temperatura

Es una sonda que permite tener una lectura digital de la temperatura, lo que traduce en lecturas más confiables ante cambios en el voltaje de alimentación. Ideal para utilizar en líquidos, a la intemperie o en cualquier ambiente donde no es posible que un circuito funcione adecuadamente. Es completamente compatible con Arduino, su protocolo de comunicación es 1-Wire y existen librerías listas para utilizarse con un ATmega328p o una versión más pequeña y económica como el ATtiny85.

Después de definir los sensores, se trabaja en la electroválvula, pues como solo se debe controlar el paso del agua, esta es la mejor opción. La presión generada por un tanque elevado puede llenar un tanque plástico, para un baño, que está a 4 metros de altura, lo que da una presión suficiente para el riego del tanque de las lombrices que no estará a más de 1 metro de altura. La Figura 12 muestra una electroválvula típica para el ducto del riego.

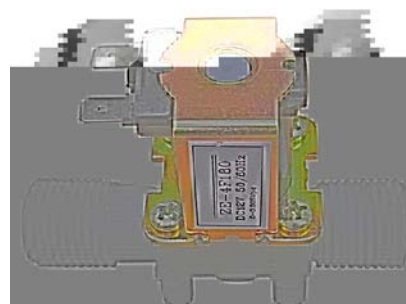


Figura 12. Electroválvula

La otra parte es poder hacer el riego para evitar que el cultivo se seque y las lombrices se mueran. Aquí se usará manguera 8mm o 10mm con goteros, así como se ve en la Figura 13.



Figura 13. Manguera y goteros

Sera importante establecer la forma y uniformidad para humedecer la tierra, no se quiere que se moje unas partes más que otras o que se formen charcos, la Figura 14 muestra dos opciones de poner la manguera (rojo) sobre el tanque con una distribución uniforme de los goteros (azul). La experimentación en campo permitirá establecer la cantidad de goteros y la cantidad de agua a suministrar.

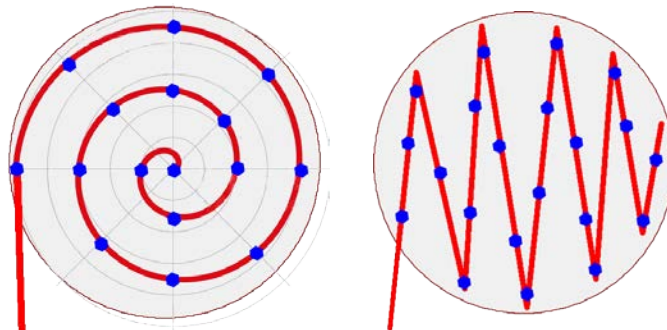


Figura 14. Opciones para poner la Manguera y goteros

Al igual que los sensores, la manguera de riego se montará sobre una estructura que servirá a su vez de tapa con una malla protectora, esta podrá abrirse y cerrarse por el encargado de suministrar el alimento al cultivo.

Hay que tener un módulo electrónico que será el que interactúa con el operario, este deberá tener una pantalla para mostrar la humedad y temperatura actual del cultivo, deberá tener botones que permitirán establecer los rangos de humedad para controlar la electroválvula, información de fecha y hora, aún está por definir el datalogger para guardar información en una memoria SD. Este módulo contendrá la fuente de alimentación y la batería de respaldo, y lo más importante el microcontrolador que almacenará el programa (sistema operativo) del proyecto.

3.4 Pruebas y calibración

Se inicia con la programación del microcontrolador (Figura 15). Se estableció la comunicación entre el sensor de humedad y el Arduino Uno con el fin de obtener mostrar en la pantalla LCD los datos provenientes del sensor. Trabajar con esta plataforma, Arduino IDE es de fácil programación y para el primer prototipo es el adecuado [9].



Figura 15. Comunicación entre Microcontrolador, sensor de humedad y pantalla LCD

Se realiza caracterización del sensor de humedad (Figura 16) con el fin de establecer su comportamiento en tierra con una cantidad de agua variable iniciando desde un terreno completamente seco hasta un terreno completamente lleno de agua.



Figura 16. Caracterización del sensor de humedad

Se instala el sensor de temperatura y se añade a la programación del microcontrolador la lectura y muestra de datos proveniente de este sensor (Figura 17).



Figura 17. Caracterización del sensor de Temperatura

Al igual que la caracterización del sensor de humedad se realizan pruebas con el sensor de temperatura para comprobar su óptimo funcionamiento, se instala en un cuarto que cuenta con aire acondicionado y se modifica la temperatura en varias ocasiones y se obtuvo una óptima respuesta del sensor tanto en el tiempo de respuesta como en la lectura de la temperatura.

3.5 Diseño y modelado

Para esta etapa se cuenta con diseños en EasyEDA para la pcb del circuito electrónico y se está usando FreeCad para el modelo 3D del taque y las estructuras (Figura 18).

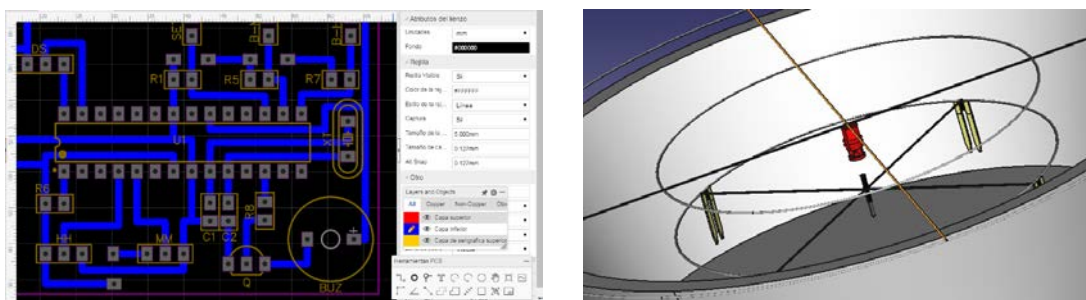


Figura 18. Diseño PCB y modelo 3D

3.6 Implementación

Para poder llegar a implementar este proyecto falta definir el lugar, pues originalmente es en el parque Metropolitano Maria Lucia (a las afuera de la ciudad), pero para efectos de tiempos de traslado y monitoreo, existe la posibilidad de hacerlo en la Universidad (Villavicencio) en un espacio del edificio de laboratorios.

3.7 Pruebas de campo

Se espera que después de implementado se entra a la fase de pruebas de campo, donde se dará funcionamiento con un cultivo de lombrices, así que el monitoreo será constante, hay que tomar mediciones

de manera manual, termómetro e Higrómetro y comparar con los datos del módulo electrónico. Al hacer una tabla comparativa de datos se puede diagnosticar el comportamiento de los sensores. Aunque no se tuvo en cuenta desde el comienzo, sería importante tener información sobre el peso del sistema, para analizar el crecimiento del cultivo, y hacer cálculos de cantidad de lombrices, cantidad de alimento, cantidad de agua y cantidad de humos producido.

Con la ayuda de los profesores de ingeniería de alimentos de la institución se llevará un apoyo interdisciplinario sobre el cultivo en particular, la revisión del comportamiento de las lombrices, el suministro de alimento, la recolección oportuna del humus y la verificación de la reproducción. La prueba más sobresaliente será la de funcionamiento autónomo (Figura 19), analizar el funcionamiento continuo por un tiempo bastante largo, semanas o meses, tan solo administrando alimento y garantizando que el agua no falte con presión constante sobre la electroválvula.



Figura 19. Tanque elevado que suministra agua al Parque Metropolitano

Al tener agua constante, se puede pensar en controlar el paso, no hay que preocuparse por bombear o estar pendiente del nivel. Así, la idea de poder tener varios módulos con su propio electroválvula y sistema electrónico, queda más viable. En la Figura 20 se muestra el punto de conexión eléctrico que tiene el sector, lo que facilita el suministro de energía para el modulo electrónico, por lo cual tan solo hay que pensar en un sistema de batería que lo soporte en caso de fallas.



Figura 20. Punto eléctrico en kiosco del cultivo de lombrices

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos hasta el momento dan motivación en el avance del proyecto. Hasta el momento la puesta a punto de los sensores está en un 75% esto debido a que tan solo se han probado con tierra en recipientes de menor tamaño, es importante la posición de los sensores, pues para estandarizar la medida se debe garantizar que cuenten con una misma posición cada vez que se cambian. Algunos experimentos de goteo mostraron que si la latencia de las gotas es muy rápida la tierra seca no alcanza a absorberla y se empieza a hacer charco.

Haciendo un análisis de la cantidad y fuerza de agua suministrada por el tanque elevado, fácilmente se podrían tener varios cultivos irrigados, cada uno con su módulo electrónico. Para el caso de no tener un suministro fijo de agua, el diseño inicial contemplaba usar un tanque de 500L sobre una base de 3metros para tener goteo por gravedad, aunque la latencia cambiaria lo importante es humedecer la tierra hasta que los sensores detecten la humedad establecida por el modulo electrónico. Lo importante sería dejar la

medida de los acoples de las mangueras establecidas, para que así sea más fácil adaptar cualquier tipo suministro de agua, en preferencia de algún tanque elevado, aun no se han hecho pruebas con suministro de agua directo del acueducto municipal, pues este viene con una presión bastante alta para un riego por goteo tan pequeño.

Los sensores de humedad utilizados son de carácter académico, quiere decir que son para fines de trabajo de programación y práctica, durante las pruebas funcionaron adecuadamente, aunque los lapsos de tiempo fueron relativamente cortos (semanas), no se han probado a más tiempo de trabajo constante, se recomienda para el prototipo definitivo usar un sensor más robusto, para trabajo y resistencia a los cambios de clima y condiciones de los cultivos, son más costosos pero garantizan una medida más estable y durabilidad del instrumento.

5. CONCLUSIONES

Generar modelos en 3D permitió visualizar el espacio que se debía probar entre sensores y goteros. Los diseños permiten un tamaño pequeño del módulo electrónico lo cual fue otro trabajo de modelaje para la circuitería.

Otra etapa podría ser el desagüe electrónico del humus, más adelante se puede censar cierta cantidad de humus acumulado para así poder abrir paso con otra electroválvula. Así como Debido a su bajo consumo sería muy cómodo proponer panel solar para su autonomía total. La adaptación de un datalogger no es tan necesaria como un sistema de alerta por falta de agua, falta de humedad, exceso de humus o cambios de temperatura. Así que el Internet de las cosas IoT sería una actualización muy oportuna si de monitorear los cultivos si estos se encuentran lejos de los operarios.

El próximo paso es calcular caudal de agua versus tiempo versus humedad, tabular esta información podrá generar las condiciones del suministro de agua para tiempos prolongados sin asistencia de los encargados.

REFERENCIAS

- [1] Cárdenas, R., Velásquez, D., & Rodríguez, C. *Sistema de control de variables de temperatura y humedad relativa para el laboratorio de agromática del SENA Cartago*, Vector 10, 2015.
- [2] Castro, M., Águila F., Quevedo, A., Kleisinger, S., Chávez, L., & Mejía, E. *Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro*, 2008.
- [3] Bollo, T. *Lombricultura: una alternativa de reciclaje*. Soboc Gráfico, Quito, 1999.
- [4] Fuentes, J. *La crianza de lombriz roja*. Publicaciones agrarias. Rivadeneyra S.A., Madrid, pp. 2-23, 2002.
- [5] Compagnioni, L., G. Putzolu, *Cría moderna de las lombrices y utilización rentable del humus*, Barcelona, De Venchi, 2001.
- [6] Montero, J. *Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario*. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión. Universidad de Castilla - La Mancha. 1999.
- [7] Shock, C. C., & Welch, T. *El riego por goteo: Una introducción*. 2013.
- [8] Munari B. *Como nacen los objetos*. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona. 2008.
- [9] O. Torrente Artero. *Arduino: curso práctico de formación*. Libros RC. Madrid, 2013.

Diseño e implementación de un prototipo de vehículo con capacidades de navegación autónoma y de exploración cognitiva de su entorno

José Efrén Barbosa Costales¹
Christian Hernández²
Daniel Paredes³
Rene Patricio Játiva Espinoza⁴
Kevin Villareal⁵
Universidad San Francisco de Quito
Ecuador

En el itinerario para conseguir un vehículo completamente autónomo se ilustra el proceso de ingeniería desarrollado a partir de varios prototipos. El actual se ha construido sobre un vehículo eléctrico diseñado originalmente para la recreación de niños y que tiene 2 m de largo, un metro de ancho y 30 cm de altura. Este carrito se ha automatizado con la implementación de un mando remoto tipo Bluetooth PlayStation 4, que permite su control de forma manual. Sobre el vehículo se ha montado un sistema de navegación basado en dispositivos de alta precisión que permite observar y reconocer en tiempo real el entorno en el que se desplaza el vehículo, tales como un sensor de tipo LIDAR, una cámara estéreo de alta definición, varios sensores de proximidad y otras cámaras adicionales. Todas las funciones necesarias para controlar el vehículo se procesan mediante un clúster de dos niveles conformado por un Raspberry Pi 4B y un microprocesador Nvidia Jetson Nano, enlazados en red a través de las herramientas ROS. El diseño es flexible y permite la introducción de nuevos nodos, que se pueden desarrollar de forma independiente para dotar paulatinamente de mayor complejidad al sistema de navegación y al sistema de reconocimiento del entorno. Se busca disponer de una plataforma terrestre móvil versátil para la prueba de algoritmos de diverso grado de complejidad, en la selección de aquellos más adecuados para la operación del vehículo. Esta metodología promueve la optimización de los recursos y la evolución del prototipo a través de la configuración del software de operación y la modificación de los sensores a bordo en función de la aplicación, considerando que el vehículo podría cumplir tareas tan disímiles como: el mapeo de las zonas exploradas, el transporte de materiales u objetos, la interacción con otros dispositivos electrónicos en entornos de alto riesgo para seres humanos, etc. Prototipos anteriores, construidos como parte de este proyecto, incluyeron aplicaciones de exploración autónoma y mapeo del entorno en 2 dimensiones, así como de seguimiento remoto del vehículo usando GPS. En la fase actual del proyecto se está trabajando en la integración de estos sistemas sobre la nueva plataforma, para conseguir que el transporte se desplace en forma autónoma y segura entre dos puntos específicos.

¹ Contacto: jbarbosa@usfq.edu.ec

² Contacto: cshernandez@ieee.org

³ Contacto: dsparedes@alumni.usfq.edu.ec

⁴ Contacto: rjativa@usfq.edu.ec

⁵ Contacto: kvillarreal@estud.usfq.edu.ec

1. INTRODUCCIÓN

De manera general, un vehículo autónomo dispone de un dispositivo que utiliza distintos tipos de sensores para recibir información de su entorno, la cual debidamente procesada se usa en la toma de decisiones de tipo secuencial y de control para realizar una tarea específica sin la mediación de un operador humano [1]. La navegación de manera autónoma presenta un amplio número de aplicaciones que van mucho más allá de autos que se conducen solos, que a pesar de haberse publicitado ampliamente, no prestan hasta el día de hoy los niveles de confianza requeridos por las sociedades para que sean una realidad [2].

La investigación más reciente sugiere que para su difusión se requiere además de implementaciones tecnológicas novedosas, ciertas transformaciones del entorno, tanto de infraestructura como de regulación que facilite la determinación y limitación de responsabilidades, que facilite su introducción [3, 4] y su posterior desarrollo hacia un sistema de transportación inteligente [5]. Esta tecnología puede ser aplicada en distintas áreas como servicios de mensajería, e incluso en muchas áreas más técnicas como la exploración y el acceso a lugares de riesgo, minería, agricultura, transporte público, etc.

El desarrollo tecnológico en los últimos años ha favorecido la innovación en vehículos autónomos en cuatro áreas destacadas. La primera de ellas, de innovación más reciente, se refiere a su uso comercial. Aquí se dispone de productos altamente sofisticados como son los vehículos de conducción autónoma desarrollados por prestigiosas compañías como Tesla y Audi, entre otros, hasta dispositivos de uso cotidiano tales como aspiradoras y friegasuelos inteligentes pasando por vehículos autónomos agrícolas para pequeños productores como el ofrecido por la empresa australiana thingc Robotics. En segundo término, se tiene el área industrial como parte fundamental de la denominada Industria 4.0, cuyo objetivo es generar un proceso integrado o interconectado mediante el uso de tecnologías IoT [6]. La tercera área se refiere a la investigación, usualmente académica y por tanto mucho más extensa. En esta categoría podemos citar por ejemplo al prototipo de submarino semiautomático desarrollado por la Universidad San Francisco de Quito con fines de investigación de la vida marina en el archipiélago de Galápagos y al vehículo submarino autónomo de la Florida Atlantic University [7]. La cuarta, se refiere a prototipos de vigilancia, patrullaje, e incluso operaciones de búsqueda y rescate en zonas de difícil acceso tanto en entornos acuáticos [8, 9] como aéreos [10].

De acuerdo con The Society of Automotive Engineers SAE [11] existen cinco niveles de autonomía para un vehículo:

1. Conducción asistida
2. Automatización parcial
3. Automatización condicional
4. Alta automatización
5. Completa automatización

Sin embargo, todavía se tiene por delante un buen trecho por recorrer para hacer de los vehículos de conducción autónoma nivel 6 una realidad, por lo cual los analistas han diferido este objetivo para inicios de la próxima década. Entre los desafíos pendientes tenemos los siguientes [2]:

1. Desarrollo tecnológico en el área de sensores e inteligencia artificial.
2. Respuesta ante posibles colisiones.
3. Riesgos de accidentes por fallas en los sistemas.
4. Riesgos de seguridad por ciberataques.
5. Conciliación por conflictos de intereses ante la transformación de los usos sociales asociados a estas nuevas formas de transportación y la determinación de responsabilidades ante los potenciales riesgos a la seguridad que implica el disponer de estos vehículos.
6. Desarrollo de nuevas políticas y sistemas de información que eventualmente posibiliten el desarrollo de sistemas de transporte inteligente [5]. Estos sistemas posibilitarían el uso de señales provenientes de

sensores externos, que los vehículos autónomos aprovecharían para mejorar el nivel de precisión de su posicionamiento y ampliar el número de aplicaciones y servicios posibles asociados a su localización [12].

Este proyecto está enfocado en el diseño e implementación de un prototipo de vehículo autónomo cuyo sistema de navegación se basa en sensores de alta precisión como son: sensores tipo Laser Imaging Detection and Ranging LIDAR, módulo Global Positioning System GPS, una cámara estéreo, unidades de medición inercial IMU, brújulas, giroscopios, acelerómetros, barómetros, sensores de proximidad de ultrasonido, etc., con el fin de generar una reconstrucción del entorno del vehículo, mapear su posición relativa y evitar obstáculos en tiempo real mientras ejecuta una tarea predefinida. En este sentido, el prototipo objeto de este proyecto se ha implementado para alcanzar con requerimientos de autonomía de nivel 5 (alta automatización) pues requiere de supervisión por motivos de seguridad y de flexibilidad para su desarrollo.

El objetivo es estudiar las particularidades de los sistemas de navegación autónoma, y las dificultades inherentes a la extracción de información cognitiva del entorno a partir de un buen número de sensores, y su uso en aplicaciones reales. Trabajar en este objetivo permitirá seguir los desarrollos tecnológicos mundiales y aprovechar las sinergias para mantener el nivel de investigación en el estado del arte dentro de este importante campo de la innovación tecnológica actualmente en auge.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Introducción a ROS

2.1.1 Robot Operating System ROS

En el laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford se dio inicio al trabajo en los primeros entornos robóticos. En este contexto, ROS fue desarrollado por Quigley con el software de Open Robotics, siendo esta la base principal para dar lugar a ROS. En 2007 la empresa Willow Garage logró el desarrollo de ROS, bajo la licencia de Berkeley Software Distribution BSD y Apache 2.0, que permite a los usuarios modificar, reutilizar y redistribuir todo el material disponible dentro de ROS [13], lo cual ha facilitado su desarrollo y su uso en múltiples y novedosas aplicaciones.

ROS es un sistema meta operativo de código abierto que ofrece grandes ventajas de acceso a una comunidad de usuarios, bibliotecas y paquetes, para el desarrollo de control de dispositivos. ROS intenta unificar funciones autónomas y facilitar el desarrollo de robots. Es versátil para los usuarios, pues no sólo ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos códigos sino también de construirlos a partir de otros disponibles creados por los usuarios de la comunidad. Éstos pueden modificarse de acuerdo con los requerimientos particulares de la nueva aplicación. Adicionalmente, ROS permite la integración de dispositivos tan variados como Arduinos, Raspberries, etc., como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Robot Operating System ROS

Se reitera que una de las características especialmente interesantes de la comunidad ROS es que sus códigos son reutilizables. El usuario accede con facilidad a los códigos disponibles y puede modificarlos y mejorarlos, para luego difundirlos dentro de la comunidad. Se trata de una comunidad muy activa alrededor del mundo que ya ha desarrollado más de 5000 paquetes de forma voluntaria. En términos de comunicación, ROS se destaca por proporcionar servicios de comunicación para la implementación de

controladores, actuadores y sensores. ROS tiene herramientas para la visualización del estado del robot y el proceso del algoritmo. Además, esta comunidad tiene la capacidad de otorgar ayuda especializada por medio de su página web de preguntas y respuestas.

El funcionamiento de ROS conlleva la división de los procesos del sistema en nodos que se comunican a través de tópicos. Estos pueden estar escritos en distintos lenguajes de programación, ya que ROS posibilita el realizar la transmisión de datos e información entre nodos sin importar el lenguaje de programación en el cual estén trabajando. Los nodos pueden ser de dos tipos. Si se trata de un nodo Editor (Publisher), significa que emite información a cualquier nodo desde la salida de su secuencia de códigos (script), y si se trata de un nodo Suscriptor (Subscriber), quiere decir que recibe información de la salida de un nodo y la utiliza como entrada para su propio script. Es importante recalcar que todos los nodos son manipulados desde el nodo maestro de ROS conocido como *ROS MASTER*, que gestiona los trayectos por los que dirige la información de cada nodo. Este se activa una vez que se inicializa ROS en el sistema operativo OS.

2.1.2 Definiciones básicas en ROS

- *Tópico* (topic): es el canal o bus de comunicaciones a través del cual los nodos pueden intercambiar mensajes utilizando una semántica de editor/suscriptor por la cual el nodo envía un mensaje de edición en un tema determinado. Además, al tópico se le suele nombrar para identificar el contenido del mensaje. La idea de disponer de tópicos es precisamente la de independizar la generación de información de su potencial aprovechamiento en otros nodos. El tópico proporciona la facilidad de que la información producida por un nodo pueda aprovecharse por varios suscriptores.
- *Paquete* (Package): se refiere a la estructura y contenido necesarios para crear un programa en ROS. Dentro de un paquete se tiene un código diseñado para compartirse y descargarse para su uso de forma gratuita. Estos códigos son desarrollados por programadores de todo el mundo con intención de que se usen dentro del desarrollo de aplicaciones.
- *Nodo* (node): el nodo es un proceso, un algoritmo capaz de realizar cálculos a partir de datos de entrada obteniendo nuevos datos a su salida. El nodo se crea en la biblioteca cliente de ROS descrita con diferentes lenguajes de programación como Cpp o Python.
- *Mensajes* (msg): es una estructura de datos conformada por diversos campos por la cual el nodo envía información al publicarla en un tópico determinado.
- *Servicios* (srv): se utilizan para interacciones del tipo petición/réplica entre nodos y que se requieren usualmente en sistemas distribuidos. Es el mecanismo por el cual se efectúa la comunicación entre el nodo que publica el servicio y el suscriptor que lo requiere por medio de mensajes de solicitud y respuesta hacia y desde un nodo proveedor.
- *Bags*: se refiere a un formato para almacenar y escuchar mensajes de información de ROS. Es un importante mecanismo para almacenar información de interés como la proporcionada por sensores, que puede ser difícil de coleccionar pero que es necesaria para el desarrollo y prueba de los algoritmos.

2.1.3 Comandos básicos en ROS

- rospack: comando para obtener información de los paquetes.
- rosdep: comando para instalar dependencias del paquete.
- rosmake: comando para compilar el paquete.
- roscd: comando para abrir directorio
- rosnodetop: indica los nodos activos.
- rosnodetop info: indica la información del nodo.
- roscore: activa el nodo principal para la ejecución de los nodos creados.
- rosrund: inicializa los nodos creados.
- rosbag: herramienta de consola unificada para almacenar y escuchar datos de ROS.
- rqt_bag: herramienta gráfica para la visualización de archivos de datos bag.
- Webviz: herramienta basada en navegador para mirar datos y archivos bag de ROS.

En la Figura 2 se aprecia el proceso de ejecución de los nodos en ROS. Puede observarse que el nodo A está publicando un mensaje sobre el tópico, el cual podría estar disponible directamente en los nodos E y F, mientras que el nodo D se suscribe al servicio para obtener el mensaje.

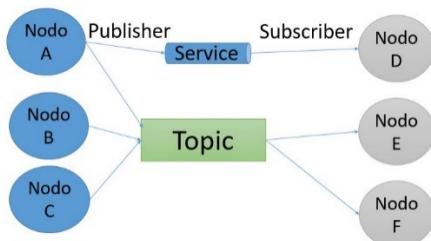


Figura 2. Diagrama de Operación de ROS

2.1.4 Nivel de la Comunidad ROS

Son los recursos de ROS que permiten separar comunidades para intercambiar software y conocimiento:

- Distribuciones: son versiones de colecciones de meta-paquetes que pueden instalarse.
- Repositorios: es un medio donde instituciones o programadores aportan su desarrollo a la comunidad.
- ROS Wiki: es un medio donde los usuarios pueden realizar preguntas para una asistencia personalizada que resuelven los problemas de forma oportuna.

2.1.5 RVIZ

Es una herramienta de visualización en 3D que controla las funciones de ROS y despliega imágenes de la cámara montada en el robot, tiene funciones compatibles con sensores como Kinect, RealSense y sensores de distancia para estimar la posición y punto de navegación del robot. Rviz tiene la función de visualizar mapas, objetos y robots en un campo virtual indicando los movimientos que ocurre en el mundo real o físico. La versatilidad de esta herramienta permite usarla en múltiples aplicaciones en distintos campos y con aplicaciones diversas. En la Figura 3 se muestra el logo de la herramienta en cuestión.



Figura 3. Logo de RVIZ

2.2 Clúster

Un clúster es un conjunto de computadoras que trabajan en forma mancomunada utilizando una conexión en red, la cual permite que en varios aspectos puedan considerarse como un sistema operativo único. En la actualidad, se utilizan varios dispositivos de la misma gama para diseñar un clúster con el fin de reducir los tiempos de carga en cada dispositivo y aumentar el rendimiento de sus respectivos procesos. Dentro de un clúster se configuran diversas relaciones de tipo maestro-esclavo (Master-Slave). En una relación de este tipo, el maestro se usa para escribir datos y el esclavo se usa para leerlos. La Figura 4 ilustra la relación.



Figura 4. Relación Maestro-Esclavo

Un clúster basado en Raspberry pi, se muestra en la Figura 5. Puesto que los Raspberries son computadores con un nivel de procesamiento bastante limitado, se juntan varios de ellos y dividen el procesamiento para generar resultados más rápidamente.

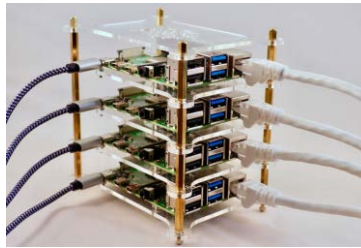


Figura 5. Arquitectura de un clúster con Raspberries

2.3 Sensor tipo LIDAR A2

LIDAR es el acrónimo que corresponde a las siglas en inglés de Laser Imaging Detection and Ranging. Este dispositivo está compuesto básicamente por un emisor de haces de rayos láser infrarrojos, de una lente que concentra la luz proveniente de las reflexiones en los objetos circundantes y de un dispositivo de detección. La longitud de onda de operación se encuentra fuera del espectro visible y por tanto el LIDAR no es peligroso para la vista; sin embargo, el dispositivo de detección es sensible a este rango de longitudes de onda, lo que hace posible al dispositivo percibir estos haces de luz láser. Estas señales recibidas se tratan vía software, posibilitando la reconstrucción del entorno. En este proyecto se usa el sensor RPLIDAR A2, el mismo que se muestra en la Figura 6 y que tiene la forma de un cilindro de revolución.

Este dispositivo rota a una velocidad angular constante alrededor de su eje (eje Z) y consigue información de su entorno en el plano perpendicular a este eje (plano XY). Se trata por lo tanto de barridas de 360° en dos dimensiones (2D) sobre una superficie en el rango de seis metros alrededor del dispositivo LIDAR y a la altura de la lente de recepción. Los datos obtenidos son nubes de puntos 2D que pueden usarse en el mapeo del entorno, además de localización y modelado de los objetos circundantes. Lo que sucede es que para cada uno de estos puntos en la nube se conoce su posición precisa en el espacio en relación con el dispositivo LIDAR. El procesador del LIDAR calcula una imagen dimensional en tiempo real, que se actualiza permanentemente. Los dispositivos LIDAR 3D (Figura 6) añaden movimiento ondulatorio en la dirección del eje posibilitando una reconstrucción tridimensional.



Figura 6. RPLIDAR A2

La frecuencia de barrido típica del RPLIDAR A2 360° Laser Scanner es 10 Hz (600 rpm). En esta condición, la resolución es de 0,9°. La frecuencia de escaneo real se puede ajustar libremente dentro del rango de 5-15 Hz según los requisitos del usuario. El rango mínimo de operación del dispositivo es de 15 cm. El dispositivo será ciego a distancias menores a ésta. El funcionamiento de este sensor se representa en la Figura 7.

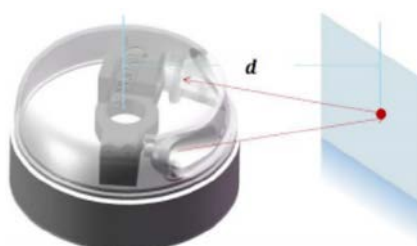


Figura 7. Principio de Operación del RPLIDAR

Las características de este sensor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Característica de SLAMTEC RPLIDAR A2M8

Parámetro	Unidad	Min	Max
Rango	m	0.15 m	12 - 15 m
Frecuencia de Medida	Hz	2000	8000
Frecuencia de Barrido	Hz	5	15
Ángulo de Barrido	grados	0-360	-

2.4 Cámara estéreo ZED

La cámara estéreo ZED es un dispositivo que integra tecnología para percepción 3D. Es una cámara dual, es decir constituida por dos cámaras de 4 megapíxeles, separadas convenientemente sobre un eje, como se observa en la Figura 8, con resolución máxima de hasta 2k y una alta frecuencia de operación, para permitir un registro continuo en modo video de al menos 30 fotogramas por segundo FPS a 1080p y de 15 FPS a 2.2K. Esta cámara dispone de controles para el ajuste de la resolución, de la tasa de fotogramas, del brillo, del contraste, de la saturación, etc. Sus sensores ópticos tienen píxeles de 2 μ m, posibilitando tomas con menos luz y menos movimiento en las tomas.

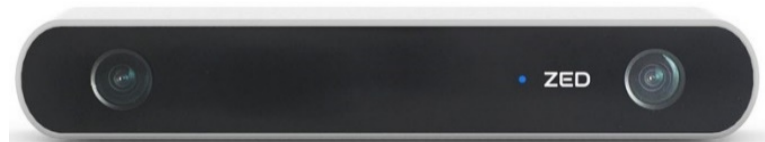


Figura 8. Cámara Estéreo ZED

La cámara dual de ZED y la percepción neural de profundidad posibilita un barrido 3D con un alcance de hasta 20 m sin comprometer la fidelidad de la imagen establecida por los sensores RGB que incorpora. La utilización de la Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo CUDA por su característica de computación paralela, posibilitará obtener y disponer de cálculos correctos de la profundidad del entorno en una GPU de NVIDIA, pues es compatible con el microcomputador Jetson Nano de NVIDIA. Adicionalmente, la cámara es compatible con ROS, por lo cual se integra fácilmente al entorno de desarrollo de nuestros vehículos autónomos basados en este sistema. Las características de la cámara se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Característica de la cámara ZED

Modo de Video	FPS	Resolución de salida (lado x lado)
2.2K	15	4416x1242
1080p	30	3840x1080
720p	60	2560x720
WVGA	100	1344x376

Adicionalmente, la cámara ZED cuenta un kit de desarrollo de software que hace posible ciertas aplicaciones como determinación de profundidad, seguimiento, y mapeo del entorno, la cual la hace interesante para su uso dentro de nuestra aplicación. Esta cámara incorpora una unidad de medición inercial IMU, y por tanto medidas de aceleración y velocidad angular que pueden fusionarse a las proporcionadas por el GPS para conseguir mayores precisiones en el posicionamiento del vehículo respecto de los objetos en su entorno y dotar de versatilidad y flexibilidad en el diseño de las aplicaciones. La fusión puede realizarse usando versiones extendidas del filtro de Kalman [14, 15].

2.5 Computador Jetson Nano de NVIDIA

Jetson Nano es una computadora miniatura de bajo consumo de potencia (menos de 5 W), desarrollada con capacidades para correr en paralelo múltiples redes neuronales y de utilidad en aplicaciones de clasificación de imágenes, detección de objetos, segmentación y procesamiento de voz. Se muestra en la Figura 9 y se integrará a la cámara ZED 2 para extraer lo mejor de sus potencialidades.



Figura 9. Jetson nano de NVIDIA

El contar con este dispositivo posibilita el uso de las librerías disponibles por NVIDIA y del apoyo de una red de desarrolladores trabajando alrededor de la inteligencia artificial, lo cual brinda una oportunidad para el desarrollo de este proyecto. Las especificaciones de procesamiento del dispositivo se resumen en la Tabla 3, las características eléctricas en la Tabla 4, y sus características de entrada-salida en la Tabla 5.

Tabla 3. Características de entradas y salidas Jetson Nano

Descripción	Características
GPU	NVIDIA Maxwell™ de 128 núcleos
CPU	ARM® A57 de cuatro núcleos
Memoria RAM	4 GB de LPDDR4 de 64 bits
Almacenamiento	puerto microSD
Codif. Video	4K@ 30,4x1080p@30,9x720p@30(H.264/H.265)
Decodif. Video	4K@ 60,2x4K@30,8x1080p@

Tabla 4. Características de alimentación Jetson nano

Opciones de alimentación	Voltaje y Amperaje requerido
Micro-USB	5V 2A
Conector de barril	5V 4A

Tabla 5. Características de Entrada y Salida Jetson nano

Puerto	Entrada o Salida
USB	4x USB 3.0, USB 2.0 Micro-B
Video	HDMI /DisplayPort
Conectividad	Gigabit Ethernet 10/100/1000
Sistemas varios	GPIO, I2 C, I2 S, SPI, UART
Cámara	Dos conectores de cámara MIPI-CSI
Refrigeración	Conector de ventilador
Alimentación Lan	Conector PoE

3. MÉTODO

Al tratarse de un proyecto de índole académica, los desarrollos se han llevado a cabo aumentando gradualmente la complejidad. En todos los casos, se inicia definiendo un objetivo alcanzable en el corto plazo. Este objetivo define el tipo de prototipo a construirse y sus funcionalidades. En segundo término, se diseña el vehículo y se definen las características de sus componentes. El tercer paso es implementar el prototipo, lo cual requiere del montaje del vehículo, la caracterización de los sensores, la implementación del software, la realización de varias pruebas de desempeño, la corrección de errores, y finalmente la redefinición de objetivos para iniciar un nuevo desarrollo.

Atendiendo a esta metodología, el proyecto cuenta ya con varios prototipos de propósito específico, con diversos grados de complejidad y también de autonomía, y se ha realizado la caracterización de los diferentes sensores incorporados en la plataforma móvil terrestre, tales como cámaras, compases magnéticos, GPS, el dispositivo LIDAR, las funcionalidades de la cámara ZED, etc. Particularmente, en el primer prototipo operado por Arduino y mostrado en la Figura 10 se caracterizaron y se utilizaron el compás magnético, sensores de proximidad y el módulo GPS.

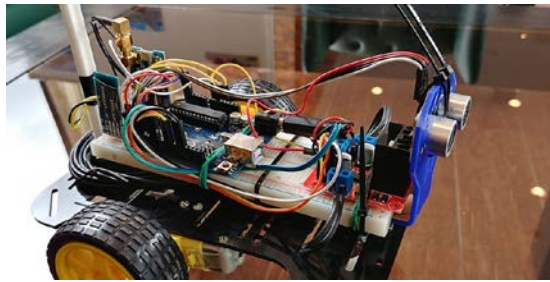


Figura 10. Primer Prototipo

El segundo prototipo utilizó un Raspberry 3 a bordo, además de los sensores ya mencionados y se realizó la georreferenciación del vehículo utilizando software libre. En este nuevo desarrollo se exploraron herramientas de uso abierto tales como ROS y Full Motion Video FMV de QGIS. Recordemos que ROS es un software libre que provee librerías y herramientas para ayudar a los desarrolladores de software a crear aplicaciones para robots. Es en esencia un meta sistema operativo que provee abstracción de hardware, controladores de dispositivos (servos, láser, etc.), librerías, herramientas de visualización, comunicación por mensaje, administración de paquetes, soporte a varios lenguajes de programación (C++, Python), que facilita el uso de procesos distribuidos y la comunicación entre procesos, entre otras características [16]. La aplicación de georreferenciación del vehículo se montó exitosamente sobre ROS.

En la siguiente etapa de desarrollo, se montó el sensor LIDAR sobre el vehículo que se muestra en la Figura 11 el cual operó satisfactoriamente sobre ROS en aplicaciones de exploración y mapeo 2D de su entorno.



Figura 11. Segundo Prototipo

En la etapa actual del proyecto, el vehículo se corresponde al juguete para niños de la Figura 12.



Figura 12. Prototipo actual

El interés actual es buscar el mejor método de integración de la información de las señales recibidas por cada uno de los sensores en beneficio de la aplicación, procurando pasar de un esquema de navegación semiautomática a un esquema de navegación completamente autónomo, escogiendo de entre los métodos disponibles en la literatura aquellos que se ajusten mejor a las necesidades de exploración cognitiva del entorno de nuestro prototipo. Para cumplir este objetivo, el proyecto recorrerá las siguientes etapas.

3.1 Caracterización de sensores

Se realiza a partir de la construcción de diversos prototipos con diversas unidades de procesamiento para validar ciertas pruebas de concepto. El primer prototipo de vehículo se construyó usando como núcleo un Arduino Uno como se observa en la Figura 10, el segundo, que se muestra en la Figura 11, incluyó un Raspberry 3B, que fue sustituido eventualmente por un Raspberry 4B al escalar el número de funcionalidades. Éste a su vez dio paso a la versión actual en la Figura 12, equipado con un clúster formado por un Raspberry 4 y un minicomputador Intel NUC, que finalmente se ha sustituido por un microprocesador Nvidia Jetson Nano.

3.2 Mapeo del entorno del vehículo

Para describir el entorno del vehículo se utilizan el dispositivo LIDAR y la cámara estéreo ZED montadas en el prototipo.

3.2.1 Mapeo 2D

El proceso de Mapeo o reconstrucción bidimensional utiliza la información de georeferenciación para implementar el algoritmo SLAM. Es decir, la primera imagen obtenida del LIDAR se toma como una referencia y a medida que el vehículo se desplaza, la siguiente imagen se compara con la anterior y se crea el entorno basado en las diferencias medidas. La principal limitación de este método es que tiene una alta sensibilidad en relación con la posición relativa, especialmente en términos de movimientos bruscos. El funcionamiento del SLAM se ilustra en la Figura 13.

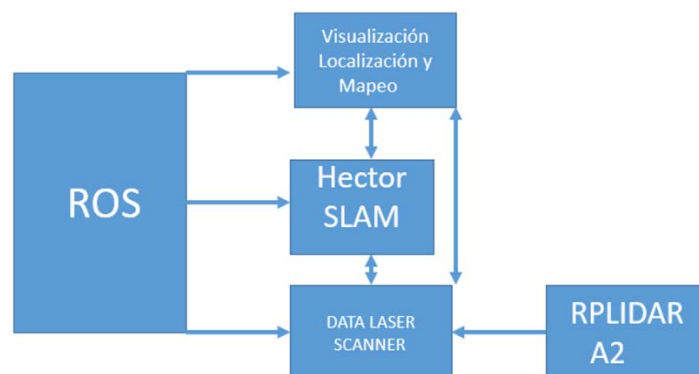


Figura 13. Hector SLAM

3.2.2 Interpretación 3D del entorno

La cámara estéreo será el principal sistema de entrada para la interpretación del entorno en tres dimensiones y también una importante entrada para el sistema que guía el vehículo. Se aprovecharán distintos aspectos de la cámara para operaciones de visión por computadora, mapeo 3D, etc.

3.3 Integración del computador Jetson Nano

Este será el dispositivo de control y de procesamiento central del sistema del nuevo prototipo. Se encargará de la recopilación, interpretación y posterior envío de estímulos a los dispositivos pertinentes.

3.4 Implementación de la navegación basada en un seguidor de línea

El seguidor de línea es parte del sistema primario de navegación del vehículo y utiliza una cámara para la adquisición de la señal de interés. Este subsistema implementa procesamiento de imágenes con visión por computadora para reconocer la ruta a seguir. La versión más sencilla se realizará a partir de un filtro de color HSV (de las siglas en inglés de Hue, Saturation and Value), y en versiones posteriores se utilizarán filtros de borde basados en gradiente [17]. Incluso se podría migrar eventualmente hacia esquemas más

complejos desarrollados en el ámbito de la inteligencia artificial. Todas estas señales finalmente se integrarán dentro de un modelo cinemático y/o dinámico [18] durante la fase de refinamiento. En la Figura 14 se ilustra el concepto del espacio HSV (Matiz, Saturación y Brillo) de una imagen. Haciendo uso de estos parámetros se puede identificar cualquier gama de color de interés específico.

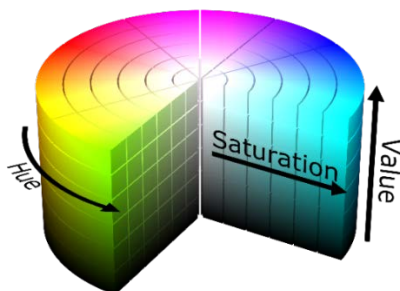


Figura 14. Espacio HSV de una imagen a color

A partir de la imagen filtrada disponible, se referencia su posición relativa al vehículo de forma de realizar los ajustes de navegación necesarios, es decir, girar a la derecha o a la izquierda dependiendo de la situación concreta. Como se observa en la Figura 15, la vía se representa por dos líneas verticales, mientras que el objeto de referencia a posicionar, en este caso el vehículo, se representa por el cuadrado blanco. Dependiendo de la posición relativa del centroide de este objeto, se toma la decisión de continuar en línea recta o realizar una corrección en la trayectoria.

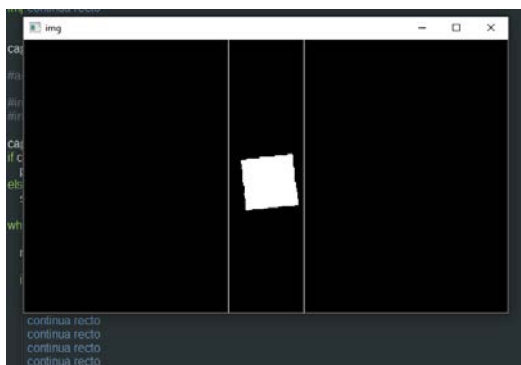


Figura 15. Prueba de concepto del seguidor de línea

3.5 Implementación del sistema de seguimiento basado en GPS

El sistema Global Positioning System GPS fue diseñado originalmente para obtener información de posición con referencia geográfica. Se basa en la triangulación de la posición a partir de las señales que se reciben en el dispositivo y que se transmiten de una constelación de satélites, que posibilitan la construcción de sistemas de posicionamiento, navegación y cronometría ininterrumpida. Esta tecnología la utilizan diversas instituciones privadas y públicas para realizar tareas de posicionamiento en cualquier parte de la superficie terrestre, lo cual facilita la ejecución de actividades cotidianas que requieren del desplazamiento entre dos puntos debidamente referenciados en el espacio, en términos de latitud y longitud.

En esta etapa del proyecto se busca integrar sistemas de geolocalización disponibles para el público general, tales como Google Maps o Waze al sistema de navegación del vehículo autónomo, para otorgarle la capacidad de planificación de ruta a partir de puntos geográficos de interés predeterminados, haciendo uso del dispositivo GPS montado a bordo. El sensor que se utiliza es el módulo GPS U-blox Neo 6M. Este sensor fue elegido por su pequeño tamaño, bajo costo y su versatilidad para su uso en proyectos. La Tabla 6 resume las más importantes características de este sensor y la Figura 16 ilustra el sensor utilizado.

Tabla 6. Características del sensor U-blox Neo 6M

Sensor	Type	Supply	Interface
Neo 6M	GPS	[2.7-3.6 V]	UART, USB, SPI



Figura 16. U-blox Neo 6M

El tiempo de espera entre encender el dispositivo y conectarlo con un satélite es de aproximadamente 27 segundos. Sin embargo, para un funcionamiento correcto que minimiza el margen de error, el sensor debe conectarse al menos a 9 satélites [19], un proceso que en función de las condiciones externas puede llevar entre 1 y 5 minutos.

Como se puede ver en la Tabla 6, existen diferentes tipos de interfaz. El prototipo implementa la interfaz USB versión 2.0 FS (velocidad máxima, 12 Mbit/s) desde un adaptador UART a USB. Esta modificación tiene dos ventajas: primero, mejora la precisión de los datos recibidos utilizando el algoritmo PPP desarrollado por U-blox; y segundo, esta interfaz permite usar la Interfaz UART de Raspberry exclusivamente para comunicación Bluetooth.

Como prácticamente todos los GPS disponibles en el mercado, el sensor NEO 6M utiliza el protocolo de información NMEA con una velocidad de 9600 baudios [19]. Este se basa en chips GPS calificados AECQ100, por lo que cumple con la normativa ISO 16750 *Vehículos de carretera estándar-Condiciónes ambientales y pruebas de equipos eléctricos y electrónicos* [19], por lo cual se considera fiable para el contexto de las aplicaciones de este proyecto.

3.6 Refinamiento con información de otros sensores

Es útil en aplicaciones reales el contar con varios sensores para dotar de seguridad al sistema de guiado y de navegación del vehículo. En prototipos anteriores se utilizaron sensores de proximidad basados en Ultrasonido HC-SR04 como los de la Figura 17.

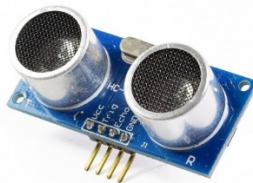


Figura 17. Sensor HC-SR04

Este tipo de sensores emiten una señal de ultrasonido en una frecuencia de 40 KHz [20]. Cuando la señal rebota en un objeto, ésta vuelve y el dispositivo es capaz de medir el tiempo transcurrido entre su emisión y su recepción, y calcula la distancia hacia el objeto usando la ecuación (1).

$$D = \frac{\Delta t \times 340m/s}{2} \quad (1)$$

Donde D corresponde a la distancia experimental medida en metros, Δt al tiempo expresado en segundos que la onda de sonido tarda en regresar al sensor, y 340 m/s corresponde a la rapidez del sonido. Las características del sensor HC-SR04 se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características del sensor HC-SR04

Voltaje (DC)	Corriente	Frecuencia	Rango
5 V	15 mA	40 KHz	[2cm-4m]

4. IMPLEMENTACIÓN

En esta etapa del proyecto, la visión es utilizar una pequeña computadora lo suficientemente potente y colocarla en un vehículo eléctrico comercialmente diseñado para la recreación de niños de 3-4 años, y modificarlo para proporcionarle cierta autonomía. Este vehículo se maneja remotamente con un dualshock 4, que es un control de PS4. Para esto, se utiliza un clúster de dos niveles conformado por un Raspberry Pi 4B y un NVIDIA Jetson Nano, los cuales se encargarán del sistema de potencia y del de control respectivamente. Al utilizar estos recursos, el procesamiento de información que fluye a través del sistema resulta optimizado, dando un grado de versatilidad para que en el prototipo se puedan implementar nuevas funciones sin que el rendimiento se vea afectado, puesto que se optimiza cada proceso que realiza el carrito entre ambos dispositivos.

Respecto a la automatización del vehículo, se utilizaron dos motores que controlan su movimiento en cuatro direcciones (izquierda, derecha, adelante y atrás) proporcionándole libertad de desplazamiento sobre los cuatro ejes. Para lograr este funcionamiento se utilizaron dos drivers con puentes H integrados que ayudan a controlar la cantidad de potencia que se entrega a los motores respectivamente y mediante las señales General Purpose Input/Output GPIO del Raspberry se manipula la velocidad de estos motores. Al usar este tipo de drivers no es necesario calcular la cantidad exacta de voltaje y corriente que necesitan los motores ya que estos componentes administran por si solo los recursos necesarios para la conducción del vehículo, sin embargo, para manipular la velocidad de los motores con mayor facilidad colocamos reguladores de voltaje (step-down) que pueden llegar a regular la velocidad de los motores según el voltaje que venga desde la batería, ya que la cantidad de revoluciones por minuto RPM, a las cuales trabajan estos motores es directamente proporcional al nivel de voltaje que se está suministrando.

El trabajo descrito en este proyecto se centra específicamente en dos aspectos del diseño y construcción del vehículo eléctrico: el clúster de dos niveles que se encarga de controlar los sistemas de navegación y su infraestructura, y el diseño de control de los motores y cómo se lo puede controlar a través de una microcomputadora como un Raspberry Pi. Al dividir el proyecto en estas dos partes se debe asegurar el sistema de movimiento de los motores en primer lugar como prioridad y una vez establecido dicho control, podemos pasar a utilizar la minicomputadora NVIDIA Jetson Nano que es mucho más potente para que utilice los sensores y una cámara 3D para brindar datos e imagen acerca del entorno del vehículo.

Tanto el hardware como el software del prototipo están diseñados para conseguir un nivel alto de modularidad que facilite el desarrollo de cualquier ámbito interno o externo del vehículo, dotándole de un alto nivel de escalabilidad con el fin de realizar una investigación continua que redunde en el crecimiento de su nivel de autonomía.

En la Figura 18 se encuentra el diagrama modular del proyecto. Como se puede observar posee una configuración *Maestro-Esclavo* donde el Jetson Nano cumple el rol de *ROS-Master* y ejecuta el proceso de adquisición y procesamiento de las señales recibidas por los distintos sensores como el sensor tipo LIDAR y a su vez controla el funcionamiento de los motores. Adicionalmente existe un microprocesador en configuración *slave* con el fin de otorgar modularidad y escalabilidad al proyecto para la implementación de futuras aplicaciones.

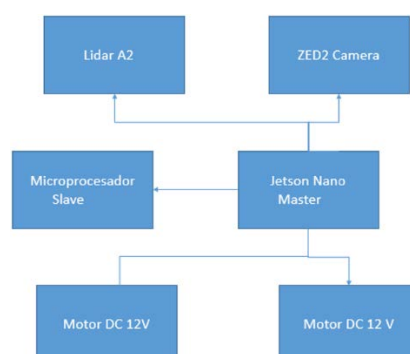


Figura 18. Diagrama Modular de Funcionamiento del Prototipo

La implementación del sensor LIDAR se lleva a cabo con un nodo denominado *Hector-Mapping*, el mismo que permite una reconstrucción bidimensional o Simultaneous Localization and Mapping SLAM del entorno y visualizarla en la herramienta de *RViz* de ROS. El diagrama de conexiones del prototipo final se muestra en la Figura 19.

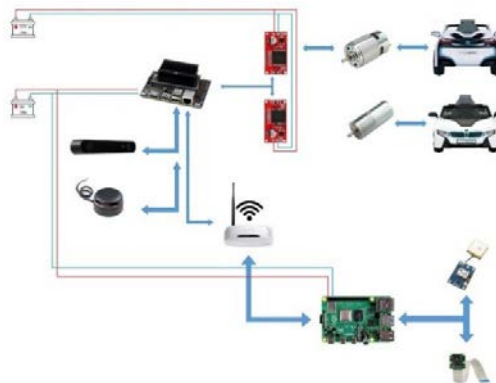


Figura 19. Diagrama de Conexiones del Prototipo

4.1 Distribución de Linux

Se requiere una distribución de Linux enfocada al desarrollo de aplicaciones y procesos complejos, la distribución de Linux desarrollada para Jetson Nano es la versión Ubuntu 18.04 como se muestra en la Figura 20, optimizada para Jetpack 4.5.1, que es el sistema operativo de Jetson Nano.



Figura 20. Sistema operativo óptimo para Jetson Nano

Luego de terminar con la instalación de los OS en cada computador, se asignan direcciones IP estáticas a cada uno de ellos, con el fin de dirigir la información hacia un destino deseado. El uso de IPs dinámicas no es recomendado puesto que la dirección que identifica a cada dispositivo por separado podría variar al momento de encender el módulo de conexión en red.

Una vez hecho esto, se procede a configurar el nodo maestro, el cual es el encargado de manipular al resto de subprocesos o nodos esclavos. Este tipo de configuración hace posible la división de procesos, ya que el nodo maestro redirige cada tarea hacia uno o más nodos esclavos, haciendo que cada computador del clúster realice alguna tarea paralelamente con los demás. Los resultados se muestran en el nodo maestro ya que este funciona como la central de control de todo el proceso.

Para este proyecto se decidió implementar un clúster compuesto por dos computadoras que sean distintas pero que puedan dividirse los procesos y aplicaciones para formar un sistema operativo mucho más potente. De esta manera se conformaría un OS (sistema operativo) compuesto por el procesamiento en paralelo de un NVIDIA JETSON NANO y un Raspberry pi 4 como el de la Figura 18. Para este enlace, se utiliza ROS y se divide el OS en dos. La idea de implementar la configuración Maestro-Eslavo se enfoca en conseguir modularidad en el proyecto, y asegurar así su escalabilidad en aplicaciones futuras.

4.2 Componentes mecánicos

Para este proyecto se utilizó como base un vehículo comercial de entretenimiento, al que se realizaron cambios estructurales para mejorar su versatilidad en el desarrollo de aplicaciones. A continuación, en las Figura 21 a 25 se detallan las conexiones y modificaciones realizadas.

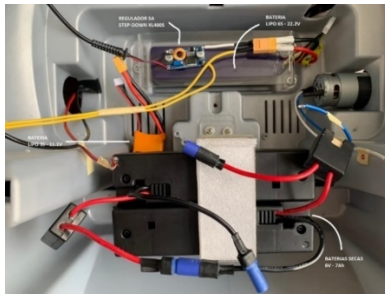


Figura 21. Sistema de alimentación del prototipo

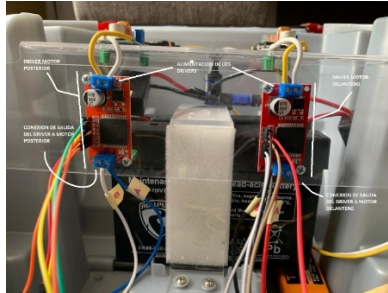


Figura 22. Sistema de Drivers



Figura 23. Sistema de Dirección



Figura 24. Sistema de propulsión

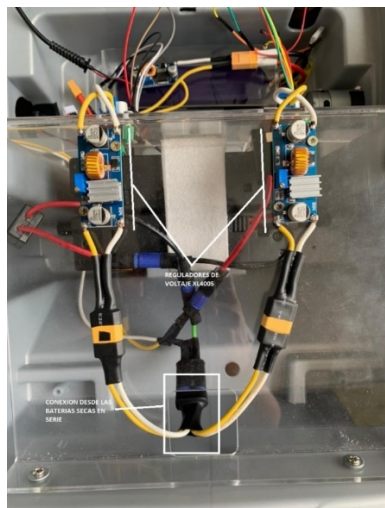


Figura 25. Sistema de regulación de voltaje

La versión final del prototipo se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Prototipo final funcional

5. RESULTADOS

5.1 Seguidor de línea

El sistema de seguimiento de carril se basa en la utilización de visión artificial para identificar la posición relativa de la línea. Esta es reconocida a partir del color de la señalización vial. Una etapa de calibración de color se requiere para identificar los parámetros HSV adecuados. Después de esta calibración se obtuvieron los resultados de visión artificial mostrados en la Figura 27.



Figura 27. Resultado de visión artificial para el sistema de seguimiento de línea

La ruta a seguir se corresponde con la línea de color verde mientras que el centro de masas del objeto a posicionar se representa por el punto de color rojo. Comparando la posición relativa del centro de masa del objeto a posicionar con la línea a seguir se toma la decisión de seguir en línea recta, girar a la derecha o a la izquierda según sea el caso.

5.2 Seguimiento GPS

Para la configuración y calibración del módulo GPS se utilizó el programa U-center (distribuido por U-Blox, fabricante del GPS). La velocidad de transmisión se configuró a una tasa de 9600 Baudios, con la cual se obtuvieron buenos resultados y se optimizaron los recursos de procesamiento. Por otro lado, en cuanto a la calibración del módulo GPS usando el programa U-center se revisó el grado de precisión del sensor. El error promedio en lugares cerrados fue de 5 metros, mientras que para lugares abiertos éste se redujo a 1,5 metros. La telemetría del GPS se verifica con ayuda del programa, es decir, se obtiene información como el número de satélites conectados, así como sus nombres, posiciones relativas, la calidad de transmisión de datos como se observa en la Figura 28. Toda esta información se basa en los protocolos de comunicación National Marine Electronics Association NMEA 0183.

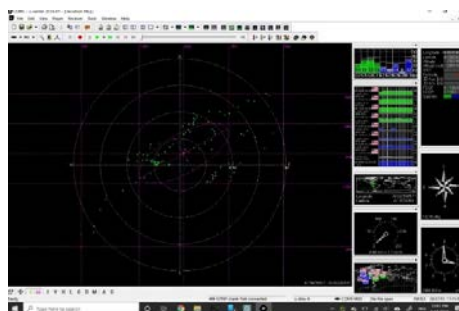


Figura 28. Calibración de GPS por U-Blox

Para el sistema de seguimiento o *tracking* del prototipo se utiliza un sistema de transferencia de información proveniente del módulo GPS, la información recibida usa el protocolo NMEA 0183. Se utiliza las librerías de U-blox (fabricante del módulo GPS) para así obtener información de longitud, latitud, altura y velocidad de desplazamiento. Estos datos se cargan mediante una conexión de internet a un servidor de la plataforma en tiempo real Pubnub, disponible en su versión gratuita con recursos restringidos. De esta forma, utilizando un programa de página Web desarrollado en HTML (descrito en la sección de interfaz de usuario) es posible visualizar la trayectoria en tiempo real del prototipo, para lo cual se utiliza el API de Google Maps. El seguimiento GPS se visualiza en la Figura 29.



Figura 29. Sistema de seguimiento por GPS

5.3 SLAM

A continuación, en la Figura 30 se muestra en mapeo de una zona a partir de la información obtenida del sensor LIDAR en RViz.

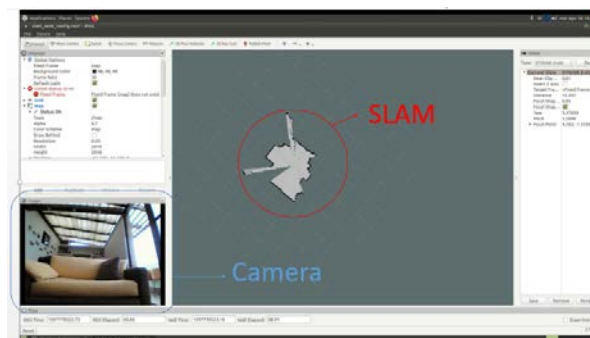


Figura 30. Reconstrucción de una zona usando SLAM

5.4 Cámara estéreo ZED2

Para el correcto funcionamiento de la cámara es necesario realizar una etapa de calibración inicial, la cual se muestra en la Figura 31.

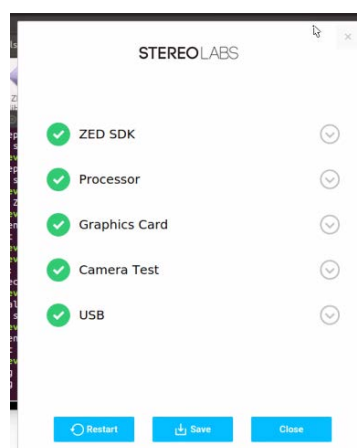


Figura 31. Calibración la cámara estéreo

Una captura realizada con la cámara estéreo ZED se muestra en la Figura 32. En este caso, es posible configurar la tasa de fotogramas por unidad de tiempo, entre 15 fps, 30 fps y 60 fps con una resolución de hasta 2K.

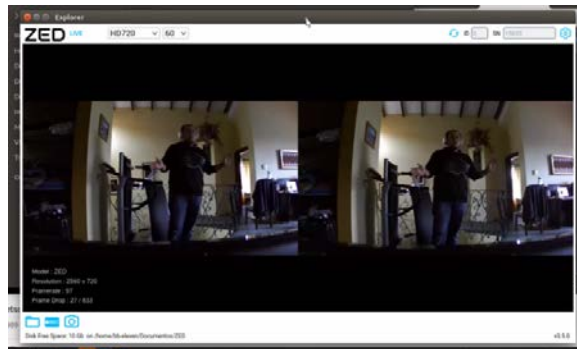


Figura 32. Resultados de la cámara estéreo

La configuración más adecuada para este proyecto se establecerá oportunamente de forma de optimizar los recursos del sistema en beneficio de los resultados de la aplicación. La tasa de refresco asegura la percepción de movimiento continuo para el ojo humano. Una tasa menor reduce el procesamiento de imagen por parte del microprocesador, pero reduce los datos de entrada requeridos para la operación de la red neuronal.

Por otro lado, en forma análoga al sensor LIDAR, esta cámara permite realizar reconstrucciones tridimensionales del entorno, para lo cual existen distintas técnicas como la generación de una malla del espacio 3D a partir de sus sensores de proximidad, como se muestra en la Figura 33.

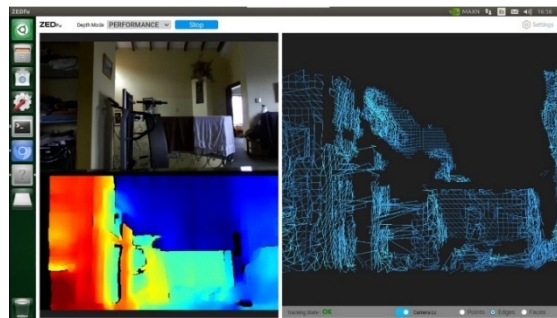


Figura 33. Reconstrucción de mallado de un área en 3D usando la cámara estéreo

La segunda opción es a partir de un mapeo 3D de una zona en tiempo real, empleando una metodología similar al SLAM en 2D, tal y como se observa en la Figura 34.

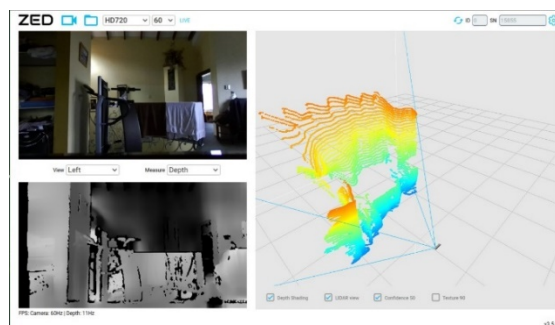


Figura 34. Mapeo un área en 3D usando la cámara estéreo

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos se observa que el prototipo cumple con los objetivos especificados en la etapa de diseño. Adicionalmente, gracias a la implementación modular, es posible realizar mejoras significativas progresivas en cada una de las etapas de desarrollo.

Mirando los resultados obtenidos por el sensor LIDAR mostrados en la Figura 30, claramente se observa que la técnica empleada, es decir, la metodología de *Hector Slam* funciona adecuadamente, sobre todo para aplicaciones relacionadas con fines arquitectónicos o de reconstrucción bidimensional de un entorno, que puede ser de difícil acceso o simplemente un entorno hostil, donde a diferencia de los prototipos previos las limitaciones de tamaño ya no son representativas.

Adicionalmente, es importante destacar que, dado el funcionamiento del mapeo a partir de posiciones referenciales, el sistema es sensible a ruido que puede ser causado por inestabilidad o movimientos bruscos del prototipo.

En cuanto al uso de la cámara estéreo se refiere, al momento se ha incursionado solo en la superficie de sus posibles aplicaciones. La escalabilidad de este proyecto en esta área es significativa, siendo posible incluso integrar el mapeo bidimensional obtenido con el sensor tipo LIDAR. Adicionalmente, usando las librerías del fabricante **ZED** es posible obtener más información dependiendo de las aplicaciones deseadas. Así también, dada la versatilidad de ROS y la compatibilidad de la cámara con el microprocesador Jetson Nano, las aplicaciones adicionales son fáciles de implementar a partir de modificaciones de software únicamente.

El sistema de navegación del prototipo aún se encuentra en una etapa de desarrollo. Esta puede mejorarse sustancialmente a partir de la implementación y entrenamiento de una inteligencia artificial en base a redes neuronales, lo cual permitiría alcanzar el nivel máximo de autonomía en el prototipo.

7. CONCLUSIONES

Se han diseñado e implementado varios prototipos de vehículos terrestres, equipados con diferentes tipos de sensores para aplicaciones específicas y con diversos grados de autonomía, que les permite moverse evitando colisiones de forma segura en la configuración automática. Desde la interfaz de usuario es posible visualizar en tiempo real la trayectoria del vehículo. Esta aplicación permite tener un error medio de 2,5 m. El sistema de navegación, por su parte, permite observar en tiempo real el mapeo, reconstrucción del lugar SLAM y reconstrucción del entorno en 3D a partir de la cámara estéreo.

Las baterías que usa el prototipo actual le permiten tener una autonomía promedio de 30 minutos lo que le permite cubrir áreas relativamente grandes. La optimización del consumo de energía es un tópico de investigación pendiente de tratarse en el futuro.

El uso del microprocesador Jetson Nano con el sistema operativo basado en Linux con una distribución de Ubuntu permitió emplear ROS, con tres ventajas principales. La primera y más importante se refiere a su compatibilidad con todos los tipos de sensores empleados y sus respectivas librerías. Segunda, la capacidad de implementar todas las subrutinas del prototipo en distintos nodos con una gran versatilidad. Tercera, al tratarse de software libre, existe una gran cantidad de información, tutoriales y referencias de proyectos similares que fueron de gran utilidad a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Existen muchas formas de diseñar un prototipo similar; sin embargo, se escogió la que se ha mostrado debido a su estructura modular y a la versatilidad que provee al vehículo para su escalabilidad en el futuro.

Puesto que ROS es un entorno orientado al diseño de robots, la exploración más a fondo de esta herramienta beneficiará al proyecto y ayudará a aumentar el grado de autonomía del prototipo hasta alcanzar el grado cinco, donde el vehículo únicamente requeriría conocer la posición de destino, y éste emprendería la ruta óptima hacia él.

Otra de las herramientas que se exploró es la cámara ZED. Tras estudiar sus componentes se hizo evidente que dispone de una amplia gama de aplicaciones que incluyen el trabajar paralelamente con el sensor LIDAR para conseguir un mapeo en tres dimensiones. Además, si se utiliza en conjunto con un sensor IMU, podría también brindarnos más información sobre el entorno del vehículo. Además, al interactuar con inteligencia artificial es posible realizar el reconocimiento de peatones, vehículos y de señales de tránsito

tales como PARE o semáforos, y de efectuar acciones oportunas ante estos estímulos para salvaguardar la integridad del vehículo, de los transeúntes y de otros vehículos en el entorno.

Puesto que el prototipo descrito en el presente informe es parte del trabajo del equipo de investigación de vehículos autónomos de la Universidad San Francisco de Quito, se encuentra en un constante proceso de evolución y desarrollo. Las características aquí descritas corresponden a la versión actual del prototipo, pero no a su versión final o definitiva.

REFERENCIAS

- [1] Y. Li, M. Díaz, S. Morantes, and Y. Dorati, "Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana," *Revista de Iniciación Científica*, vol. 4, no. 1, pp. 34–39, 2018.
- [2] A. Calatayud, C. Benítez, J. M. Leaña, R. Agosta, F. Blas, C. Goytia, S. Guilera, A. Riobó Patino, C. Navas Duk, C. Freytes, and F. Rodríguez, "Vehículos autónomos: Una revisión bibliográfica sobre su impacto en la movilidad de las ciudades en la región," tech. rep., 7 2020. Nota Técnica N° IDB-TN-1929.
- [3] T. Luettel, M. Himmelsbach, and H.-J. Wuensche, "Autonomous ground vehicles—concepts and a path to the future," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1831–1839, 2012.
- [4] K. S. Sarmiento Gamboa, J. E. Vázquez Lagos, Ó. L. Laguna Suárez, *et al.*, "Desarrollo de planeación y seguimiento de trayectorias para un vehículo autónomo," Universidad Piloto de Colombia, 2016.
- [5] K. Yu, L. Lin, M. Alazab, L. Tan, and B. Gu, "Deep learning- based traffic safety solution for a mixture of autonomous and manual vehicles in a 5g-enabled intelligent transportation system," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–11, 2020.
- [6] A. G. González, M. V. Alves, G. S. Viana, L. K. Carvalho, and J. C. Basilio, "Supervisory control-based navigation architecture: A new framework for autonomous robots in industry 4.0 environments," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1732– 1743, 2017.
- [7] D. Pearson, E. An, M. Dhanak, K. von Ellenrieder, and P. Beaujean, "High-level fuzzy logic guidance system for an unmanned surface vehicle (usv) tasked to perform autonomous launch and recovery (alr) of an autonomous underwater vehicle (auv)," in *2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pp. 1–15, 2014.
- [8] G. G. Acosta, B. Menna, R. de La Vega, L. Arrien, H. Curti, S. Villar, R. Leegstra, M. Paula, I. Carlucho, F. Solari, *et al.*, "Macabot: [19] U-blox, *Neo 6M*. U-blox, 7 ed., 12 2012. Data sheet.
- [9] S. Y. Luis, D. G. Reina, and S. L. T. Marín, "A multiagent deep reinforcement learning approach for path planning in autonomous surface vehicles: The ypacará lake patrolling case," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17084–17099, 2021.
- [10] J. d. León and A. Barrientos, "Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate," *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*, 2017.
- [11] J. Izquierdo, L. A. Curiel, R. Bustamante, and R. A. Ramírez, "Perspective of autonomous driving in México," in *2018 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, pp. 144–146, IEEE, 2018.
- [12] M. Maaref, J. Khalife, and Z. M. Kassas, "Enhanced safety of autonomous driving by incorporating terrestrial signals of opportunity," in *ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 9185–9189, 2020.
- [13] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, A. Y. Ng, *et al.*, "Ros: an open-source robot operating system," in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, p. 5, Kobe, Japan, 2009.
- [14] B. menna, S. villar, and G. Acosta, "Navigation system for macÁ bot an autonomous surface vehicles using gps aided strapdown inertial navigation system," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 1009–1019, 2019.
- [15] S. Yang and M. Baum, "Extended kalman filter for extended object tracking," in *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 4386–4390, 2017.
- [16] C. Fairchild and T. L. Harman, *ROS Robotics By Example: Learning to control wheeled, limbed, and flying robots using ROS Kinetic Kame*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [17] J. Barrozo and V. Lazcano, "Simulation of an autonomous vehicle control system based on image processing," in *2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, pp. 88–94, 2019.
- [18] G. V. Raffo, G. K. Gomes, J. E. Normey-Rico, C. R. Kelber, and L. B. Becker, "A predictive controller for autonomous vehicle path tracking," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 92–102, 2009.
- [19] U-blox, *Neo 6M*. U-blox, 7 ed., 12 2012. Data sheet.
- [20] ELECFreaks, *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04*. ELECFreaks. Data sheet.

Propuesta matemática para calcular los parámetros aerodinámicos y trayectoria de una cápsula espacial en la atmosfera terrestre

Arnold Daniel Andrade Torres¹
Universidad Tecnológica del Perú
Perú

En este proyecto se desarrolla un método matemático para el cálculo de los parámetros aerodinámicos y trayectoria de una cápsula espacial en la atmosfera terrestre. El modelo matemático es intuitivo y fácil de usar, principalmente para estudiantes de Ingeniería Aeronáutica, ya que brinda las herramientas necesarias para que los profesores y los estudiantes estudien el comportamiento de la cápsula espacial en la atmosfera terrestre. En la propuesta de cálculo se integra los parámetros de entrada a analizar, como la geometría predefinida de la cápsula y otros datos iniciales. El usuario inicia ingresando los parámetros para la misión, luego escoge la configuración de la cápsula espacial, el algoritmo realiza el análisis y el cálculo automáticamente, y brinda resultados de los parámetros aerodinámicos (coeficiente de sustentación, resistencia, en función del ángulo de ataque), lo mismo que la trayectoria de la cápsula espacial. Las herramientas de análisis de esta propuesta matemática utilizan métodos numéricos para estudiar el comportamiento de la cápsula.

¹ Ingeniero en Aeronáutica y Magíster en Cohetes Complejos y Astronáutica.
Contacto: adandrade@utp.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

Una cápsula es parte de una nave espacial que regresa a la tierra luego de una misión de vuelo. Para el proyecto a investigar no se encuentran referentes a nivel nacional (Perú). La forma o geometría de la cápsula espacial está determinada en parte por la aerodinámica; una cápsula es aerodinámicamente estable, al ingresar a la atmosfera terrestre lo hace por el extremo del morro (conocido como la panza), lo que permite que solo el extremo del romo requiera un escudo térmico para poder soportar la fricción del aire generando altas temperaturas mayores a 1500°C. Para este tipo de estudios, principalmente en EEUU, Rusia y China, hay diversos experimentos, libros netamente relacionados al tema y revistas científicas, etc.

El propósito de este proyecto es proponer un método matemático para el cálculo de los parámetros aerodinámicos y trayectoria de una cápsula espacial en la atmosfera terrestre, en el cual se calculan los coeficientes aerodinámicos y trayectoria de la cápsula espacial empleando un algoritmo en Matlab, en el algoritmo se podrá interactuar con los datos iniciales y la geometría de la cápsula para futuras investigaciones.

2. DESARROLLO DEL MÉTODO

En el siguiente marco conceptual se mostrarán como será los procesos para sus respectivos cálculos, como se observa en la Figura 1.

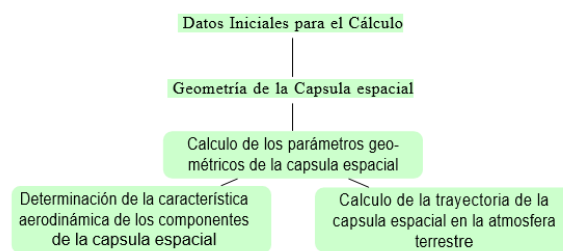


Figura 1. Proceso de cálculo para obtener los resultados

2.1 Procedimiento para el cálculo

Se explica de forma general todos los procesos a seguir para obtener los resultados respectivos de la cápsula espacial.

2.1.1 Datos iniciales para el cálculo y geometría de la cápsula espacial

Para realizar el cálculo se trabaja con un modelo de cápsula espacial Apollo [1], Como se observa en la Figura 2, con los datos de condiciones de entrada.

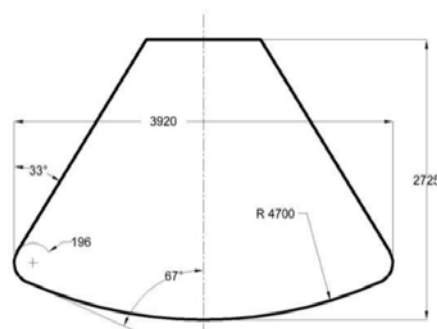


Figura 2. Forma aerodinámica basada en el módulo de comando Apollo [1]

2.1.2 Cálculo de los parámetros geométricos de la cápsula espacial

Los parámetros geométricos de la cápsula espacial juegan un papel importante en los estudios de diseño conceptual, siendo la base para evaluar la masa y las características de inercia, para calcular las

características aerodinámicas de la cápsula espacial, para formar su modelo termino y balístico (o trayectoria), el método para calcular los parámetros geométricos de la cápsula espacial fue mediante las ecuaciones en [2]. La Tabla 1 muestra el resultado de las características geométricas de la cápsula espacial Apollo.

Tabla 1. Características geométricas de la cápsula espacial Apollo

Numeración	Denominación	Símbolo	Valor
1	Diámetro cápsula espacial	D	4500
2	Longitud cápsula espacial	L	2925
3	Alargamiento	λ	0.65
4	Superficie total	S_x	49
5	Centro de gravedad de la superficie	X_T^S	1180
6	Volumen total	V_x	$26 m^3$
7	Centro de gravedad del volumen	X_T^V	1219

2.1.3 Cálculo de las características aerodinámicas de la cápsula espacial

Los coeficientes aerodinámicos de la cápsula espacial en la atmosfera terrestre en el descenso se determinarán de acuerdo con la teoría de Newton, descrita mediante ecuaciones de los apuntes de clase en [3], asumiendo que el medio que fluye alrededor de la cápsula espacial consiste en partículas idénticas ubicadas a igual distancia entre si y por lo tanto no interactúan entre sí. Para una concordancia más completa de los datos calculados y experimentales al considerar el flujo alrededor de cuerpos de revolución a velocidades supersónicas con una onda de choque, se usa el valor newtoniano del coeficiente $k = 2$.

2.1.4 Cálculo de las características aerodinámicas del segmento esférico

Las ecuaciones (1) y (2) es el coeficiente de la fuerza de resistencia del segmento esférico considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq \alpha \leq \theta_c \\
 C_{XC} &= \frac{\pi \cdot K \cdot R^2}{2 \cdot S_D} \left(\frac{\sin^2 \alpha \cdot \cos^4 \theta_c}{2} - \cos^2 \alpha \cdot \sin^4 \theta_c + \cos^2 \alpha \right) \quad (1) \\
 & \theta_c \leq \alpha \leq \pi - \theta_c \\
 C_{1X} &= \cos \alpha \cdot \arccos \left(\frac{\sin \theta_c}{\sin \alpha} \right) \\
 C_{2X} &= \left(\frac{\sin^2 \alpha \cdot \cos^4 \theta_c}{2} - \cos^2 \alpha \cdot \sin^4 \theta_c + \cos^2 \alpha \right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{\tan \theta_c}{\tan \alpha} \right) \right) \\
 C_{3X} &= \frac{\sin \alpha \cdot \cos \theta_c}{2} \cdot (1 - 3 \sin^2 \theta_c) \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \theta_c} \\
 C_{XC} &= \frac{K \cdot R^2}{2 S_D} (C_{1X} + C_{2X} + C_{3X}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (3) y (4) es el coeficiente de la fuerza de sustentación del segmento esférico considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq \alpha \leq \theta_c \\
 C_{YC} &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{K \cdot R^2}{S_D} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^4 \theta_c \quad (3) \\
 & \theta_c \leq \alpha \leq \pi - \theta_c \\
 C_{1Y} &= \arccos \left(\frac{\sin \theta_c}{\sin \alpha} \right) \\
 C_{2Y} &= \cos \alpha \cdot \sin^4 \theta_c \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{\tan \theta_c}{\tan \alpha} \right) \right) \\
 C_{3Y} &= \frac{\sin \theta_c}{3} \cdot \left(\sin^2 \theta_c \cdot \left(3 - \frac{1}{\sin^2 \alpha} \right) - 5 \right) \cdot \sqrt{\sin^2 \alpha - \sin^2 \theta_c} \\
 C_{YC} &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{K \cdot R^2}{S_D} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^4 \theta_c \quad (4)
 \end{aligned}$$

En la Figura 3 se puede apreciar que el coeficiente de resistencia de la parte esférica o la pansa de la cápsula espacial resiste una mayor resistencia de fricción del aire con la superficie de la pansa, por lo que actúa

como un frenado durante su descenso, el alto coeficiente de resistencia está en el intervalo aproximados de 0° a 30° su respectivo ángulo de ataque nominal, en el que se formaría la onda de choque en la pansa por las altas velocidades de las partículas de aire Hipersónicas, mientras que el coeficiente de sustentación con respecto al ángulo de ataque no hay muchos cambios.

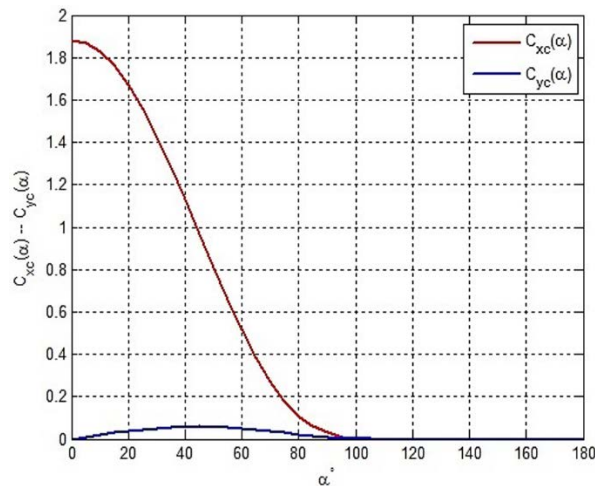


Figura 3. Característica aerodinámica del segmento esférico de la cápsula espacial

2.1.5 Cálculo de las características aerodinámicas del segmento cónico

Las ecuaciones (5) y (6) es el coeficiente de la fuerza de resistencia en el segmento cónico considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

$$\begin{aligned} 0 \leq \alpha \leq \theta_K \\ C_{XK} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta_K \leq \alpha \leq \pi - \theta_K \\ C_{1X} = (2\cos^2\alpha \cdot \sin^2\theta_K + \sin^2\alpha \cdot \cos^2\theta_K) \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{\tan\theta_K}{\tan\alpha}\right) \right) \\ C_{2X} = 3\cos\alpha \cdot \sin\theta_K \sqrt{\sin^2\alpha - \sin^2\theta_K} \\ C_{XK} = \frac{k \cdot L_K \cdot R \cdot (1+\xi) \cdot \tan\theta_K}{2S} (C_{1X} + C_{2X}) \end{aligned} \quad (6)$$

Las ecuaciones (7) y (8) es el coeficiente de la fuerza de sustentación en el segmento cónico considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

$$\begin{aligned} 0 \leq \alpha \leq \theta_K \\ C_{YK} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \theta_K \leq \alpha \leq \pi - \theta_K \\ C_{1Y} = \cos\theta_K \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \sin\theta_K \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{\tan\theta_K}{\tan\alpha}\right) \right) \\ C_{2Y} = \frac{\cos^2\alpha \cdot \sin^2\theta_K + 2\sin^2\alpha \cdot \cos^2\theta_K}{3\cos\alpha \cdot \sin\theta_K} \cdot \sqrt{\sin^2\alpha - \sin^2\theta_K} \\ C_{YK} = \frac{k \cdot L_K \cdot R \cdot (1+\xi)}{S} (C_{1Y} + C_{2Y}) \end{aligned} \quad (8)$$

Como se observa en la Figura 4, los coeficientes aerodinámicos (sustentación, resistencia) para el segmento cónico van cambiando en función al ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

2.1.6 Cálculo de las características aerodinámicas de la parte final de la cápsula espacial

Las ecuaciones (9) y (10) es el coeficiente de la fuerza de resistencia de la parte final de la cápsula espacial considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180° .

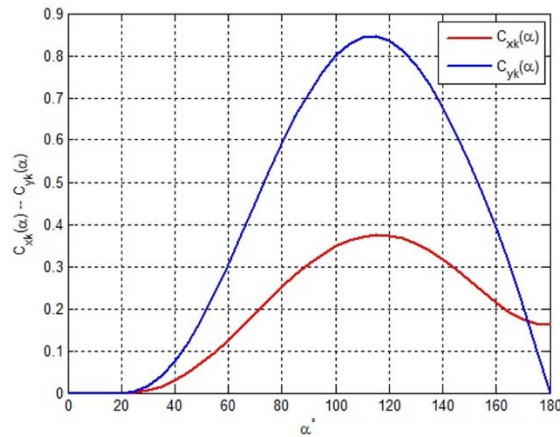


Figura 4. Característica aerodinámica del segmento cónico de la cápsula espacial

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

$$C_{Xd} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$$

$$C_{Xd} = K \cdot \cos^2 \alpha \cdot \xi^2 \quad (10)$$

$$\xi = d/D$$

Donde:

d=Diámetro menor del cono truncado.

D=Diámetro mayor del cono truncado.

En la ecuación (11) es el coeficiente de la fuerza de sustentación de la parte final de la cápsula espacial considerando el ángulo de ataque desde 0° hasta 180°.

$$C_{Yd} = 0 \quad (11)$$

Como se observa en la Figura 5, el coeficiente de resistencia en la parte final de la cápsula va aumentando entre los rangos de 100 a 180 grados, de manera brusca, en la parte final de la cápsula no hay sustentación por lo tanto el coeficiente de sustentación es cero.

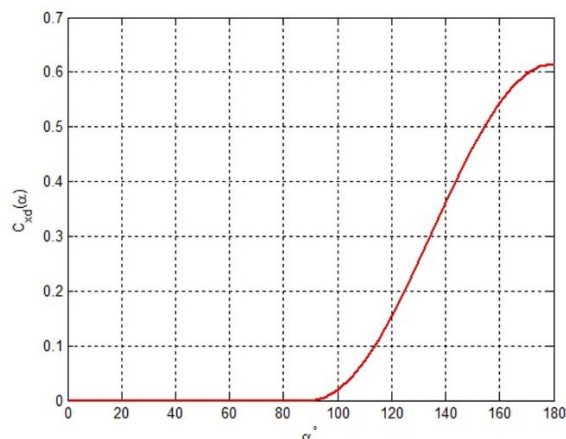


Figura 5. Característica aerodinámica de la parte final de la cápsula espacial

2.1.7 Cálculo de las características aerodinámicas del vehículo espacial en el sistema de coordenadas

La característica aerodinámica típica de una cápsula espacial sementaría axisimétrico se muestran en las Figuras 6 y 7. Debido a la influencia de las perturbaciones aerodinámicas (por ejemplo, el ángulo de ataque inicial), la cápsula espacial se mueve alrededor del centro de masa, lo que requiere resolver los problemas de estabilidad estática y dinámica.

La ecuación (12) es el coeficiente de la fuerza de resistencia de la cápsula espacial.

$$C_X(\alpha) = C_{XC}(\alpha) - C_{XK}(\alpha) - C_{Xd}(\alpha) \quad (12)$$

La ecuación (13) es el coeficiente de la fuerza de sustentación de la cápsula espacial.

$$C_Y(\alpha) = C_{YC}(\alpha) + C_{YK}(\alpha) + C_{Yd}(\alpha) \quad (13)$$

Para obtener una fuerza de elevación en un aparato axisimétrico de forma segmentaria, es necesario darle un ángulo de ataque, cuyo equilibrio se asegura creando una excentricidad de peso, como se observa en la Figura 6 el coeficiente de resistencia va disminuyendo conforme el ángulo de ataque va aumentando.

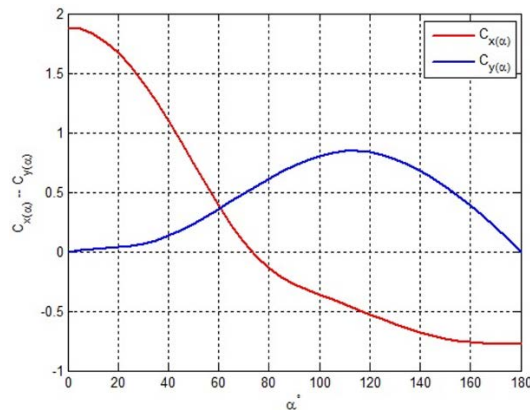


Figura 6. Característica aerodinámica de la cápsula espacial

2.1.8 Cálculo de las características aerodinámicas del vehículo espacial en el sistema de coordenada de velocidad

La ecuación (14) es el coeficiente de la fuerza de resistencia de la cápsula espacial en el sistema de coordenadas de velocidad.

$$C_{Xa} = C_X \cdot \cos\alpha + C_Y \cdot \sin\alpha \quad (14)$$

La ecuación (15) es el coeficiente de la fuerza de sustentación de la cápsula espacial en el sistema de coordenadas de velocidad.

$$C_{Ya} = C_X \cdot \sin\alpha - C_Y \cdot \cos\alpha \quad (15)$$

En presencia de velocidad angular el ángulo de ataque instantáneo difiere a lo largo de la longitud del vehículo, lo que crea un momento adicional. Si la derivada de este momento con respecto a la velocidad angular es negativa, entonces el momento es amortiguador, de lo contrario es anti-amortiguamiento. En la Figura 7 se puede apreciar la capacidad de una cápsula espacial para crear momentos de estabilización durante sus oscilaciones alrededor del centro de masa.

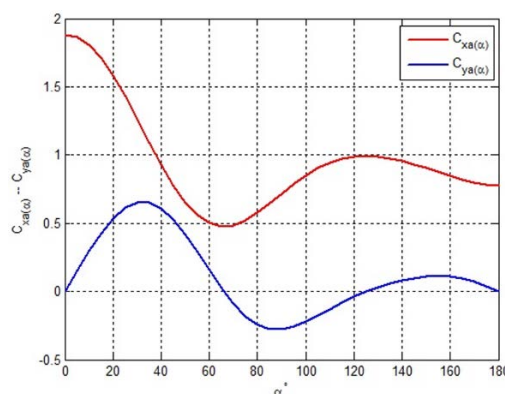


Figura 7. Característica aerodinámica de la cápsula espacial

2.1.9 Determinación del centro de masa de la cápsula espacial

Con los cálculos obtenidos desde las características aerodinámicas, podremos calcular las coordenadas del centro de masa de la cápsula espacial para un respectivo ángulo de ataque, ya que conforme va variando el ángulo de ataque el centro de masa también varía. La Tabla 2 nos muestra el resultado del centro de masa de la cápsula espacial.

Tabla 2. Centro de masa de la cápsula espacial Apollo

Coordenadas del centro de masa	Símbolo	Valor
Coordenada en el eje X	$X_{c.m}$	690mm
Coordenada en el eje Y	$Y_{c.m}$	200mm
Coordenada en el eje Z	$Z_{c.m}$	200mm

2.1.10 Cálculo balístico de la cápsula espacial

Para algunos estudios de reentrada atmosférica terrestre, se encuentran disponibles soluciones teóricas que dan como resultado ecuaciones legibles, tal como se mira en (16) que muestra claramente cómo cada variable afecta el movimiento y el calentamiento aerodinámico en [4] y [5].

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -g \sin \theta - \frac{\rho \cdot V^2}{2P_x} \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{\rho \cdot VK}{2P_x} + \frac{V^2 - gR}{RV} \cos \theta \\ \frac{dH}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dL}{dt} = R_{tie} \frac{V \cos \theta}{R} \end{cases} \quad (16)$$

Como resultado nos muestra el descenso de la cápsula espacial teniendo en cuenta las características aerodinámicas de la cápsula espacial, dentro de sus límites de sobre carga y condiciones térmicas, así como también los requisitos propias de la trayectoria de descenso, con una velocidad de descenso de $7800 \frac{m}{s}$, masa de la cápsula espacial $G_{cA} = 8070kg$, ángulo de ingreso a la atmosfera $\theta = -2$ y a una altura de $100km$.

La cápsula espacial ingresa a la atmosfera de la tierra con una velocidad prácticamente constante durante los 100 primeros segundos cuando la cápsula espacial se encuentra por encima de la mayor parte de la atmosfera. Pero las condiciones cambian rápidamente durante los 200 próximos segundos, la cápsula espacial pierde aproximadamente el 90% de su velocidad por el siguiente motivo la atmosfera se espesa, es como chocar con una pared, con la mayor parte de la velocidad perdida, el vehículo desacelera mucho más lentamente. Luego se necesitan unos 100 segundos aproximadamente más para disminuir la velocidad en otros $1000 \frac{m}{s}$. Como se observa en la Figura 8 los resultados de la integración numérica por medio del método de Runge-Kutta de cuarto orden.

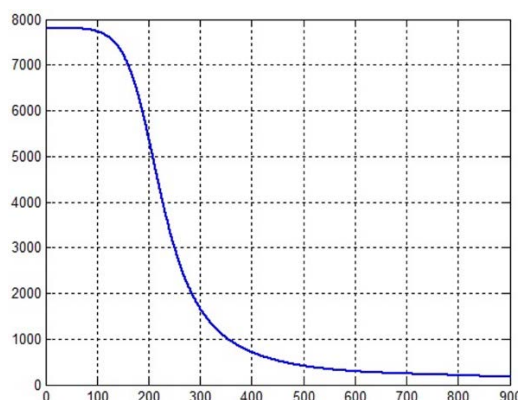


Figura 8. El cambio en la velocidad de vuelo en función del ángulo de entrada del vehículo de descenso se muestra en el intervalo de tiempo de 0 a 900 segundos

3. CONCLUSIONES

Con los datos iniciales, se pueden calcular las características geométricas de la cápsula espacial, según con las medidas geométricas de entrada. Es una cápsula espacial de gran tamaño tiene un volumen grande, pero hoy en día hay otros dispositivos con volúmenes mayores como la cápsula espacial Orión.

Con los resultados obtenidos con el modelo matemático para poder calcular las características aerodinámicas de la cápsula espacial fueron las correctas por lo tanto se procedió a calcular el centro de masa, tomamos como ejemplo las medidas geométricas de la cápsula Apollo comparamos los resultados con otros revistas científicas y fueron aceptadas, entonces el modelo matemático es la correcta y se podrán realizar futuras pruebas con cápsulas espaciales recientes como (Orion, Starliner, Orel, etc.).

Para solucionar los problemas de la cápsula espacial al reingresar a la atmosfera terrestre, se desarrolló por medio de cálculos numéricos con la ayuda del método de Runge-Kutta en Matlab. Se calculan las características balísticas del vehículo de descenso a la entrada de la atmosfera. El grafico obtenido muestra que la velocidad de reingreso a la atmosfera sufre cambios bruscos en los intervalos de tiempo de 100 a 300 segundos por la atmosfera se va espesando conforme se acerca a la superficie de la tierra.

REFERENCIAS

- [1] V. E. Minenko, D. N. Aganov, A. G. Yakushev, "Project Analysis of Aerodynamics Configuration of Re-entry Capsule-Shaped Body on Numerical Methods for Newtonian Flow Theory". *Aerospace Scientific Journal of the Bauman MSTU*, 2015 May, 2015, no. 04, pp. 1-14.
- [2] V. N. Bobkov, V. V. Bacilev, E. K. Demchenko, G. B. Lebedev, B. A. Ovciyannikov. "Kosmicheskiy apparat". Moscow. Boensdat. 1983. 361 p.
- [3] "Proektirovanie kosmicheskix apparatov", class notes for Python, Department of Spacecraft and Launch Vehicles Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Winter 2014.
- [4] Ciharulidse J. G. "Balistica letatelnix apparatov". Moscow-Nauka. 1982. 410 p.
- [5] Yaroshevsky V. A, "Vxod v atmosferu kosmicheskix letatelnix apparatov". Moscow-Nauka. 1988. 336 p.

Evolución de la operación de aeropuertos y desafíos post Covid-19

Oscar Díaz Olariaga¹
Universidad Santo Tomás
Colombia

A finales de 1980 se inició un proceso de privatización de aeropuertos, que aún está en marcha. Este proceso comenzó cuando estaba en curso, a nivel mundial, la desregulación del sector de las líneas aéreas. Paralelamente, el sector del transporte aéreo experimentaba un elevado crecimiento de la demanda, lo que obligaba a los aeropuertos a expandir sus grandes infraestructuras, pero para ello necesitaban importantes inversiones de capital. Fue entonces cuando el sector público permitió la entrada del sector privado en la industria aeroportuaria. La privatización de los aeropuertos implicó un cambio en la gestión del aeropuerto, transformando a los mismos en empresas de servicios, pero enfocadas al negocio, la rentabilidad y la eficiencia. Este capítulo de revisión, analiza cómo evolucionó la gestión del aeropuerto en las últimas cuatro décadas, y lo hace a través de aquellos factores relevantes que influyeron en la transformación del sector aeroportuario; y finalmente, se realiza un análisis del impacto de la actual pandemia debido al Covid-19 sobre la industria aeroportuaria, y las estrategias y acciones que los gestores/operadores aeroportuarios deberían realizar, tanto de forma inmediata como en el corto-medio plazo, para poder mitigar la actual crisis.

¹ Contacto: OscarDiazOlariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos son una parte esencial del sistema de transporte aéreo, proporcionando toda la infraestructura, instalaciones y tecnología necesaria para que los operadores aéreos puedan transportar pasajeros y carga de un punto a otro de la geografía regional/mundial. La industria aeroportuaria ha experimentado un gran desarrollo en las últimas cuatro décadas, el cual es consecuencia directa de la creciente demanda de servicio de transporte aéreo verificado en el mismo periodo. Para comprender la dimensión del crecimiento del transporte aéreo se citan algunas cifras relevantes: en el año 1987 se transportaron, a nivel mundial, 1.000 millones de pasajeros, para el año 2019 (previo a la pandemia debido al Covid-19) esa cifra escaló a los 4.500 millones de pasajeros transportados en 38,3 millones de vuelos [1].

Un estándar muy utilizado en el transporte aéreo es el denominado pasajero-kilómetro-transportado RPK, el cual contempla la distancia recorrida por el pasajero en su vuelo, entonces el RPK gestionado a nivel global en el año 1987 fue de 1,5 billones, en el año 2019 el RPK mundial alcanzó los 8,7 billones [1]; y en cuanto al transporte de carga aérea, existe una fórmula similar, toneladas-kilómetros-transportado FTK, el FTK movilizado en 2019 (225 mil millones) se quintuplicó con respecto a 1987 [1].

Esta situación de crecimiento ininterrumpido de la demanda de transporte aéreo mundial se vio positivamente influida por un gran cambio que experimentó el otro componente de la industria, el sector aerocomercial. La tendencia hacia la total liberalización de las líneas aéreas comenzó en 1978 con la desregulación del mercado interno de USA. En la Unión Europea, la desregulación se logró con una política multilateral que evolucionó a lo largo de varios años y en tres etapas (entre 1987 y 1993). Esta desregulación en Europa propició la privatización de muchas aerolíneas nacionales, el nacimiento de otras, y la entrada al mercado de las líneas aéreas de bajo costo, iniciativa que se expandió pronto a otras regiones del mundo. La liberalización aerocomercial se extendió, escaladamente, a otras regiones del mundo [2].

Mientras se producían estos cambios en el sector aerocomercial, el sector aeroportuario, en un principio, era un simple actor pasivo. Pero en poco tiempo empezó también a incorporarse a esta gran transformación de la industria. La transformación de los aeropuertos, por entonces totalmente controlados y administrados por el sector público, se produjo en dos etapas. La primera, que se podría denominar de comercialización, implicó un cambio conceptual del aeropuerto desde su concepción de empresa proveedora de un servicio público a una empresa comercial, con la adopción de una filosofía de gestión enfocada en el negocio. Y la segunda etapa, la de privatización, implicó la transferencia de la gestión del aeropuerto al sector privado, a través de una variedad de fórmulas y métodos [3, 4].

Esta transformación permitió la entrada de capital privado al sector aeroportuario, imprescindible para hacer frente a la necesidad de ampliación y modernización tecnológica de las grandes, y costosas, infraestructuras aeroportuarias, para responder al dinámico crecimiento de la demanda de transporte aéreo. Entre 1990 y 2015 la participación del sector privado en proyectos de privatización aeroportuaria, ya fuera total o parcial, en 52 países, fue de casi USD 104 mil millones. En la región de Latinoamérica y Caribe la participación e inversión privada en el sector alcanzó los USD 39.523 millones en el periodo antes mencionado [5].

Las nuevas gerencias de los aeropuertos privatizados empezaron a implementar las habituales técnicas y estrategias de gestión usadas en el resto de sectores industriales, pero adaptándolas a las especiales características de la industria aeroportuaria. Por ello, partiendo prácticamente de cero, y en tres/cuatro décadas, se fueron desarrollando nuevos procesos de gestión, estrategias comerciales e indicadores para poder evaluar el rendimiento y la eficiencia. Con el tiempo se consiguió que la gestión del aeropuerto se enfocara más en el negocio [6].

Entonces, este trabajo de revisión analiza cómo evolucionó la gestión u operación o administración (en este trabajo todos estos términos se usan de forma indistinta) del aeropuerto en las últimas cuatro décadas, y lo hace a través de aquellos factores relevantes acaecidos en la industria del transporte aéreo en dicho periodo que influyeron en la transformación del sector aeroportuario. El análisis muestra como la gestión y gobernanza de los aeropuertos evolucionaron para ser, hoy día, empresas complejas enfocadas en el

negocio, por tanto, dotadas de una amplia gama de competencias y habilidades empresariales, y orientadas al cliente, al rendimiento y a la calidad del servicio. Ahora bien, debido a la graves situación por la que atraviesa la industria del transporte aéreo mundial desde febrero del 2020, resultado de la pandemia mundial por el Covid-19, se cree necesario y oportuno dedicar un par de secciones, las últimas de la presente investigación, sobre este acontecimiento. En primer lugar, se citan indicadores relevantes de la industria y su comparación con el periodo pre-pandémico y, en segundo lugar, se realiza un análisis sobre las acciones y estrategias que los gestores/operadores de los aeropuertos están implementado, o deberían implementar, para mitigar el impacto de la crisis que condujo al desplome de la demanda, tanto para el presente inmediato como para el corto plazo (época pos-pandémica).

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Modelos de gestión de aeropuerto

En la literatura especializada del sector no siempre se distingue de forma explícita entre el propietario, el gestor y el regulador del aeropuerto debido a que propiedad y gestión han ido unidas desde el nacimiento de la industria aeroportuaria. Hoy en día, el operador de un aeropuerto no siempre coincide con el propietario de las infraestructuras y terrenos, es por eso que un primer aspecto a clarificar es qué se entiende por propietario, gestor y regulador de un aeropuerto. Por lo general, el gestor es el responsable de la operación y administración del aeropuerto, y por lo tanto debe tener todas las competencias para ello; mientras, el propietario posee el terreno, las infraestructuras e instalaciones en las que se desarrollan las diferentes actividades aeronáuticas y aeroportuarias. En los inicios de la industria, y hasta hace solo tres décadas, en la mayoría de los países, propietario y gestor del aeropuerto eran una misma entidad, la autoridad pública [7].

Ahora bien, hay un hito que producirá a medio plazo un gran impacto en la organización y gobierno/gestión de un aeropuerto, la liberalización del transporte aéreo, iniciada en Estados Unidos en 1978, cuyos éxitos, en términos de reducción de tarifas aéreas, incremento del tráfico de pasajeros y número de vuelos están ampliamente documentados [8-10]. La iniciativa en Estados Unidos tuvo continuidad en Europa a finales de la década de 1980, siendo el Reino Unido el precursor en este continente, cuyo origen, desarrollo y resultados también cuenta con un amplio tratamiento bibliográfico [11-16]. La liberalización del sector de las líneas aéreas conduce, a corto plazo, al nacimiento de nuevas aerolíneas privadas en USA [17].

En Europa, la desregulación también da inicio a la privatización de las grandes aerolíneas nacionales (por entonces conocidas como líneas áreas de bandera) y el nacimiento de otras, en especial las llamadas líneas aéreas de bajo costo. Y ya entrada la década de 1990 esta corriente privatizadora se expande a otros países y regiones del mundo [2]; por ejemplo, en América Latina el proceso de liberalización del transporte aéreo inicia a principios de la década de 1990 [7, 18-20].

Entonces, la liberalización de la industria del transporte aéreo afecta en primer lugar al sector aerocomercial y posteriormente al sector aeroportuario [21]. En los aeropuertos el impacto de la liberalización recae en el planteamiento de alternativas al tradicional modelo de gestión público, principalmente se permite la entrada de capital privado dando lugar a nuevas fórmulas de gestión de los aeropuertos, y en ciertos casos puntuales también de la propiedad, como sucedió con algunos aeropuertos en el Reino Unido [22, 23]. A partir de ese momento, y hasta el presente, se identifican tres modelos de gestión / gobernanza de los aeropuertos: público, privado y mixto (público y privado) [3, 4, 24-26].

2.2 Orígenes de la privatización de aeropuertos

La tradicional propiedad y gestión pública de los aeropuertos siempre estuvo enfocada en que los mismos existían, exclusivamente, para ofrecer un servicio público de transporte aéreo [27]. Por lo tanto, las buenas prácticas económico-financieras y la gestión comercial no eran prioritarias. La liberalización del sector de las líneas aéreas motivó a los aeropuertos a plantearse una nueva fórmula de gestión, una con un enfoque mucho más comercial y orientado al negocio. En definitiva, esta época (mediados de la década de 1980) podría considerarse como el inicio de la comercialización de los aeropuertos [3, 4, 27-32].

Esta necesidad, y motivación, de enfocar la gestión del aeropuerto hacia lo comercial produce varios cambios relevantes. En primer lugar, los aeropuertos empiezan a perder sus fuertes vínculos con sus propietarios, el gobierno. Se flexibiliza la gestión de los aeropuertos a través de la creación de autoridades aeroportuarias públicas pero más independientes, con el objetivo de dar más libertad e incluso autonomía a los gestores del aeropuerto para poder éstos adoptar las nuevas prácticas de gestión comercial y priorizar actividades antes subvaloradas como la mejora de los ingresos no-aeronáuticos, el *marketing* aeroportuario, la gestión financiera, la evaluación comparativa, el control y aseguramiento de la calidad de servicio, etc.

Uno de los elementos clave en esta dinámica fue la búsqueda, y necesidad, de potenciar los ingresos no-aeronáuticos o comerciales [33-36], segunda fuente de ingresos más importante de un aeropuerto luego de los ingresos aeronáuticos.

Las privatizaciones de los aeropuertos han sido una realidad desde mediados-finales de la década de 1980. Desde entonces un número considerable de aeropuertos, tanto domésticos como internacionales, han sido privatizados, evento que empezó en los países desarrollados y en muy pocos años se trasladó a los países en vías de desarrollo. En este contexto, la privatización es entendida, principalmente, como la transferencia de la gestión/operación desde el sector público al sector privado [3]. La literatura relacionada ha proporcionado las siguientes las razones (vistas como ventajas) de la privatización de los aeropuertos [3, 4, 24, 27, 32, 37-39]:

- Genera una reducción del gasto público en el rubro.
- Abre la puerta a nuevas fuentes de financiación (privadas) para mejorar, ampliar y modernizar los aeropuertos con el objetivo de dar una respuesta a la alta demanda que experimenta el transporte aéreo debido a los procesos de desregulación en los diferentes mercados y liberalización paulatina de las tarifas aéreas.
- Los aeropuertos pueden funcionar con los mismos estándares de las empresas privadas, es decir, orientadas al crecimiento y a la competitividad.
- Permite una mejor gestión y potenciación de nuevas fuentes de ingresos, principalmente los conocidos como ingresos no-aeronáuticos, no prioritarios (o deficientemente explotados) en la gestión pública del aeropuerto.
- Aumento de oportunidades de diversificación del negocio aeroportuario.
- Genera un entorno que permite una operación y gestión eficiente y rentable.

3. MÉTODO

El presente capítulo es uno del tipo revisión, por lo tanto, su enfoque y planteamiento, de carácter descriptivo, se desarrolla de la siguiente manera. En primer, en el marco conceptual, se introduce al lector en los conceptos fundamentales sobre modelos de gestión de aeropuertos y los orígenes de la privatización de aeropuertos, todo ello a nivel global/mundial y siguiendo una línea temporal de análisis, ya que el estudio es general, es decir a nivel de industria, y no sobre un caso particular de estudio.

Paso seguido, se presentan los resultados y, como este trabajo es de revisión, la evolución de la gestión aeroportuaria, desarrollada y detallada en sus diferentes facetas y dimensiones, conforman en sí misma los resultados del análisis histórico-temporal aquí analizado. Ahora bien, por las particulares y excepcionales circunstancias que está experimentando la industria aeroportuaria, y de transporte aéreo, a nivel mundial a consecuencia de la pandemia del Covid-19, se decidió incorporar a la presente investigación dos secciones adicionales, una en la que presenta, con indicadores relevantes, el impacto de la pandemia sobre la industria del transporte aéreo y aeropuertos, y una segunda sección donde, y en la línea del presente trabajo, se presentan y analizan las estrategias que la industria aeroportuaria debe realizar (o ya está realizando), en sus diferentes líneas de gestión / administración, en el corto y medio plazo, para mitigar los enormes efectos negativos que la pandemia del Covid-19 está generando.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Evolución de la gestión aeroportuaria

Hasta la década de 1980 la mayoría de los aeropuertos, a nivel mundial, era de propiedad pública gestionados por el sector público y se consideraban, históricamente, como infraestructuras con obligaciones de servicio público. En consecuencia, las buenas prácticas de gestión comercial y financiera no tenían un carácter prioritario. Entrada la década de 1980, y a medida que la industria del transporte aéreo crecía y maduraba, y mientras se desarrollaba la desregulación del sector aerocomercial, las opiniones sobre la gestión aeroportuaria empezaron a cambiar. Muchos aeropuertos comenzaron, poco a poco, a considerarse como empresas comerciales y se adoptó una filosofía de gestión más comercial. Así comenzó la comercialización de la industria aeroportuaria. El ritmo de cambio era desigual en las diferentes regiones del mundo [27].

Los movimientos hacia una nueva forma de administrar los aeropuertos se reflejaron en una serie de desarrollos diferentes e interrelacionados. Primero, varios aeropuertos flexibilizaron sus vínculos con sus propietarios (el gobierno nacional/regional/municipal). Esto se logró con el establecimiento de autoridades aeroportuarias más independientes de la administración central, que implicó la creación de empresas públicas aeroportuarias con accionistas (aunque siempre del sector público). Estos avances dieron a los aeropuertos más libertad comercial y operativa, y en algunos casos abrieron la puerta a cierta inversión y participación del sector privado [3, 40].

Previo y durante esta transición los aspectos operativos del aeropuerto habían eclipsado tradicionalmente otras áreas, y la mayoría de los directores de aeropuertos y de la alta dirección eran especialistas en operaciones. Sin embargo, las funciones comerciales de un aeropuerto fueron gradualmente reconocidas como igualmente importantes y, en consecuencia, se ampliaron los recursos y el número de profesionales expertos en estas áreas. Las prácticas relativamente infrautilizadas, como la evaluación comparativa (*benchmarking*), el desempeño financiero y las técnicas de gestión de la calidad, también comenzaron a ser aceptadas por un número creciente de aeropuertos como instrumentos esenciales de gestión. En algunos aeropuertos, la estructura organizativa funcional típica, con diferentes departamentos de finanzas, operaciones, administración, etc., fue sustituida por unidades de negocio que se centraban más en las necesidades de los clientes (líneas aéreas y pasajeros) [27, 41, 42].

En el pasado, debido a los controles gubernamentales, a veces era muy difícil obtener cuentas financieras que dieran una verdadera indicación del desempeño financiero y económico de un aeropuerto. A menudo un aeropuerto adoptaba prácticas de contabilidad pública específicas en lugar de procedimientos comerciales más estándar. Esto significaba que las comparaciones con otras organizaciones no podían hacerse fácilmente. Además, algunos aeropuertos no se consideraron como unidades contables separadas. Esto significaba que los costos e ingresos del aeropuerto se trataban como un solo elemento dentro de las cuentas financieras generales del departamento gubernamental y rara vez se combinaban para evaluar la rentabilidad del aeropuerto. En algunos casos no existía un balance separado para el aeropuerto. Sin embargo, a partir de la década de 1980, un número creciente de aeropuertos comenzó a adoptar prácticas contables (y comerciales) del sector privado. Esto fue resultado directo de la flexibilización de los vínculos gubernamentales con el establecimiento de autoridades aeroportuarias públicas, pero con una gran autonomía de gestión [43, 44].

Pasada la década de 1980, que fue dominada por el nuevo enfoque comercializador de la gestión del aeropuerto, en la década de 1990 dio inicio la fuerte corriente de privatización de los aeropuertos. Paralelamente, una serie de acontecimientos en el sector del transporte aéreo en las décadas de 1980 y 1990 contribuyeron a impulsar la privatización de aeropuertos en muchos países [45]. En primer lugar, la demanda de transporte aéreo continuó creciendo y se preveía que lo seguiría haciendo en el futuro. En algunos mercados, especialmente en Europa y Estados Unidos, la desregulación fomentó el crecimiento y significó que la capacidad aeroportuaria existente no podría hacer frente a este crecimiento [46]. La privatización de los aeropuertos fue vista como una forma de inyectar capital privado adicional al sistema aeroportuario para financiar la gran inversión futura (en infraestructura y tecnología) necesaria. Por otra

parte, una de las principales fuentes tradicionales de financiamiento aeroportuario, es decir, los fondos del sector público, se hizo cada vez más escasa en la coyuntura económica mundial de la época, ya que los gobiernos se esforzaban por reducir sus gastos en el sector público [38, 41].

Se podría afirmar que la privatización del aeropuerto puede verse como una etapa evolutiva del mismo. Los aeropuertos han evolucionado desde empresas de servicio público a empresas comerciales, y la privatización puede considerarse como una comercialización llevada a sus límites. Al mismo tiempo, los cambios en la industria del transporte aéreo han tenido inevitablemente un gran impacto en el sector aeroportuario. La transformación de una industria de aviación predominantemente pública y controlada por el estado a un negocio competitivo global con mucha más libertad comercial ha obligado a muchos aeropuertos a tener una perspectiva mucho más centrada en el cliente [47].

4.2 Enfoque de la gestión en los aeropuertos privatizados

Una vez se privatizaban los aeropuertos las gerencias aeroportuarias empezaron a transformar, y en muchos casos a crear/innovar, las nuevas funciones de negocio. Existieron varias líneas de actuación, considerando que el sistema aeropuerto es complejo, heterodoxo, y fuertemente influido por la dinámica del transporte aéreo. En esta investigación, el análisis de esta etapa evolutiva agrupa los desarrollos de las diferentes líneas de actuación en dos grandes áreas funcionales, en las cuales queda conceptualmente representada la gran transformación del negocio aeroportuario: la comercial y la de rendimiento y eficiencia. A continuación de desarrollan ambas.

4.2.1 El desarrollo comercial

- *Gestión de los ingresos aeroportuarios.* Los ingresos de los aeropuertos están segmentados en dos grandes grupos, clasificados según su origen o fuente, y son, por un lado, los que provienen de las actividades aeronáuticas o relacionadas con el tráfico aéreo, por ello a estos ingresos se los denomina aeronáuticos; y por otro lado, los que provienen de todas aquellas actividades no aeronáuticas o comerciales, por ello a estos ingresos se los denomina no-aeronáuticos o también comerciales. Los ingresos aeronáuticos son los que surgen del aterrizaje de aeronaves (tasas de aterrizaje) y de todas sus operaciones relacionadas. Los ingresos no-aeronáuticos son los producidos por las actividades exclusivamente comerciales, principalmente de la generada dentro de los edificios terminales y anexos, y del entorno más próximo del aeropuerto [34].

El Artículo 15 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, más conocido como Convenio de Chicago (firmado en 1944, y con el que se empezó a regular la aviación civil a nivel mundial) [48], establece que es viable y se acepta que los aeropuertos de los Estados firmantes puedan aplicar ciertos derechos (tasas aeroportuarias) a sus usuarios (líneas aéreas) por el uso de sus instalaciones, siempre y cuando cumplan con criterios de equidad y no-discriminación (haciendo referencia entre sus usuarios locales/nacionales y los extranjeros). Hasta allí llegaba, en materia de aplicación de cargos, el Convenio de Chicago.

Las consideraciones de servicio público que guiaron el desarrollo de los aeropuertos desde el final de la Segunda Guerra Mundial dieron lugar a la implementación de una estructura de precios vagamente definida, y basada solo en dos criterios: a) la recuperación de los costes, y b) la no-discriminación. Pero entrada la década de 1970, cuando el tráfico aéreo empezó a ser importante (sobre todo los vuelos internacionales, potenciados con la entrada en servicios de gran aeronaves, como el Boeing 747), los grandes aeropuertos expresaron que la política de precios, recién mencionada, ya no era viable, y que necesitaban aumentar los ingresos aeroportuarios, no solo para costear el, cada vez más elevado, mantenimiento de las infraestructuras, sino para financiar las grandes inversiones en infraestructuras e instalaciones necesarias para absorber la demanda actual y prevista [49].

La OACI recogió esas reclamaciones del sector aeroportuario y publica en el año 1974 el primer manual relacionado, *Charges for Airports and Route Air Navigation Facilities* [50], luego se publicarían ocho ediciones de actualización, la última es la edición 9 de 2012, *Políticas de la OACI sobre derechos aeroportuarios y por servicios de navegación aérea* [51]. Entonces, la OACI, a través de estas guías, y

desde la primera, propone un marco sobre el cual definir, estructurar e implantar, todos los cargos aeroportuarios.

A mediados-finales de la década de 1980, y con el inicio de la comercialización de los aeropuertos, la filosofía original sobre cargos aeroportuarios había evolucionado. Los aeropuertos empezaron a desarrollar una política de precios que, como mínimo, debía cumplir los siguientes objetivos: a) generar ingresos suficientes para cubrir todos los costos y, si es posible, generar beneficios, y b) proveer una guía para futuras inversiones [27]. Con esto se da inicio al concepto de *aplicación de cargas aeroportuarias basadas en costos*, donde el primer principio, para determinar la base de costos para la imposición de derechos aeroportuarios, debe ser el costo total de proporcionar el aeropuerto todos sus servicios, incluyendo montos adecuados por costo de capital y depreciación de bienes, así como los costos de mantenimiento, explotación, dirección y administración [51].

Esta nueva concepción de las cargas aeroportuarias dio pie al desarrollo, durante las dos siguientes décadas (1990 y 2000), de una refinada estrategia de política de precios por parte de todos los aeropuertos, ya fueran públicos o privados [47, 52]. Una estrategia fue la aplicación de cargos en horas punta, los aeropuertos fundamentaban estos cargos alegando que sus costos operacionales en dichos periodos eran mayores que en los periodos no punta o llanos [27, 49, 53]. Una segunda estrategia fue la de selección (o a veces llamada de racionamiento), en donde los grandes aeropuertos, generalmente los más congestionados, restringen la operación, principalmente en las horas punta, a solo grandes o muy grandes aeronaves (éstas últimas denominadas de fuselaje ancho), debido a que las tasas de aterrizaje están en función del peso; lo que llevó a un desplazamiento forzado a horas no punta la operación de aeronaves medianas y pequeñas. Incluso, en muchos casos, este desplazamiento trasladó a aeropuertos secundarios la Aviación General (que utiliza aviones muy pequeños), las líneas aéreas regionales y las líneas aéreas de bajo costo, que por lo general utilizan aviones pequeños y medianos respectivamente.

Y una tercera estrategia, parcialmente implantada, y solo en ciertos aeropuertos del mundo (en donde la demanda de capacidad supera ampliamente a la oferta), es la comercialización de franjas horarias (*slot*) [54-56]. Los slots son permisos para que una aeronave realice una operación, de despegue o aterrizaje, en una ventana temporal previamente establecida, fijada e inamovible. Los *slots* se asignan a las líneas aéreas en las conferencias mundiales semestrales que organiza la IATA, siguiendo criterios de *derechos históricos*, y de forma gratuita [57].

Esta fórmula es imprescindible para la planificación de rutas y flota que deben realizar las aerolíneas. Los aeropuertos argumentan que los *slots* son un activo que les pertenece a ellos y no a las líneas aéreas, por lo que sugieren que los slots, sobre todo en las horas punta, deberían ser por ellos gestionados, y comercialmente. Aunque aún no existe un mercado primario de *slots* (es decir, aquel que implica al aeropuerto como vendedor), si existe un mercado secundario, en donde los *slots* se compran y venden entre las líneas aéreas, esto sucede en algunos aeropuertos de EE.UU. y en dos aeropuertos de Londres [58-61].

Esta situación, al final terminó beneficiando a los aeropuertos implicados, ya que, aunque ellos no participan del negocio de *slots*, se logró que muchos slots que las aerolíneas no usan (por diferentes estrategias comerciales) fueran vendidos a otras compañías que tenían la necesidad de los mismos para sus vuelos, lo que generó un aumento de operaciones con los correspondientes beneficios [58]. Finalmente mencionar, que estas estrategias de política de precios, sobre todo las desarrolladas y aplicadas en horas punta, también contribuyeron a gestionar la congestión en los grandes aeropuertos congestionados [53, 62-65].

- *Gestión de la estrategia comercial.* En lo que se refiere a los ingresos no-aeronáuticos, es decir aquellos que provienen exclusivamente de actividades comerciales (totalmente independientes de las aeronáuticas), los aeropuertos privatizados emprendieron una revolución sin precedentes, como fue el desarrollo e implementación de estrategias comerciales, creando incluso áreas funcionales de gestión en los nuevos organigramas aeroportuarios, para diseñar, implantar y gestionar las estrategias comerciales [3, 6, 66]. Esta iniciativa empezó incluso cambiando por completo el concepto

(arquitectónico y funcional/operativo) de cómo se debían diseñar los terminales de pasajeros. Antes, cuando el sector público gestionaba los aeropuertos, los diseños de los terminales obedecían a lo que se conocía como modelo tradicional aeroportuario. Bajo dicho criterio, el objetivo primordial del diseño era facilitar y agilizar todo el procesamiento del pasajero, desde su entrada al recinto del edificio terminal hasta el embarque en la aeronave.

La (nueva) estrategia comercial propició el desarrollo de un nuevo diseño para el edificio terminal, que se conoce como modelo comercial aeroportuario. El objetivo en este caso es maximizar los ingresos procedentes de cualquier actividad y/o iniciativa comercial que pudiera desarrollarse dentro del edificio terminal de pasajeros, e incluso extensible a su entorno más próximo [27]. Con estos diseños los gestores aeroportuarios creaban un marco o entorno (arquitectónico) que propiciaba el desarrollo de oportunidades de negocio y ya no solo en relación a sus clientes habituales, los pasajeros, sino además con otros colectivos [67]. El análisis de identificación y segmentación de mercado (potenciales clientes), que va más allá de la simple concepción de usuario único del aeropuerto, el pasajero, fue otro resultado innovador de la concepción empresarial y de negocio de los aeropuertos privatizados [47].

Ahora bien, surge la pregunta sobre qué tipo de influencia tiene el diseño arquitectónico de un edificio terminal de pasajeros, bajo el modelo comercial aeroportuario, en la generación de los ingresos no-aeronáuticos. La respuesta está en, primero, la identificación de los conceptos que comprenden los ingresos no-aeronáuticos, como son (se citan por orden de importancia): a) las concesiones (el arrendamiento de todas las áreas para explotación comercial, de productos y servicios, dentro del edificio terminal); b) bienes raíces (arrendamiento de áreas, interiores y exteriores, construidas o no, del terminal para la comercialización de ciertos servicios); y c) el servicio de estacionamiento de vehículos particulares (*parking*) [34].

Estos conceptos han sido históricamente los tradicionales, pero hoy en día se suman otros como la venta de espacios para publicidad, organización de eventos, etc. Entonces, los nuevos diseños de edificios terminales de pasajeros, bajo el modelo comercial aeroportuario, buscan potenciar el *'acercamiento* de los consumidores (ahora no solo pasajeros) a los puntos de venta existente en el terminal, sin por ello entorpecer y ralentizar el flujo de procesos que deben realizar los pasajeros desde que entran al terminal hasta que embarcan en su respectivo vuelo [68] [69]. Con esta estrategia se intenta maximizar los ingresos por concesiones, principal contribuyente de los ingresos no-aeronáuticos.

- *Marketing aeroportuario*. En la década de 1990, a medida que los aeropuertos crecían, y varios se privatizaban, las gerencias empezaron a buscar, identificar y explotar nuevas oportunidades de negocio con el objetivo de diversificar el mismo. Nace así una función de gran relevancia, dentro de la estrategia comercial aeroportuaria, el *marketing* aeroportuario. Con el tiempo, el *marketing* aeroportuario se expandió cubriendo muchas funciones de la actividad aeroportuaria, hoy en día formula estrategias en actividades tanto aeronáuticas como no-aeronáuticas contribuyendo a potenciar ambos ingresos aeroportuarios, aeronáuticos y no-aeronáuticos [6, 66, 70]. Fue el *marketing* aeroportuario el que contribuyó a abandonar la concepción de cliente único aeroportuario, y generar una nueva segmentación de usuarios del aeropuerto, incorporando nuevos perfiles de consumidores, y desarrollo estrategias comerciales para cada segmento de mercado [71, 72].

En conclusión, bajo la coyuntura antes descrita, los aeropuertos privatizados se vieron abocados en, al menos, tres frentes. Primero, desarrollar una agresiva estrategia en *marketing* aeroportuario, para captar/atraer líneas aéreas a sus aeropuertos; segundo, desarrollar una refinada política de precios, para ser competitivos en tasas aeronáuticas frente a otros aeropuertos; y tercero desarrollar una estrategia de promoción del aeropuerto en su región o área geográfica de captación y/o influencia.

4.2.2 Desarrollo del rendimiento de actuación y la eficiencia

Hasta la década de 1980, cuando comenzó la corriente privatizadora de los aeropuertos, éstos, además de ser gestionados por el estado, disfrutaban de un régimen de monopolio, situación que incluso al día de hoy muchos aeropuertos (ya sean públicos o privados) en varias regiones del mundo siguen manteniendo. Por

entonces, y bajo ese marco, era normal que los aeropuertos juzgaran su actuación usando criterios basados solo en las ganancias o en el crecimiento del tráfico [27]. En conclusión, el monitoreo sistemático y la comparación del desempeño económico de los aeropuertos no era una actividad practicada dentro de la industria aeroportuaria. La situación monopólica de la industria generaba una débil o nula presión comercial y empresarial sobre los aeropuertos, sumando a ello una falta general de experiencia en las técnicas de evaluación comparativa dentro del sector público en su conjunto. Por ello, las dificultades que conllevaba la realización de comparaciones significativas, como la participación variable en las actividades aeroportuarias y las distintas políticas contables, solo desalentaron más a la mayoría de los aeropuertos de intentar seriamente analizar su desempeño [3].

Con la privatización de los aeropuertos, entre los nuevos operadores surgió un marcado interés por las comparaciones de desempeño y la evaluación comparativa. A medida que los aeropuertos se volvían más orientados hacia el comercio, necesitaron identificar a los actores fuertes en la industria y adoptar lo que, por entonces, se consideraban como las mejores prácticas. La nueva gerencia aeroportuaria empezó a comprender que utilizar medidas de desempeño, como en cualquier otra industria, les ayudaría a definir objetivos [73]; y por otro lado, el análisis comparativo del desempeño también les podría brindar información valiosa sobre cuestiones como, por ejemplo, cuál sería el mejor marco organizativo para un aeropuerto, si los aeropuertos operados como parte de redes o sistemas nacionales tendrían mejores resultados que los aeropuertos de forma autónoma o aislada, etc. [74].

Por lo tanto, nació por entonces, un reconocimiento creciente del valor de la evaluación continua del desempeño dentro de la industria aeroportuaria [75]. Por otro lado, y en cierta medida, esta necesidad de los operadores privados se transformó en una exigencia, debido a que los reguladores económicos (entes públicos) de los aeropuertos privatizados necesitaban (y necesitan hoy en día) que los aeropuertos utilizaran ciertos estándares para poder monitorear su desempeño y asegurar que los mismos funcionen eficientemente [76].

Y finalmente, fue importante la adopción de estándares de evaluación de rendimiento ya que, por lo general, la privatización de un aeropuerto implicaba, casi de forma inmediata, grandes inversiones de capital para la ampliación y modernización de las infraestructuras, con lo que los operadores debían recurrir (como lo hacen hoy día) al sector financiero. Y como es sabido, el sector financiero está, tradicionalmente, mucho más acostumbrado a usar índices financieros y otras técnicas de benchmarking, para identificar posibles oportunidades de negocios y asegurar que sus inversiones (ahora también aeroportuarias) elegidas tengan un buen desempeño [77].

Entonces, la primera tarea de las nuevas gerencias de los aeropuertos fue definir indicadores de rendimiento, o de actuación, de las muchas actividades que se realizan dentro de un aeropuerto. Ahora bien, esta incipiente práctica en una nueva industria (desde el punto de vista comercial) presentaba el problema de determinar o definir los indicadores específicos que fueran los más relevantes para el negocio aeroportuario, y que a la vez pudieran obtenerse de forma relativamente fácil [78]. Unos primeros estudios académicos, realizados sobre un conjunto de aeropuertos europeos, publicados a mediados de la década de 1980 Doganis y Graham [79] propusieron un conjunto de indicadores que quedaban agrupados en seis áreas de actuación del aeropuerto: a) actuación general de los costes, b) productividad de la mano de obra, c) productividad del capital empleado, d) actuación en la generación de ingresos, e) actuación en las actividades comerciales, y f) rentabilidad general.

Con el tiempo, a lo largo de estos últimos 25-30 años, estas primeras iniciativas fueron evolucionando, por lo que, por un lado, fueron naciendo otros indicadores y, por otro lado, éstos a su vez se fueron reagrupando en nuevas fórmulas y estructuras. Las propuestas no solo llegaban de la academia [75, 76, 80-82], sino también de las instituciones internacionales de la aviación civil y de la industria aeroportuaria. Por ejemplo, en 1986, el Comité de Transporte de la Organización de Aviación Civil Internacional OACI, decidió que la misma debía elaborar un manual relativo a los aspectos económicos de los aeropuertos. Por ello, en 1991 se publicó la primera edición del *Manual sobre los aspectos económicos de los aeropuertos*. En años posteriores la OACI consideró que era necesaria una revisión y actualización de dicho manual, lo que condujo a la edición dos nuevas versiones actualizadas, en los años 2006 (2da. edición) y 2013 (3ra. edición),

esta última vigente a la fecha [83]. El propósito de este manual era la de proporcionar orientación práctica a los Estados, a las entidades responsables de la gestión y la explotación de los aeropuertos y a las autoridades reguladoras y encargadas de la aplicación de los derechos, a fin de brindarles asistencia en la gestión eficiente de los aeropuertos y en la ejecución de las políticas de la OACI. En la última versión del manual [83], la OACI propuso agrupar los indicadores de rendimiento (que se generen y/o definan) en cuatro áreas clave de rendimiento (entre paréntesis el número de indicadores de rendimiento propuestos, asociados a cada área): a) seguridad operacional (5), b) calidad de los servicios (9), c) productividad (4), y d) eficacia en función de los costos (4). Asimismo, la OACI comprende, y acepta, que los Estados pueden generar además otras áreas clave de rendimiento según sus propios objetivos y circunstancias particulares.

Por otro lado, el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI, su acrónimo en inglés), que nace en el año 1991 como asociación representativa de los aeropuertos a nivel mundial, hoy en día referente destacado y de alta influencia en la industria aeroportuaria internacional, editó en el año 2006 *Airport Benchmarking to Maximize Efficiency* [84], con el cual ya se implicaba en la materia y generaba un soporte guía para la industria aeroportuaria.

Más tarde, en 2012, la ACI edita el manual-guía *Guide to Airport Performance Measures* [85], versión actualizada del documento editado en el 2006. ACI diseña esta guía para ayudar a los aeropuertos de todo el mundo en sus esfuerzos de gestionar su desempeño proporcionando un conjunto útil de indicadores de rendimiento, los cuales facilitan la comprensión de los factores que impulsan resultados particulares, permite identificar los tipos de aeropuertos donde el indicador es aplicable y facilita el análisis y debate de las fortalezas y debilidades de cada indicador como herramienta de evaluación comparativa. Los indicadores se agrupan en seis áreas clave de rendimiento.

Se propone entonces 42 indicadores de rendimiento distribuidas en las siguientes áreas claves de rendimiento (entre paréntesis el número de indicadores asociados): a) núcleo o principal (6), b) seguridad física y operacional (6), c) calidad del servicio (8), d) productividad y eficiencia (9), e) financiera y comercial (8), y f) medioambiente (6). En conclusión, durante la evolución de la industria aeroportuaria en las últimas tres décadas se ha verificado un aumento del énfasis en la evaluación del rendimiento de los diferentes aspectos de la gestión aeroportuaria, y los aeropuertos a nivel mundial han ido adoptado varios marcos de medición del rendimiento, en función de sus propias características.

4.3 Impacto del Covid-19 en el transporte aéreo

El lapso entre marzo de 2020 y marzo de 2021 marcó el final de una década de crecimiento constante en el tráfico mundial de pasajeros. La pandemia de Covid-19, aún en curso, detuvo prácticamente la operación de los aeropuertos de casi todo el mundo gran parte del año 2020, lo que provocó pérdidas de tráfico e ingresos (tanto para aeropuertos como líneas aéreas) en todas las regiones del mundo. A continuación, se presentan algunas cifras del relevantes sobre el fuerte impacto de la pandemia sobre la industria mundial de la aviación [1, 86, 87]:

- En comparación con el nivel de tráfico de pasajeros totales (nacionales más internacionales) del 2019, la disminución, a nivel mundial, registra una media de 63,3%, lo que implica aproximadamente 2.700 millones de pasajeros menos (que no viajaron en 2020); y para el año 2021, las estimaciones indican una pérdida estimada de tráfico de pasajeros del orden 41%-49% (1.800-2.200 millones de pasajeros menos) con respecto al año 2019. La región de América Latina-Caribe registró una disminución del tráfico total de pasajeros del 59,8% en comparación con el nivel de 2019. Y en el caso particular de Colombia, la caída del tráfico de pasajeros en 2020, con respecto al 2019, fue del 82,5% [88].
- Se estima que, a nivel mundial, los aeropuertos sufrieron una caída de sus ingresos brutos del orden de 66,3% (125 mil millones USD) en el año 2020 y estiman una caída del 50% (94 mil millones USD) para el 2021, todo ello con respecto a cifras del 2019. Para el caso de América Latina-Caribe, la caída de ingresos en 2020 fue de un 61,1% (7.000 millones USD) y se estima una caída del 48,8% (5.900 millones USD) para el 2021, todo ello con respecto al 2019.

- Pérdida de ingresos operativos brutos (por pasajeros) de aerolíneas a nivel mundial: aprox. 371 mil millones USD en el año 2020, y entre 278 y 327 mil millones USD en el año 2021 (estimado), todo ello con respecto al año 2019.
- Finalmente, aunque no menos importante, la crisis de Covid-19 ha provocado la pérdida de 46 millones de empleos (directos, indirectos e inducidos) en la industria de la aviación (a nivel mundial), así como una reducción de 1,8 billones USD en la actividad económica respaldada por la aviación [89].

Bajo este sombrío panorama los aeropuertos y las aerolíneas están unidos en el llamado a los gobiernos para que se asocien con la industria del transporte aéreo para prepararse para reiniciar la conectividad global en cuanto la situación epidemiológica lo permita [86].

En lo que refiere exclusivamente al sector de las líneas aéreas, por un lado, desde el año pasado (2020) muchos gobiernos vienen implementando ayudas económicas o paquetes de alivio financiero a sus empresas aéreas locales [90]; y, por otro lado, los operadores aéreos vienen desarrollando estrategias comerciales y operacionales con el objetivo a mitigar el duro impacto de la pandemia, tanto para el presente (desde el inicio de la pandemia) como para el corto y medio plazo [91-95].

4.4 Acciones y estrategias de los aeropuertos para la pos-pandemia

4.4.1 Estrategias financieras

El impacto financiero en los aeropuertos es enorme y se necesitarán varios años para recuperar lo que se perdió durante el período de inactividad del Covid-19. Con la situación actual, la atención se centra en lo que esto significa para el planificador operativo del aeropuerto, tanto a corto como a medio-largo plazo. Para los gastos de capital CAPEX se supone que se pospondrán o incluso se eliminarán múltiples inversiones en infraestructura. A corto plazo, lo más probable es que la necesidad de inversiones sea limitada, ya que el tráfico es menor que antes de Covid-19. A medida que los niveles de tráfico regresen a sus niveles anteriores a Covid-19, se espera que los presupuestos de CAPEX continúen siendo afectados por Covid-19. A más largo plazo, esto significa que la infraestructura disponible actual debe durar más, lo que impulsa la necesidad de optimización.

Para los gastos operativos OPEX el principal desafío a corto plazo será equilibrar los costos con una demanda en desarrollo inestable, es más, se espera que los aeropuertos se concentren en reducir aún más los costos OPEX. En definitiva, la pandemia del Covid-19 es una oportunidad única para que los aeropuertos adapten su operación actual con un enfoque en procesos y planificación mejorados y podría facilitar el cambio de esfuerzo de gestión [96].

4.4.2 Estrategias de marketing aeroportuario

Cuando esta crisis sin precedentes llegue a su fin, el mayor error que podrían cometer los aeropuertos es manejar la crisis de liquidación de efectivo en lugar de planificar y convertir el negocio en una nueva normalidad. Será de suma importancia que los aeropuertos sean más proactivos, capaces de mejorar la transformación digital en el sentido organizativo y comercial, así como de reposicionarse en las industrias de la aviación global. El crecimiento de rutas, la captación de nuevos clientes de aerolíneas, el mantenimiento e incremento con el cliente actual, así como la actualización y ejecución de la estrategia de expansión de rutas, jugarán un papel fundamental en el entorno poscrisis [97].

4.4.3 Estrategia comercial (para potenciar los ingresos no aeronáuticos)

Los aeropuertos pueden aumentar directamente los ingresos no aeronáuticos mejorando los servicios y aumentando la satisfacción general del viaje del cliente. De hecho, la ejecución del servicio al cliente es fundamental, porque la mejor manera de aumentar los ingresos no aeronáuticos es aumentar la satisfacción del cliente. Esto incluye la capacidad del aeropuerto para reconocer el perfil de un nuevo cliente potencial. Para impulsar el proceso general, es posible que el operador del aeropuerto deba gastar más en

herramientas analíticas de clientes para identificar y comprender su perfil de pasajero a fin de personalizar la experiencia individual del cliente. Más importante aún, en el sentido de flujo de caja y ventas del aeropuerto, es vital que los operadores del aeropuerto atraigan la combinación correcta de minoristas, así como otras concesiones en el mercado no aeronáutico. Esto implica no solo formular un contrato de concesión (de tiendas del aeropuerto) para aumentar los ingresos netos de las operaciones comerciales, sino también trabajar en estrecha colaboración con estas concesiones para lograr mutuamente el objetivo final de optimizar la experiencia general del cliente [97, 98].

4.4.4 Estrategia de tarifas (tasas aeronáuticas)

Las tasas aeronáuticas son aquellas que el aeropuerto cobra a la línea aérea cada vez que un avión aterriza, usa la pista, el campo de vuelo, el área de maniobra, y la plataforma para estacionar, recibir servicios (*handling*), desembarcar y embarcar pasajeros. Estas tasas constituyen el grueso de los ingresos aeronáuticos de un aeropuerto, principal fuente de ingreso de los mismos [89]. Entonces. En la situación pandémica actual, bajo la cual se está empezando a recuperar la demanda, pero muy lentamente, existen dos enfoques o posicionamientos en lo que al precio de las tarifas (o tasas aeronáuticas) se refiere. Una posición es que los precios de las tarifas se mantengan bajos (o con descuentos) durante el período de crisis, y que puedan volver a subir una vez pasada la crisis y la demanda se haya recuperado.

Mantener los precios bajos será útil para aumentar la viabilidad de las aerolíneas y el turismo, y permitirá cosechar los beneficios económicos más amplios del transporte aéreo, como la conectividad. Ahora bien, esta fórmula podría ser viable para un aeropuerto de gobernanza pública, el cual de seguro ya está en cierta medida subvencionado por el gobierno en esta época de crisis, y una vez pasada la misma es factible que aumente los precios, incluso a niveles superiores a época pre-pandémica. Sin embargo, existe un problema real para los aeropuertos concesionados al sector privado: generarán pérdidas durante la crisis, pero difícilmente tendrán la capacidad de aumentar los precios (fuertemente limitados por el ente regulador del país) y los ingresos en el período posterior a la crisis. Otra posición, muy diferente en el tema tarifario, es aquel que se opone firmemente tanto de una suspensión general de las tasas aeronáuticas [99] como también a una reducción temporalmente de las mismas [100].

Al parecer, la única forma de que los precios o tasas aeronáuticas se mantuvieran bajas durante la pandemia y pos-pandemia (al menos en el corto plazo), y en todos los aeropuertos, independientemente de su propiedad o gobernanza, sería con la asistencia / ayuda financiera del gobierno. Hay razones legítimas para la asistencia gubernamental a los aeropuertos durante la crisis y postcrisis, al ayudar a los aeropuertos, el gobierno no solo apoyará el transporte aéreo, sino también a otras industrias relacionadas, principalmente el turismo, y, por lo tanto, los beneficios económicos derivados serán amplios.

4.4.5 Gestionar con el Estado ayudas financieras

En esta situación excepcional los aeropuertos necesitan el apoyo financiero de sus gobiernos. Según un estudio desarrollado por ALG Transport & Infrastructure [101], los gobiernos deberían iniciar lo antes posible una serie de medidas que serán necesarias para garantizar la sostenibilidad de las operaciones aeroportuarias. Algunas de las medidas propuestas serían las siguientes: a) proporcionar medidas de alivio económico, financiero y fiscal; b) renunciar al canon (o cuotas) de los aeropuertos de concesionados, como así también de impuestos y otros tipos de cargas o gravámenes; y c) suspensión de la regla de franjas horarias (*s/ots*) 80/20 por un período limitado.

4.4.6 Renegociar el contrato de concesión del aeropuerto

Muchos países tienen sus aeropuertos concesionados a operadores privados, como por ejemplo en Latinoamérica (donde casi todos los países de la región tienen sus principales aeropuertos concesionados al sector privado), entonces, una posibilidad es gestionar la compensación financiera para reequilibrar concesiones, ya sea monetarias o en forma de cambio de condiciones en los contratos de concesión, temporal o perpetuamente. La renegociación del canon de concesión, así como la negociación de prórrogas de contrato que se estipulaban en contrato, se presenta más que oportuno en esta época de crisis, si bien

requieren un fuerte empuje institucional, pueden apoyar a un operador en el corto y medio plazo para restablecer el negocio aeroportuario [96].

4.4.7 Optimizar las relaciones contractuales con los concesionarios del edificio terminal de pasajeros

La mayoría de las tiendas comerciales en el edificio terminal de pasajeros (conocidas como concesiones del terminal) trabajan bajo un esquema de pago variable en base a las ventas, con una Garantía Mínima Anual MAG que asegura el cobro, por parte del aeropuerto, de un mínimo independientemente de las ventas. En este momento, con el tráfico de pasajeros muy bajo (aunque en vías de recuperación), los contratos deben revisarse meticulosamente para detectar posibles mejoras durante el período de recuperación que aseguren la relación a largo plazo con los grandes minoristas (tiendas comerciales) del terminal. Para un aeropuerto es vital intentar mantener o retener estas concesiones del terminal, ya que son la principal fuente de ingresos no aeronáuticos (comerciales) del aeropuerto [96, 98].

5. CONCLUSIONES

Las presiones competitivas, la liberalización aerocomercial y la creciente demanda de transporte aéreo han generado nuevos desafíos para la industria aeroportuaria, principalmente en la gestión / gobernanza de los mismos. Este entorno tan dinámico de la industria y del mercado, ha motivado (sino obligado) a que la industria aeroportuaria elabore nuevas estrategias para hacer frente a este entorno, y ello ha dado comienzo por cómo se gestionan los aeropuertos. Esta transformación se llevó a cabo en dos etapas, una primera conceptual, dotando al aeropuerto de enfoque más de negocio (etapa de comercialización); y una segunda etapa, más extrema, transfiriendo la total gestión del aeropuerto al sector privado, vía diferentes fórmulas de privatización.

Luego, en casi tres décadas, las gerencias de los aeropuertos privatizados diseñaron e implementaron (previa adaptación a sus propias particularidades) estándares extensa y exitosamente desarrollados en empresas comerciales de otras industrias mucho más maduras que la aeroportuaria. Además del desarrollo de estrategias comerciales, que sin lugar a dudas fue algo innovador en la industria aeroportuaria, se puede afirmar que el mayor desafío de las nuevas gerencias privadas fue la de desarrollar e implementar indicadores de rendimiento, y luego la realización de las correspondientes evaluaciones comparativas, única forma de medir la eficiencia de un aeropuerto. Considerando la importancia de este factor, la OACI y la ACI recomendaron ciertos estándares, para que el sector aeroportuario los utilizara como guías en el diseño e implantación de sus indicadores.

Paralelamente, se ha visto como la comercialización y privatización de aeropuertos, en combinación con la desregulación aerocomercial desarrollada en muchos países, ha introducido situaciones de competencia entre aeropuertos (algo completamente inexistentes hace solo 15-20 años). Esto a su vez ha significado que potencialmente puede haber mayores oportunidades para que los aeropuertos desarrollen nuevas estrategias para obtener ventajas competitivas.

Finalmente, el impacto de la actual pandemia global debida al Covid-19 sobre el sector aeroportuario merece ciertas reflexiones. Con la incertidumbre que genera Covid-19 en la industria de la aviación, las organizaciones deben reevaluar los diferentes escenarios que pueden ocurrir y garantizar que se puedan mantener operaciones aeroportuarias sostenibles y seguras. Los aeropuertos enfrentan, y enfrentarán al muy corto plazo, problemas tales como menos pasajeros, costosas regulaciones de salud, y aerolíneas y arrendatarios (concesiones del edificio terminal de pasajeros) que no pagan sus facturas a tiempo.

Para la sostenibilidad financiera, los aeropuertos deben retrasar los gastos no esenciales, detener la contratación no crítica, coordinar con los proveedores para encontrar soluciones de ahorro de costos, reducir o detener los contratos no esenciales, cerrar o reducir las áreas no operativas y subcontratar servicios no básicos. Apoyar el negocio aeroportuario a largo plazo es la clave para garantizar la supervivencia de la organización. Se aconseja transformar la organización para hacer frente a respuestas rápidas a la demanda que surge en el corto plazo. En definitiva, el operador del aeropuerto deberá considerar estrategias que maximicen el negocio a corto y medio plazo. Por último, los aeropuertos que

sigan siendo resistentes con estrategias sostenibles podrán ofrecer una variedad más amplia de bienes y servicios a los viajeros aéreos. Los aeropuertos exitosos también aprenderán de la crisis actual diversificándose y recurriendo a los ingresos no relacionados con los pasajeros para compensar la disminución del tráfico aéreo.

REFERENCIAS

- [1] ICAO. *Effects of Novel Coronavirus (Covid-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*, Montreal: ICAO, 2021.
- [2] Doganis, R. *The Airline Business*. New York: Routledge, 2006.
- [3] Graham, A. *Managing airports. An international perspective*. New York: Routledge, 2014.
- [4] Wittmer, A. and Bieger, T. and Müller, R. *Aviation Systems. Management of the integrated aviation value chain*, Berlin: Springer-Verlag, 2011.
- [5] World Bank. *Private Participation in Infrastructure Database*, Washington, D.C.: World Bank, 2017.
- [6] Halpern, N. and Graham, A. *Airport Marketing*, New York: Routledge, 2013.
- [7] Díaz Olariaga, O. Análisis de la evolución de las políticas públicas y de regulación en la industria aeroportuaria en Colombia," *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal*, vol. 26, pp. 7-42, 2016.
- [8] Levine, M.E. "Why weren't the airlines reregulated? *Yale Journal on Regulation*, vol. 23, pp. 269-297, 2006.
- [9] Winston, C. and Peltzman, S. *Deregulation of Network Industries: What's Next?* Washington, D.C.: AEI Brookings Joint Center for Regulatory Studies, 2000.
- [10] Morrison, S. and Winston, C. *The Evolution of the Airline Industry*, Washington, D.C.: Brookings Institution, 1995.
- [11] Burghouwt, G. and de Wit, J.G. In the wake of liberalisation: long-term developments in the EU air transport market, *Transport Policy*, vol. 43, pp. 104-113, 2015.
- [12] Dobruszkes, F. Does liberalization of air transport imply increasing competition? Lessons from the European case, *Transport Policy*, vol. 16, pp. 29-39, 2009.
- [13] Vogel, H.A. Impact of privatisation on the financial and economic performance of European airports, *Aeronautical Journal*, vol. 110, pp. 197-213, 2006.
- [14] Williams, G. *Airline competition: deregulation's mixed legacy*, Aldershot: Ashgate, 2002.
- [15] Williams, G. *The airline industry and the impact of deregulation*, Aldershot: Ashgate, 1994.
- [16] Thompson, I.B. (2002). Air transport liberalization and the development of third level airports in France, *Journal of Transport Geography*, vol. 10, pp. 273-285, 2002.
- [17] Goetz, A.R. and Vowles, T.M. The good, the bad, and the ugly: 30 years of US airline deregulation, *Journal of Transport Geography*, vol. 17, pp. 251-263, 2009.
- [18] CAF. *Estudio Analítico sobre la Integración del Transporte Aéreo en América del Sur*, Caracas: Corporación Andina de Fomento-CAF, 2006.
- [19] Dozo, F.E. La desregulación aérea. Implicaciones para América Latina, *Integración Latinoamericana*, vol. 143, pp. 29-41, 1989.
- [20] Vásquez, E. Efectos de la política de desreglamentación del transporte aéreo de los Estados Unidos en Iberoamérica, *Jurídica*, vol. 19, pp. 141-154, 1998.
- [21] Gerber, P. Success factors for the privatisation of airports - an airline perspective, *Journal of Air Transport Management*, vol. 8, pp. 29-36, 2002.
- [22] Humphreys, I., Ison, S. and Francis, G. UK airport policy: does the government have any influence, *Public Money and Management*, vol. 27, pp. 339-343, 2007.
- [23] Francis, G. and Humphreys, I. Airport regulation: reflecting on the lessons of BAA plc. *Public Money and Management*, vol. 21, pp. 49-52, 2001.
- [24] Gillen, D. The evolution of airport ownership and governance, *J. of Air Trans. Management*, vol. 17, pp. 3-13, 2001.
- [25] Gillen, D. and Niemeier, H.M. The European Union: evolution of privatization, regulation, and slot reform, In: Winston, C. and de Rus, G. (Eds.), *Aviation Infrastructure Performance: A Study in Comparative Political Economy*, Washington D.C.: Brookings Institution Press, 2008, pp. 36-63.
- [26] Oum, T.H., Yu, C. and Fu, X. A comparative analysis of productivity performance of the world's major airports: summary report of the ATRS global airport benchmarking research report-2002," *Journal of Air Transport Management*, vol. 9, pp. 285-297, 2003.
- [27] Doganis, R. *The Airport Business*, London: Routledge, 1992.
- [28] Jimenez, E., Claro, J. and Pinho de Sousa, J. The Airport Business in a Competitive Environment, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 947-954, 2014.
- [29] Czerny, A. Public versus private airport behavior when concession revenues exist, *Economics of Transportation*, vol. 2, pp. 38-46, 2013.
- [30] Ison, S., Francis, G., Humphreys, I. and Page, R. UK regional airport commercialization and privatisation: 25 years on, *Journal of Transport Geography*, vol. 19, pp. 1341-1349, 2011.
- [31] Frank, L. Business models for airports in a competitive environment. One sky, different stories, *Research in Transportation Business & Management*, vol. 1, pp. 25-35, 2011.

- [32] Jackson, P.M. and Price, C.P. *Privatization and regulation*, New York: Longman, 2007.
- [33] Fasone, V., Kofler, L. and Scuderi, R. Business performance of airports: Non-aviation revenues and their determinants. *Journal of Air Transport Management*, vol. 53, pp. 35-45, 2016.
- [34] Díaz Olariaga, O. Desarrollo reciente y relevancia actual de los ingresos comerciales aeroportuarios, *Estudios Gerenciales*, vol. 31, pp. 393-402, 2015.
- [35] Kratzsch, U. and Sieg, G. Non-aviation revenues and their implications for airport regulation, *Transportation Research Part E*, vol. 47, pp. 755-763, 2011.
- [36] Graham, A. How important are commercial revenues to today's airports? *Journal of Air Transport Management*, vol. 15, pp. 106-111, 2009.
- [37] Gong, S.X.H., Cullinane, K. and Firth, M. The impact of airport and seaport privatization on efficiency and performance: A review of the international evidence and implications for developing countries, *Transport Policy*, vol. 24, pp- 37-47, 2012.
- [38] Winston, C. and de Rus, G. *Aviation Infrastructure Performance*, Washington, DC: Brooking Institution Press, 2008.
- [39] Oum, T., Adler, N. and Yu, C. Privatization, corporatization, ownership forms and their effects on the performance of the world's major airports, *Journal of Air Transport Management*, vol. 12, pp. 109-121, 2006.
- [40] Belobaba, P., Odoni, A. and Barnhart, C. *The global airline industry*, Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [41] de Neufville, R. and Odoni, A. *Airport Systems. Planning, Design, and Management*, New York: McGraw-Hill, 2013.
- [42] Wells, A. and Young, S. *Airport planning and management*, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [43] Hussain, M. *Investment in air transport infrastructure*, Washington DC: The World Bank, 2010.
- [44] Ashford, N. and Moore, C. *Airport Finance*, Loughborough: Loughborough Airport Consultancy, 1999.
- [45] Freathy, P. and O'Connell, F. *European Airport Retailing*, London: Macmillan, 1998.
- [46] Hamzawi, S. Lack of airport capacity: Exploration of alternative solutions, *Transportation Research Part A*, vol. 26, pp. 47-58, 1992.
- [47] Forsyth, P., Gillen, D., Müller, J. and Niemeier, H-M. *Airport Competition*. Farnham: Ashgate Publishing Limited, 2010.
- [48] OACI. *Convenio sobre la aviación civil internacional*. Montreal: OACI, 1980.
- [49] US DoT - US Department of Transportation. *Airport quotas and peak hours pricing: theory and practice*, Washington D.C.: US DoT, 1976.
- [50] ICAO. *Charges for Airports and Route Air Navigation Facilities*, Montreal: ICAO, 1974.
- [51] OACI. *Políticas de la OACI sobre derechos aeroportuarios y por servicios de navegación aérea*, OACI, 2012.
- [52] Pels, E. and Verhoef, E. The economics of airport congestion pricing, *Journal of Urban Economics*, vol. 55, pp. 257-277, 2003.
- [53] Daniel J. and Pahwa, M. Comparison of Three Empirical Models of Airport Congestion Pricing, *Journal of Urban Economics*, vol. 47, pp. 1-38, 2000.
- [54] Czerny, A., Forsyth, P., Gillen, D. and Niemeier, H.-M. *Airport slots: International Experiences and Options for Reform*, Farnham: Ashgate, 2008.
- [55] Boyfield, K., Starkie, D., Bass, T. and Humphreys, B. *A Market in Airport Slots*, London: The Institute of Economic Affairs, 2003.
- [56] Starkie, D. Allocating airport slots: a role for the market? *Journal of Air Transport Management*, vol. 4, pp. 111-116, 1998.
- [57] Díaz Olariaga, O. y Benito, A. Alternativas de mercado en la asignación de slots aeroportuarios, *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, vol. 396, pp. 2-11, 2010.
- [58] Díaz Olariaga, O. Soluciones de mercado al problema de la congestión aeroportuaria, *Estudios de Construcción y Transportes*, vol. 113, pp. 23-34, 2010.
- [59] Mathews, B. and Menaz, B. Airport capacity: the problem of slot allocation, *Working Paper*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2003.
- [60] Czerny, A. and Tegner, H. Secondary markets for runway capacity," Second Seminar of the IMPRINT-EUROPE, Brussels, 2002.
- [61] CAA. *The Implementation of Secondary Slot Trading*, London: Civil Aviation Authority, 2001.
- [62] Brueckner, J. Internalisation of Airport Congestion, *J. of Air Transport Management*, vol. 8, pp. 141-147, 2002.
- [63] Daniel, J. Distributional Consequences of Airport Congestion Pricing, *Journal of Urban Economics*, vol. 50, pp. 230-258, 2001.
- [64] Daniel, J. (1995). Congestion Pricing and Capacity of Large-Hub Airports: A Bottleneck Model with Stochastic Queues. *Econometrica*, 63, 327-370.
- [65] Caves, R. and Gosling, G. *Strategic Airport Planning*, Oxford: Elsevier Science, 1999.
- [66] Jarach, D. *Airport Marketing: Strategies to Cope with the New Millennium Environment*, Farnham: Ashgate, 2005.
- [67] Edwards, B. *The Modern Airport Terminal*, New York: Spon Press, 2005.
- [68] Kazda, A. and Caves, R. *Airport design and operation*, Bingley: Emerald, 2015.
- [69] van Oel, C. and van den Berkhof, F. Consumer preferences in the design of airport passenger areas *Journal of Environmental Psychology*, vol. 36, pp. 280-290, 2013.

- [70] Kramer, L., Fowler, P., Hazel, R., Ureksoy, M. and Harig, G. *ACRP Report 28: Marketing Guidebook for Small Airports*, Washington D.C.: Transportation Research Board, 2010.
- [71] Jarach, D. The evolution of airport management practices: towards a multi-point, multi-service, marketing-driven firm, *Journal of Air Transport Management*, vol. 7, pp. 119-125, 2001.
- [72] Freathy, P. and O'Connell, F. Market segmentation in the European airport sector, *Marketing Intelligence & Planning*, vol. 18, pp. 102-111, 2000.
- [73] Seneviratne, P. and Martel, N. Variables influencing performance of air terminal buildings, *Transportation Planning and Technology*, vol. 16, pp. 3-28, 1991.
- [74] Zografos, K., Andreatta, G. and Odoni, A. *Modelling and managing airport performance*, Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
- [75] Hooper, P.G. and Hensher, D.A. Measuring total factor productivity of airports and index number approach, *Transportation Research Part E*, vol. 33, pp. 249-259, 1997.
- [76] Humphreys, I. and Francis, G. Performance measurement: a review of airports, *International Journal of Transport Management*, vol. 1, pp. 79-85, 2002.
- [77] Graham, A. and Morrell, P. *Airport Finance and Investment in the Global Economy*, New York: Routledge, 2016.
- [78] Lemer, A. Measuring performance of airport passenger terminals, *Transportation Research Part A*, vol. 26, pp. 37-45, 1992.
- [79] Doganis, R. and Graham, A. *Airport Management: The Role of Performance Indicators*, London: Transport Studies Group, Polytechnic of Central London, 1987.
- [80] Graham, A. Airport benchmarking: a review of the current situation, *Benchmarking: An International Journal*, vol.12, pp. 99-111, 2005.
- [81] Francis, G., Hinton, C., Holloway, J. and Humphreys, I. Best practice benchmarking a route to competitiveness? *Journal of Air Transport Management*, vol. 5, pp. 105-112, 1999.
- [82] Park, Y. A methodology for establishing operational standards of airport passenger terminals, *Journal of Air Transport Management*, vol. 5, pp. 73-80, 1999.
- [83] OACI. *Manual sobre los aspectos económicos de los aeropuertos*. Montreal: OACI, 2013.
- [84] ACI. *Airport Benchmarking to Maximize Efficiency*, Montreal: Airport Council International-ACI, 2006.
- [85] ACI. *Guide to Airport Performance Measures*, Montreal: Airport Council International-ACI, 2012.
- [86] ACI. *The impact of Covid-19 on the airport business and the path to recovery*, Montreal: ACI, 2021.
- [87] IATA. *Air Passenger Market Analysis*, Geneva: IATA Economics, 2021.
- [88] Aerocivil. Estadísticas. Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co>, 2021
- [89] ATAG. *Aviation: Benefits Beyond Borders*, Geneva: Air Transport Action Group, 2020
- [90] Abate, M., Christidis, P. and Purwanto, A. Government support to airlines in the aftermath of the Covid-19 pandemic, *Journal of Air Transport Management*, vol. 89, 101931, 2020.
- [91] Akbar, Y. and Kisilowski, M. To bargain or not to bargain: Airlines, legitimacy and nonmarket strategy in a Covid-19 world, *Journal of Air Transport Management*, vol. 88, 101867, 2020.
- [92] Albers, S. and Rundshagen, V. European airlines' strategic responses to the Covid-19 pandemic (January-May, 2020), *Journal of Air Transport Management*, vol. 87, 101863, 2020.
- [93] Amoah, J. Note: Mayday, Mayday, Mayday! Responding to environmental shocks: Insights on global airlines' responses to Covid-19 *Transportation Research Part E*, vol. 143, 102098, 2020.
- [94] Budd, L., Ison, S. and Adrienne, N. European airline response to the Covid-19 pandemic – Contraction, consolidation and future considerations for airline business and management, *Research in Transportation Business & Management*. 2021.
- [95] Linden, E. Pandemics and environmental shocks: What aviation managers should learn from Covid-19 for long-term planning, *Journal of Air Transport Management*, vol. 90, 101944, 2021.
- [96] Forsyth, P., Guiomard, C. and Niemeier, H. Covid-19, the collapse in passenger demand and airport charges, *Journal of Air Transport Management*, vol. 89, 101932, 2020.
- [97] Choi, J. Changes in airport operating procedures and implications for airport strategies post-Covid-19, *Journal of Air Transport Management*, vol. 94, 102065, 2021.
- [98] Serrano, F. and Kazda, A. The future of airports post Covid-19, *Journal of Air Transport Management*, vol. 89, 101900, 2020.
- [99] ACI World. *Covid-19: Relief Measures to Ensure the Survival of the Airport Industry*, Montreal: ACI, 2020.
- [100] ACI Europe. Off the Ground. Pricing of aeronautical services during the recovery, *Working paper*. Brussels: ACI, 2020.
- [101] ALG Transport & Infrastructure. *Aviation. Covid-19 Briefing*. Recuperado: <https://algnewsletter.com/wp-content/uploads/2020/04/Aviation-Covid-19-LAC-by-ALG.pdf>, 2020.

Utilización de algoritmos de redes neuronales artificiales en el pronóstico de la demanda de pasajeros aéreos

Juan Gerardo Muros Anguita¹

Oscar Díaz Olariaga²

¹ *Universidad de Granada*
España

² *Universidad Santo Tomás*
Colombia

La planificación aeroportuaria, ya sea de un único aeropuerto, de un sistema o de una red de varios aeropuertos, depende en gran medida de los niveles de actividad que se prevén para el futuro. Para planificar las instalaciones e infraestructuras de un sistema aeroportuario y satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda. En el presente trabajo se realiza un pronóstico, a corto y medio plazo, de la demanda de pasajeros aéreos, aplicado al caso de estudio concreto Colombia, donde se tuvo en cuenta el impacto en el tráfico aéreo del periodo pandémico debido al Covid-19. Para realizar el pronóstico se desarrolló un algoritmo que implementa técnicas basadas en Artificial Neural Network ANN y Machine Learning ML. En particular, para el análisis de las series temporales disponibles se aplican técnicas de redes codificadoras-decodificadoras del tipo ConvLSTM2D. Estas arquitecturas son un híbrido entre las redes neuronales convolucionales CNN, muy útiles para la extracción de patrones invariantes en su posición espacial, y las redes neuronales recurrentes RNN, apropiadas para la extracción de patrones dentro de su contexto temporal. De entre los resultados más relevantes se puede mencionar que la recuperación de la demanda (volumen y tendencia) a época pre-pandémica, en el caso de estudio, se prevé para el periodo comprendido entre finales de 2022 y principios de 2024 (según el tipo de tráfico). Finalmente, la aplicación de modelo basado en ANN/ML presenta valores Mean Absolute Percentage Error MAPE del orden del 3% al 9% (según el escenario), lo que posibilita predicciones de relativa precisión e introduce un nuevo modelo alternativo para desarrollar pronósticos confiables de tráfico aéreo, al menos a corto y medio plazo.

¹ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: e.juangerardo@go.ugr.es

² Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los planes para el desarrollo de los distintos componentes del sistema aeroportuario dependen en gran medida de los niveles de actividad que se prevén para el futuro. Para planificar las instalaciones e infraestructuras de un aeropuerto, o sistema/conjunto de aeropuertos, y poder satisfacer las necesidades futuras, es esencial predecir el nivel y la distribución de la demanda en los diversos componentes del sistema aeroportuario [1]. Pronosticar la demanda en una industria tan dinámica y sensible a factores exógenos como la aviación es una tarea extremadamente difícil. No obstante, es necesario realizar estimaciones de tráfico aéreo como paso previo a la planificación y diseño de las instalaciones aeroportuarias, ya sea de un aeropuerto o de un sistema o red aeroportuaria [2, 3].

La comprensión de los patrones de demanda futuros permite al planificador aeroportuario evaluar el desempeño futuro del aeropuerto y con ello recomendar programas de desarrollo consistentes para estimar los costos asociados con estos planes de desarrollo y para proyectar las fuentes y el nivel de ingresos para respaldar las inversiones de capital a realizar [4]. El pronóstico de la demanda es un requisito básico para desarrollar un plan maestro de aeropuerto o un plan de sistema aeroportuario a nivel regional o nacional, entendiendo con ello toda la red aeroportuaria de una región o país [5-7].

Para evaluar las características de la demanda futura, es necesario el desarrollo de predicciones fiables de la actividad aeroportuaria. Existen numerosos factores que afectarán la demanda y los planificadores que preparan pronósticos de demanda, o actualizan los pronósticos existentes deben contemplar, además de los datos históricos aeronáuticos (tráfico aéreo), datos (series históricas) socioeconómicas locales, como riqueza nacional, poder adquisitivo de los habitantes, demografía (población), producción industrial, índice de precios al consumidor, tasa de cambio (de la moneda local con respecto al dólar USA), etc., ya que estos indicadores tienen una gran influencia en el comportamiento de la demanda de tráfico aéreo [2, 8-10].

Finalmente, la experiencia práctica demuestra que los pronósticos de tráfico aéreo no suelen ser precisos cuando las previsiones se realizan a largo (15-20 años) o muy largo plazo (25-30 años), pero inexorablemente las previsiones a corto y medio plazo (entre 5 y 15 años) son importantes para el planificador y/o tomador de decisión, ya que comprenden un periodo habitual de planificación aeroportuaria (o de un sistema/red aeroportuaria) [11-13].

En otro orden, en lo que concierne a las metodologías utilizadas para la realización de pronósticos, los académicos vienen presentando estudios e investigaciones formales desde hace aproximadamente tres décadas. En este tiempo se han desarrollado una diversidad de modelos para pronosticar la demanda de pasajeros, muchos de los métodos de predicción más utilizados se pueden aunar en dos grandes grupos: modelos económicos y modelos de series temporales [14]. Los métodos económicos se centran en la correlación entre la demanda de pasajeros y múltiples variables, como la influencia de los cambios en el entorno económico y el sistema de tráfico, y luego los modelos de pronóstico se establecen mediante una serie de ecuaciones.

Los modelos comúnmente utilizados incluyen análisis de regresión [15], prueba de causalidad [16], modelo logit [17], y modelo de gravedad [18]. Los métodos de series temporales se basan principalmente en datos históricos para predecir mediante la extracción de la relación intrínseca entre los datos actuales y las series de observaciones pasadas. Los diversos modelos de series temporales se han utilizado para pronosticar la demanda de pasajeros, como las técnicas de suavizado [19], el modelo de Markov adaptado [20], ARIMA / SARIMA [21], método de ajuste estacional [22], etc.

Ahora bien, debido a la característica no lineal de la demanda de pasajeros aéreos, los enfoques económicos y de series temporales se critican severamente debido a su capacidad de pronóstico efectiva muy limitada y pobre [21]. Por ello algunos académicos intentan explorar otras metodologías para el pronóstico, como Dynamic Linear Models DLM [8] que con respecto a las metodologías habituales de cálculo de pronóstico presenta las siguientes ventajas: detecta tendencias estocásticas que se encuentran ocultas en las series de tiempo [23] así como la detección de cambios estructurales que permiten estimar el efecto variable en el tiempo de choques exógenos sin aumentar el número de parámetros [24]; adicionalmente, la estructura de

independencia condicional sobre la que se basa la dinámica del estado permite considerar predicciones considerando un algoritmo recursivo [25]. Otro planteamiento que se ha utilizado para el pronóstico de demanda de pasajeros aéreos es el Dinámica de Sistemas [26-28]; Dinámica de Sistemas incorpora un conjunto de herramientas que permiten comprender entornos complejos, utiliza herramientas como diagramas de causalidad, fomentando el pensamiento sistémico entre los gestores de procesos, captura la complejidad dinámica de un sistema dado y proporciona la ventaja considerable de simular el modelo para evaluar los resultados de interacción variable y anticipar los efectos colaterales a largo plazo de las políticas antes de su implementación.

Finalmente, se está utilizando, y desde ya hace varios años, metodologías basadas en redes neuronales artificiales ANN. Varias características distintivas de las ANN las hacen relevantes para un cálculo de pronóstico, a saber [29-31]:

1. A diferencia de los métodos tradicionales las ANN son métodos auto-adaptativos basados en datos en el sentido de que existen pocas suposiciones a priori sobre los modelos para los problemas en estudio. Aprenden de los ejemplos y capturan relaciones funcionales sutiles entre los datos, incluso si las relaciones subyacentes son desconocidas o difíciles de describir. Por tanto, las ANN son adecuadas para problemas cuyas soluciones requieren conocimientos que es difícil de especificar, pero para los que hay suficientes datos u observaciones. En este sentido, pueden tratarse como uno de los métodos estadísticos multivariados no lineales no paramétricos.
2. Las ANN pueden generalizar, es decir, después de conocer los datos que se les presentan, las ANN a menudo pueden inferir correctamente la parte invisible de una población, incluso si los datos de la muestra contienen información ruidosa.
3. Las ANN son aproximadores funcionales universales, se ha demostrado que una red puede aproximar cualquier función continua con cualquier precisión deseada. Las ANN tienen formas funcionales más generales y flexibles (que las que de los métodos estadísticos tradicionales) que pueden manejar eficazmente.
4. Finalmente, las ANN no son lineales, la predicción ha sido durante mucho tiempo el dominio de las estadísticas lineales. Los enfoques tradicionales de la predicción de series de tiempo, como el método de Box-Jenkins o ARIMA, asumen que las series de tiempo en estudio se generan a partir de procesos lineales.

Pero no es razonable suponer, a priori, que una realización particular de una serie de tiempo determinada se genera mediante un proceso lineal. Por ello, las redes neuronales artificiales, que son enfoques basados en datos no lineales, son capaces de realizar modelos no lineales sin conocimiento previo sobre las relaciones entre las variables de entrada y salida. Por lo tanto, se puede afirmar que las ANN son una herramienta de modelado más general y flexible para el pronóstico [30-34].

Entonces, el objetivo de la presente investigación es realizar un pronóstico a corto y medio plazo de demanda de pasajeros aéreos, para el cual se ha utilizado como caso de estudio Colombia (red completa de aeropuertos en su conjunto), con la especial particularidad de incluir en el análisis los datos de demanda del año 2020, el cual se ha visto severamente afectado por la pandemia del Covid-19, y estimar entonces, como resultado complementario (pero de gran interés), una fecha aproximada de recuperación tanto del volumen de la demanda como la tendencia de crecimiento de la misma al periodo prepandémico (2019).

Para conseguir tal objetivo, y como herramienta de cálculo, se desarrolla un modelo derivado de las redes neuronales artificiales del tipo ConvLSTM2D (<Conv> de Convolutacional y <LSTM2D> de memoria a corto-largo plazo); este tipo de arquitectura es un híbrido entre las redes convolucionales neuronales CNN, muy útiles para la extracción de patrones invariantes en su posición espacial, y las redes neuronales recurrentes RNN, muy apropiadas para la extracción de patrones dentro de su contexto temporal [35-39]. Estas técnicas de predicción, basadas en Machine Learning/Deep Learning ML/DL, pueden incorporar más elementos de análisis y por tanto ser potencialmente más eficaces [40]. Otras de las ventajas de las redes ConvLSTM2D, con respecto a los métodos clásicos basados en auto regresión, es que admiten un tratamiento

multivariable (varios *features* de entrada) [41, 42]. Finalmente, indicar que, en la aplicación al caso de estudio de la presente investigación, este tipo de modelo neuronal (ML/DL ConvLSTM2D) viene a representar el modelo de conocimiento abstracto, inferido del aprendizaje de los patrones históricos de las series temporales de tráfico aéreo, con el cual predecir la evolución futura de dichas series.

2. CASO DE ESTUDIO

En Colombia se liberalizó la industria del transporte aéreo / aviación a principios de la década de 1990. Esto trajo consigo reformas estructurales tanto en el sector aeroportuario como en el de las líneas aéreas, todo ello a través de una ininterrumpida batería de políticas públicas (aún vigentes) que incluye no solo aspectos normativos y regulatorios sino también agresivos programas de inversión pública y privada en infraestructura y tecnología.

Sobre la gestión de la infraestructura aeroportuaria Colombia ha seguido la tendencia regional de concesionar la administración de dichas infraestructuras al sector privado [44]. Entonces, desde mediados de la década de 1990, y en varias fases temporales, denominadas generaciones, el gobierno colombiano entregó en concesión varios aeropuertos del país, un total de 19, incluidos los más grandes e importantes (y que gestionan el grueso del tráfico aéreo de toda la red) [45]. Como resultado de las políticas públicas, tanto de privatización como de inversión pública y privada en infraestructura aeroportuaria, y acompañadas con políticas de desregulación del sector aerocomercial, donde las tarifas aéreas están totalmente liberalizadas desde el año 2012 [46], desde el inicio de la liberalización de la industria (1991) y hasta el año 2019, el transporte de pasajeros (totales) creció casi un 800% [43], [47]. Por otro lado, en Colombia la entrada al mercado de operadores aéreo privados con un modelo de negocio de servicio completo, o Full-Service Carrier FSC, se produjo muy pronto luego de la liberalización del sector (principios-mediados de la década de 1990). Pero la entrada al mercado de las líneas aéreas de bajo costo, o Low-Cost Carrier LCC, fue muchos años posterior a la liberalización (recién en el año 2012) [46].

Y en otro orden, se puede afirmar que el transporte aéreo en Colombia prácticamente no tiene competencia (a nivel doméstico) con otros medios de transporte, sobre todo para distancias medias y largas, debido a dos situaciones determinantes: primero, la compleja geografía del país (atravesado de suroeste a noreste por tres cadenas montañosas de la Cordillera de Los Andes), y segundo, a la deficiencia (en infraestructura, cobertura, capacidad y tecnología) de los sistemas de comunicación terrestre (vial) y ferroviario [48]. En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica de la mayoría de los aeropuertos de la red aeroportuaria colombiana (y participantes en el presente estudio) y abiertos al tráfico comercial. En la Figura 2 se presenta el desarrollo del tráfico aéreo de pasajeros en las cuatro últimas décadas.

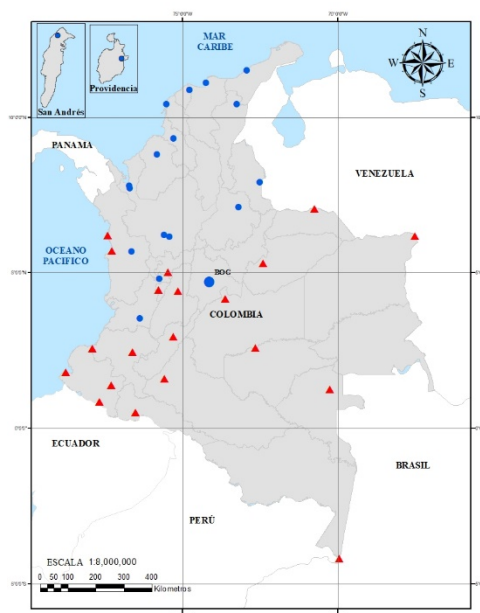


Figura 1. Ubicación geográfica de la red aeroportuaria colombiana: círculo azul: aeropuertos con gobernanza privada; triángulo rojo: aeropuertos con gobernanza pública. BOG es el código IATA del aeropuerto El Dorado [47]

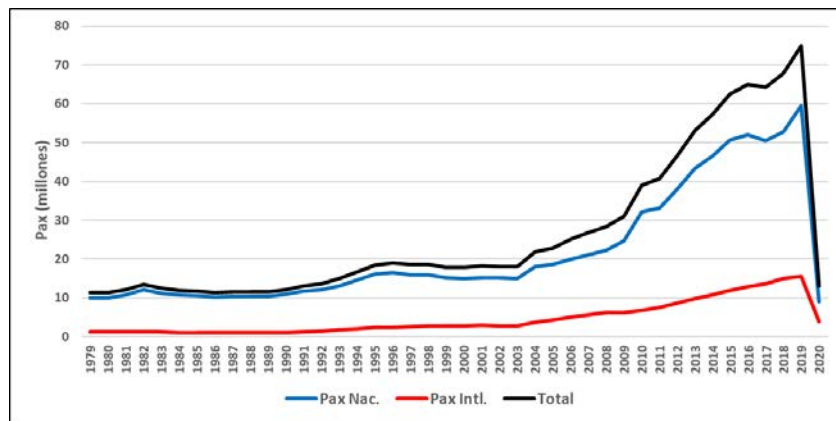


Figura 2. Desarrollo del tráfico aéreo de pasajeros de Colombia (red completa) en el periodo 1979-2020 [47]

La estrepitosa caída del tráfico aéreo verificada en el año 2020 (ver Figura 2), se debe, exclusivamente, a la completa suspensión del tráfico aéreo comercial de pasajeros (en toda la red aeroportuaria del país) entre mediados de marzo y principios de agosto de 2020, debido a la situación de emergencia sanitaria generada por la pandemia del Covid-19. La reapertura y reactivación del sector aerocomercial fue muy lenta, por etapas y por aeropuertos, y que se fue desarrollando a lo largo del último cuatrimestre del 2020.

En lo que se refiere al impacto económico generado por la pandemia en el país, en el año 2020 la riqueza nacional (PIB) cayó un 5% y el poder adquisitivo de los habitantes (PIB/cápita) disminuyó un 6%, ambos indicadores con respecto al año 2019 [49, 50]. En cuanto al mercado laboral, la tasa de desempleo en Colombia se ubicó en 15,9% en 2020, lo que significó un aumento de 5,4 puntos porcentuales más frente al 10,5 % de 2019 [50].

3. MÉTODO

En la metodología a implementar, previo al desarrollo del modelo, procede la preparación de los datos (o *dataset*) relativo a las series temporales históricas anuales de cada una de las seis variables independientes (o características seleccionadas), las cuales son las variables aeronáuticas (pasajeros nacionales o pasajeros internacionales), y las variables socioeconómicas (a nivel nacional), habitualmente utilizadas en el cálculo de pronósticos en transporte aéreo [8, 51], que son: Producto Interior Bruto PIB, población, Índice de Producción Industrial IPI, Índice de Precios al Consumidor IPC, y tasa de cambio Dólar US-Peso colombiano TRM. Los datos históricos cubren un periodo continuado de 42 años (1979-2020). Los datos aeronáuticos se obtuvieron del sistema estadístico de la Autoridad Aeronáutica de Colombia [47], y los datos socioeconómicos se obtuvieron de las fuentes oficiales relacionadas existentes en el país [49, 50].

Aunque los datos, tanto de tráfico aéreo como socioeconómicos, del año 2020 son muy bajos (con respecto a años precedentes), debido a las razones que se explicaron con anterioridad, se incluyen en el cálculo con el objetivo de imponer al modelo que aprenda los patrones del efecto Covid-19.

Finalmente, en lo que a datos se refiere, mencionar que una parte importante de la preparación del conjunto de datos ha consistido en extraer y separar las secuencias temporales de entrada al modelo en subsecuencias relativas al número de pasos previos (*lags* o pasados) de cada variable independiente, necesario para realizar las predicciones (*outs* o de pasos futuros). Aunque el código entrena la serie temporal histórica completa de 42 años, los datos son secuenciados en subdivisiones temporales de los pasos de los años previos (denominados n_lags) antes de considerar los pasos de predicción futura (denominados n_outs).

Además, se han hiperparametrizado dichos valores en el algoritmo, para estudiar la sensibilidad a los mismos. Igualmente, se extraen del conjunto de datos las salidas correspondientes a los pasajeros nacionales o internacionales, con las subsecuencias históricas correspondientes al número de pasos de años futuros a predecir. Para simplificar, se ha considerado el mismo número de pasos de años previos que pasos futuros a predecir ($n_lags = n_outs$).

El modelo a desarrollar en la presente investigación, que es uno derivado de las redes neuronales artificiales, se denomina ConvLSTM2D (<Conv> de Convolutacional y <LSTM2D> de memoria a corto-largo plazo) [35-39]. Lo que pretende el modelo Conv2LSTM2D, como expresa la ecuación (1), es que una vez se haya entrenado o ajustado el modelo en las conexiones (pesos) entre las neuronas de las diferentes capas, simbolizado por la función $f_{\text{model forecast}}$, este prediga (variables de salida denotada \hat{Y}) las n_outs salidas temporales correspondientes a los i features (\hat{y}_{it+n_outs}), a partir de la entrada de las n_lags observaciones de tiempos previos de los i features (x_{it-n_lags}).

$$\hat{y}_{it+n_outs}, \hat{y}_{it+n_outs-1}, \dots, \hat{y}_{it} = f_{\text{model forecast}}(x_{it-1}, x_{it-2}, \dots, x_{it-n_lags}) \quad (1)$$

Para describir las ecuaciones del modelo ConvLSTM2D se empieza por esquematizar la arquitectura básica de las redes neuronales artificiales, sobre las que se fundamenta el modelo ConvLSTM2D, denominadas redes perceptrón de multicapa MLP [52], las cuales están constituidas por varias capas de neuronas, con una primera capa correspondiente a la entrada (asociada al tensor X), y una última capa de salida (asociada al tensor Y), entre las que se intercalan las capas ocultas. Cada capa contiene un número variable de neuronas (o nodos), que pueden ser activadas con funciones de activación de varios tipos [53]. El flujo de entrada y salida a una neurona se muestra esquemáticamente en la Figura 3.

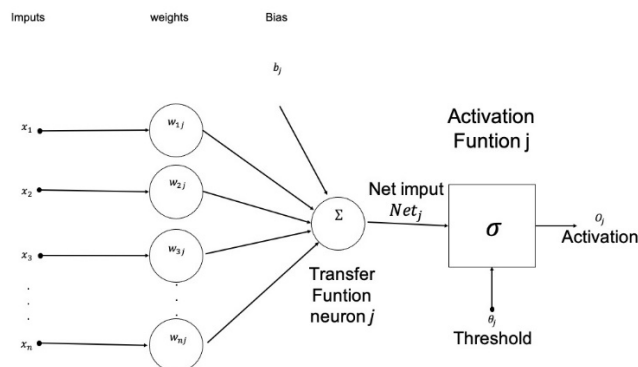


Figura 3. Flujo de las variables asociadas a las conexiones de neuronas en redes MLP [54]

En la Figura 3 x_i representan los inputs del *feature* i de la capa de entrada, w_{ij} representa el peso o ponderación del *feature* i de la capa anterior, en la conexión con la neurona j de la capa posterior, Σ representa la función de transferencia (suma de todas las entradas provenientes de las salidas de todas las neuronas de la capa anterior con la neurona j corregidas con el sesgo (o *bias*) b_j de la neurona), lo que produce la salida neta Net_j . A continuación, a cada neurona se le aplica la función de activación σ elegida (p.e. *tanh* o *relu* o *sigmoidea*), la cual produce la salida O_j . A partir de aquí se establecen de nuevo las conexiones de la salida de esta neurona con las neuronas de la capa siguiente, hasta llegar a la última capa de salida Y_j . Este flujo de entrada-salida se denomina flujo o propagación hacia delante, desde la capa de entrada, pasando por todas las neuronas de las capas intermedias, hasta la capa de salida final. Siendo θ_j el valor umbral de la neurona j , para activar su función de salida [55].

Del conjunto de datos se sacan las x_{it} o inputs de entrada, donde los subíndices i y t representan el número del *feature* e instante del tiempo de la observación. Estas x_{it} se agrupan en secuencias temporales, de un número de tiempos o pasos previos al instante t en el que se comienzan a realizar las predicciones, que se han denotado con el hiperparámetro n_lags . De igual forma, existe un número de pasos futuros de tiempo de predicción para la salida y_{it} que se ha denominado n_outs . Estos dos tensores, de entrada (X) y salida (Y), son multidimensionales [40].

En efecto, el tensor Y de salida tiene tres dimensiones, las cuales se definen como: el número de muestras o años de la serie de datos, el número de pasos de tiempo a predecir n_outs , y el número de *features* a predecir. En cambio, el tensor X de entrada posee cinco dimensiones correspondientes a: el número de muestras, el número de sub-secuencias en el que se dividen los n_lags para su análisis, el número 1 por ser las series temporales unidimensionales, el número de años comprendidos en cada sub-secuencia para construir los n_lags pasos previos, y el número de *features* de entrada i .

El modelo ConvLSTM2D aquí adoptado es del tipo Deep Learning DL y tiene una estructura codificador-decodificador donde los inputs X son primeramente codificados, con las capas híbridas de características convolucionales CNN y recurrentes RNN [56], [57], [58], [59]. Por otro lado, la decodificación es realizada solo con las capas recurrentes de memoria de corto-largo plazo LSTM. La codificación que aportan las capas convolucionales facilita la representación de las invariancias de las secuencias de los *features* de los inputs, mientras que la aportación de las células LSTM en la codificación permite memorizar el contexto de la temporalidad de los *inputs*. La parte descodificadora del modelo es realizada solo por las capas LSTM, lo que permite extraer e identificar los patrones de los *features* y temporalidad presente, como pueden ser la tendencia y estacionalidad [41]. Finalmente, la salida de las redes LSTM es entregada a otras capas densas de neuronas, tipo MLP (donde todas las neuronas se conectan con todas) que son las que realizan el aprendizaje de los patrones de *features* extraídos por el bloque codificador-decodificador anterior, hasta llegar a la última capa, donde se obtiene el tensor de salida Y . En resumen, la aplicación de la codificación-descodificación con capas convolucionales CNN y recurrentes LSTM en el modelo ConvLSTM2D equivalen a producir un doble aprendizaje profundo [37, 60, 61].

La Figura 4 muestra como las capas de convolución producen los mapas de *features* al aplicar la operación de convolución a los datos de entrada, con los diferentes filtros y ventanas deslizantes. Las capas CNN se pueden apilar sucesivamente en varios bloques, tras realizar el sub-muestreo detrás de la operación de convolución [62]. Con ello se trata de reducir los problemas de sobreajuste inherentes al sobreentrenamiento de los modelos cuando se usan pocos datos, dado que el modelo no es capaz de generalizar apropiadamente y termina por aprender los sesgos y ruidos [35] [36].

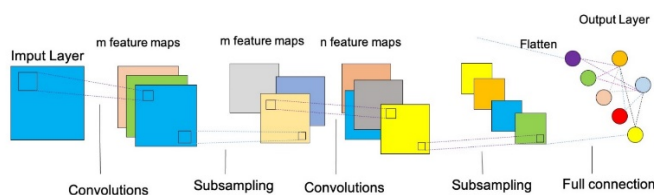


Figura 4. Esquema general producción de mapas de *features* realizados por capas convolucionales [63]

A fin de referenciar las ecuaciones del modelo ConvLSTM2D, se muestra en la Figura 5 el esquema de una célula de memoria a corto-largo plazo LSTM, donde se observa la presencia de los tres tipos de puertas empleadas; donde i denota la entrada, f el olvido, o la salida y c los estados de la célula.

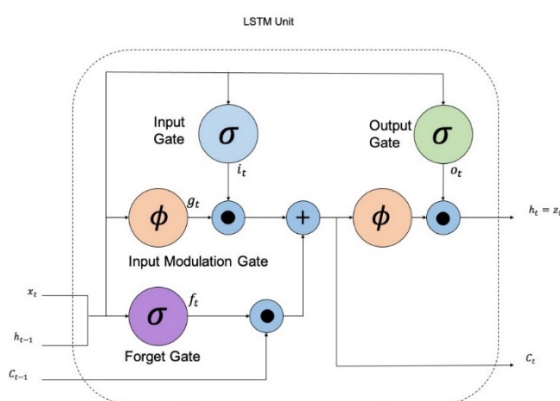


Figura 5. Esquema de una célula o unidad de memoria de corto-largo plazo LSTM [64]

El grupo de ecuaciones (2) que definen las capas del modelo ConvLSTM2D, de acuerdo con la notación representada en las Figuras 3, 4 y 5, se plantearon como una mejora de las redes tradicionales RNN [63], [64], que manejaban los estados ocultos de la célula, para mapear la salida a partir de la entrada. Las redes LSTM se propusieron para solucionar los problemas que aparecían del desvanecimiento y/o explosión del gradiente [65]. La superioridad de la arquitectura de capas ConvLSTM2D radica en su capacidad de gestionar la memoria a corto y largo plazo que le proporciona la arquitectura LSTM gestionando los tres tipos de puertas, de entrada, olvido y la de salida, más la proveniente de la incorporación de las capas convolucionales con la que se combina para producir la nueva capa ConvLSTM2D [66]. Entonces:

$$\begin{aligned}
i_t &= \sigma(W_{xi} * x_t + W_{hi} * h_{t-1} + W_{ci} \circ c_{t-1} + b_i) \\
f_t &= \sigma(W_{xf} * x_t + W_{hf} * h_{t-1} + W_{cf} \circ c_{t-1} + b_f) \\
o_t &= \sigma(W_{xo} * x_t + W_{ho} * h_{t-1} + W_{co} \circ c_{t-1} + b_o) \\
g_t &= \tanh(W_{xc} * x_t + W_{hc} * h_{t-1} + b_c) \\
c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ g_t \\
h_t &= o_t \circ \tanh(c_t)
\end{aligned} \tag{2}$$

Donde: i_t, f_t, o_t representan respectivamente la puerta de entrada, la puerta del olvido y la puerta de salida de la célula ConvLSTM2D, x_t los *inputs* temporales de la célula, h_{t-1} y c_{t-1} la salida y el estado respectivamente de la célula anterior, $*$ es el operador convolución, siendo W el filtro de convolución, con W_i y b_i el equivalente a los pesos y sesgos de la puerta de entrada, W_f y b_f los equivalentes a los pesos y sesgos de la puerta del olvido, W_o y b_o los de la puerta de salida y W_c y b_c los pesos y sesgos del estado de la célula. Las dimensiones y procesamiento de las capas ConvLSTM2D, aun siendo análogos a los de la célula LSTM, son diferentes, dado que la célula híbrida ConvLSTM2D realiza la operación convolución [63].

Finalmente, el operador \circ denota el producto de Hadamard y σ la función de activación. Cabe mencionar que en el algoritmo desarrollado para la presente investigación la función de activación σ elegida ha sido la de la función de unidad lineal rectificadora (ReLU) [67], por ofrecer mejores resultados para el caso de estudio seleccionado que la función de la tangente hiperbólica (*tanh*) recogida en las ecuaciones descritas en (2).

En la Figura 6 se muestra la arquitectura completa y detallada del modelo ConvLSTM2D desarrollado en el presente trabajo para una de las configuraciones de los hiperparámetros utilizadas, relativa al caso definido con dos *features* como inputs y un *feature* de salida, junto a seis pasos temporales previos n_lags y otros seis pasos futuros a predecir n_outs . En dicha Figura 6 se puede observar las cinco dimensiones de los inputs del tensor de entrada X y las tres dimensiones del tensor de salida Y. El signo de interrogación '?' (a veces none) indica el grado de libertad de la cantidad variable de muestras a usar.

También, se observa la definición del codificador resultante de la concatenación de tres bloques compuestos cada uno de ellos de una capa ConvLSTM2D seguida de una capa MaxPooling3D (finalmente solo se ha usado una capa de MaxPooling3D en el primer bloque por dar mejores resultados para el caso de estudio), la cual es la responsable de submuestrear las salidas de la capa anterior para evitar el sobreajuste en el aprendizaje. La salida del codificador de *features* se aplanan antes de ser entregada al decodificador de la capa LSTM. Entremedias, están las capas denominadas *repeat_vector* y *time_distributed*, las cuales simplemente acoplan las dimensiones de entrada/salida de las capas LSTM [42].

Antes de realizar el entrenamiento del modelo se implementa el método de compilación, en el cual se definen los argumentos del modelo como los optimizadores del gradiente, la función de coste o error, y la métrica de la evaluación. El siguiente paso en la metodología comprende el entrenamiento del modelo ConvLSTM2D. Entrenar el modelo ConvLSTM2D en aprendizaje supervisado implica definir la métrica de error, que mida la distancia entre el valor de las salidas reales de la serie temporales usadas del tensor Y y las predichas o estimadas \hat{Y} por el modelo ConvLSTM2D a partir del tensor de entrada X [68].

En este trabajo, se ha usado para la función de coste el error cuadrático medio MSE. La ecuación (3) define dicho error con la norma 2, donde E es el error y n el número de muestras de la media.

$$E = \frac{1}{n} \sum_x \|(y(x) - \hat{y}(x))\|^2 \tag{3}$$

En ML, a partir de la función de coste, se implementa el proceso fundamental para el ajuste automático de los pesos del modelo, denominado *backpropagation* (BP) [68], el cual calcula el gradiente de dicho error total (en este caso el MSE) con respecto a cada uno de los pesos o conexiones de las neuronas de cada capa

del modelo, para lo que aplica la regla de la cadena en la derivación, a fin de propagar dicho error hacia atrás, para repartir el error entre todos los pesos del modelo, neurona a neurona, capa a capa.

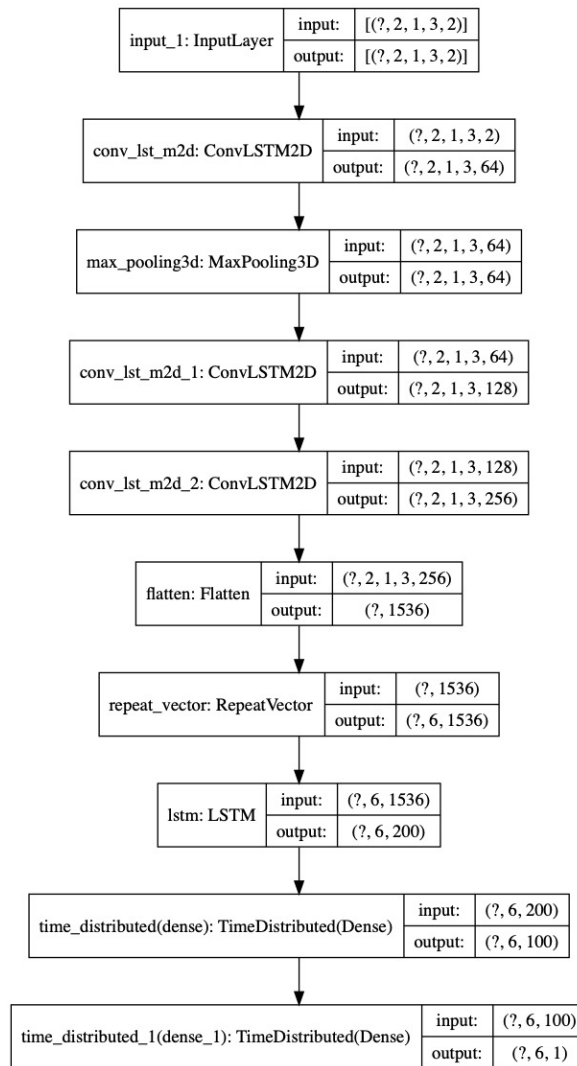


Figura 6. Modelo completo de ConvLSTM2D usados tres bloques codificadores apilados ConvLSTM2D y un decodificador LSTM

Con ello, se busca que el nuevo ajuste de pesos del modelo produzca un error menor cuando se itere con el siguiente lote de muestras de entrada X . Si el problema converge, dicho error se va haciendo cada vez menor o asintótico, como es el caso analizado aquí. El grupo de ecuaciones (4) muestra la regla de la cadena de derivación en las redes ANN [56, 69].

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial net_j} \frac{\partial net_j}{\partial w_{ij}} \tag{4}$$

$$\frac{\partial net_j}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} \left(\sum_{k=1}^n w_{kj} o_k \right) = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} w_{ij} o_i = o_i$$

Los problemas de la búsqueda de mínimos de la función de coste se implementan a través de diferentes optimizadores, genéricamente conocidos como del gradiente estocástico descendente SGD [54]. Estos optimizadores tratan de evitar que la solución quede atrapada en alguno de los mínimos locales que presenta la función de coste cuando esta no es una función convexa. Para lo que cada uno de ellos ha implementado diferentes estrategias para buscar el óptimo global.

En la presente investigación se ha usado uno de los optimizadores más eficientes, en el sentido de alta velocidad de convergencia y estabilidad robusta, conocido como estimación del momento adaptivo ADAM [54]. El cual es una versión mejorada del RMSProp que implementa una velocidad (o paso de aprendizaje)

variable/adaptativa y un momento o inercia que trata de evitar quedar atrapado en los mínimos locales de la función de coste. El grupo de ecuaciones (5) describen la actualización de los pesos por el optimizador ADAM [54].

$$\begin{aligned}
 m_w^{(t+1)} &\leftarrow \beta_1 m_w + (1 - \beta_1) \nabla_w l^{(t)} \\
 v_w^{(t+1)} &\leftarrow \beta_2 v_w^{(t)} + (1 - \beta_2) (\nabla_w l^{(t)})^2 \\
 \hat{m}_w &= \frac{m_w^{(t+1)}}{1 + \beta_1^{(t+1)}} \\
 \hat{v}_w &= \frac{v_w^{(t+1)}}{1 + \beta_2^{(t+1)}} \\
 w^{(t+1)} &\leftarrow w^t - \eta \frac{\hat{m}_w}{\sqrt{\hat{v}_w + \epsilon}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Donde $w^{(t+1)}$ representan los pesos en la iteración $t+1$, η la velocidad o paso de aprendizaje, $\nabla_w l^{(t)}$ representa el gradiente de la función de coste /con respecto a los pesos, ϵ un valor mínimo para evitar dividir por 0 (en *keras* se usa 10^{-7}), β_1 y β_2 son los factores de olvido para el gradiente o primer momento y el segundo momento respectivamente, $m_w^{(t+1)}$ es la media móvil de los pesos o primeros momentos en la iteración $t+1$, $v_w^{(t+1)}$ es la varianza móvil (o segundo momento) de los pesos en la iteración $t+1$. Hay que señalar que en la notación de las ecuaciones (5) los superíndices con la variable t corresponden a las iteraciones (o ciclos de aprendizaje), mientras que la notación de los subíndices t del resto de las ecuaciones corresponden a los diferentes instantes de tiempo de la serie temporal.

En este trabajo se ha hiperparametrizado tanto el número de iteraciones como el tamaño del lote en el aprendizaje. Un lote es una unidad del conjunto de datos a partir del cual se estima el error de la función de coste, y por tanto se ajustan los pesos. El gradiente tiene el atributo de estocástico, dado que no se puede calcular para el conjunto de datos completo, debido a los impedimentos en tiempo y memoria de computación que dicho proceso impone. Todo lo cual, convierte al proceso de aprendizaje sensible al tamaño del lote, por lo que fue hiperparametrizado este valor en algoritmo [41, 42, 70].

El siguiente paso en la metodología es la evaluación del modelo, en la cual se procede a comparar y evaluar la bondad del entrenamiento o ajuste de los pesos del modelo, para lo cual se tiene en cuenta su sensibilidad a las variaciones del entrenamiento, según las diferentes configuraciones de los hiperparámetros que definen tanto el modelo como el propio proceso de entrenamiento. En el campo del ML/DL la búsqueda de la mejor solución es un problema heurístico, en el que se proponen y prueban diferentes soluciones de arquitecturas y procesos de entreno de modelos, extraídos del espacio infinito de soluciones posibles, para, a continuación, medir sus actuaciones y poder seleccionar de entre ellos aquellos modelos y configuraciones más óptimas [56, 71].

Por este motivo, en esta fase de evaluación se requiere, de un lado definir el espacio de los hiperparámetros con los que configurar el modelo y su entrenamiento, y por otro lado definir las métricas con las que se evalúa y compara la bondad de los resultados. Como métricas de evaluación para problemas de regresión aquí se han implementado la del error porcentual absoluto medio MAPE, el cual mide el error de predicción como un porcentaje, lo cual es una ventaja puesto que provee una manera intuitiva de evaluar el error del modelo, por lo que cuanto más pequeño sea el MAPE mejor será el pronóstico [8, 72, 73]; y, adicionalmente, también se implementó la raíz del error cuadrático medio RMSE. Para ello, una vez entrenado el modelo con todos los datos, de forma que quedan fijados los pesos de todas las conexiones de las neuronas/capas del modelo, se procede a predecir de nuevo los valores de salida Y del conjunto de datos, a partir de los valores de entrada X .

Los hiperparámetros manejados inicialmente para definir el espacio posible de soluciones han sido, en lo referente al modelo ConvLSTM2D, el número de filtros por capa convolucional-recurrente, el tamaño de las ventanas deslizantes de la convolución, el número de veces que se repite el codificador de capas

ConvLSTM2D, la presencia o no de capas específicas del tipo *dropouts* y *batchnormalization* (que ayudan a evitar los sobreajustes y entrenar de forma robusta), y finalmente variar el número de neuronas de la capa LSTM [64]. Con todo ello se ha obtenido, finalmente, un modelo relativamente robusto en sus prestaciones.

En lo relativo al proceso de entreno y partición de las secuencias previas n_lags para predecir secuencias futuras n_outs , tras varias pruebas el cálculo se ha centrado en dos escenarios, el primero a 6 años (corto plazo) y el segundo a 12 años (medio plazo), con los dos hiperparámetros iguales entre sí. Dado que al implementar las técnicas *callbacks* de *Keras* como *Earlystopping* y *ModelCheckpoint*, relativos a detener el aprendizaje cuando se alcanza el error umbral y guardar el modelo de aprendizaje óptimo encontrado en el entreno respectivamente, el algoritmo es, hasta cierto punto, independiente del número de iteraciones usado. Finalmente, los hiperparámetros que si se han tenido en cuenta han sido el del número de subsecuencias, el número de *features* usados como inputs, para predecir los pasajeros nacionales o los pasajeros internacionales, junto al de pasos previos n_lags y pasos futuros a predecir n_outs .

Finalmente, y como última etapa de la metodología, se desarrolla la predicción del modelo, que consiste en realizar con el modelo entrenado las predicciones de las series futuras (n_outs) a partir de la serie de los años previos (n_lags) elegidos y de los *features* tenidos en cuenta como variables independientes de entrada. Para lo que se consideró conveniente aplicar dicha predicción a la serie histórica (real) Y , y poder así observar la desviación con las salidas estimadas \hat{Y} o predichas por el modelo ConvLSTM2D. Este proceso de predicción es en definitiva el objetivo final de esta metodología, dado que lo que se busca con este desarrollo del algoritmo es realizar la predicción de la demanda de pasajeros aéreos para años futuros.

Aunque el objetivo se ha centrado en dos de los *features*, pasajeros nacionales y pasajeros internacional (a nivel anual), el modelo podría predecir, para los años venideros cualquiera de los otros cinco *features* adicionales incluidos en el conjunto de datos histórico (en referencias a los datos socioeconómicos). Hay que destacar que los pesos del modelo para cada una de las posibles combinaciones entre cualquier número de los siete *features* posibles de salida en función de los siete *features* de entrada, es diferente, puesto que el entrenamiento $Y = f(X)$, o ajuste de pesos del modelo ConvLSTM2D, se hace con los *features* apropiados de los tensores X e Y extraídos del conjunto de datos histórico.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan, interpretan y discuten los resultados obtenidos con el algoritmo definido, entrenado y evaluado, en la predicción de la demanda (a corto y medio plazo) de pasajeros nacionales (o domésticos) e internacionales en el sistema aeroportuario colombiano (en conjunto).

Los dos hiperparámetros a los que se han reducido los posibles escenarios de predicción son los relativos a los años previos y años de predicción, respectivamente n_lags y n_outs . Por otro lado, se subdivide en dos subsecuencias a dichos tiempos previos-posteriores (dos o tres), a los que son sensibles los resultados finales, dado que definen el contexto de temporalidad desde el que extraer los patrones de los ciclos a corto plazo que puedan existir dentro de esos periodos más largos considerados. Esta característica es propia del análisis de las redes ConvLSTM2D y está detrás de que finalmente el conjunto de datos de entrada X tenga cinco dimensiones: los dos *features* seleccionados como variables dependientes Y (uno de los dos: pasajeros nacionales o internacionales), y los cinco *features* añadidos como variables dependientes X (PIB, Población, IPI, IPC, TRM). Destacar que en los escenarios considerados siempre se incorpora la propia serie temporal a predecir como variable dependiente para darle mayor robustez y predictibilidad al modelo.

Antes de pasar a describir los hiperparámetros y resultados alcanzados en cada uno de los escenarios considerados como más relevantes, se muestra la Figura 7 correspondiente a la curva de aprendizaje (ajuste de los pesos) del modelo según el número de iteraciones o ciclos de aprendizaje (donde se observan la relativa robustez de la convergencia hacia valores asintóticos del MAPE con relativas fluctuaciones).

Y en la Figura 8 se representa la predicción de la serie histórica con el modelo ya entrenado, donde se observa como la disminución del tráfico de pasajeros del año 2020 (plena situación pandémica) no es predicha. Ambas curvas han sido tomadas como ejemplos del escenario 1, que se describe más adelante.

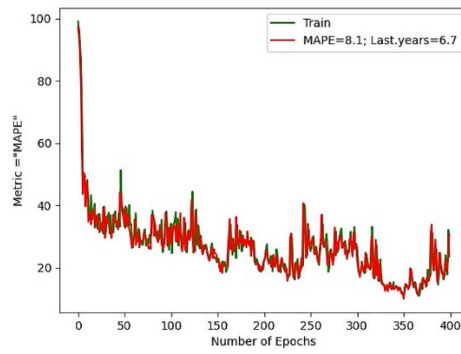


Figura 7. Evolución del MAPE según la curva de aprendizaje del modelo entrenado descrito en el escenario 1.

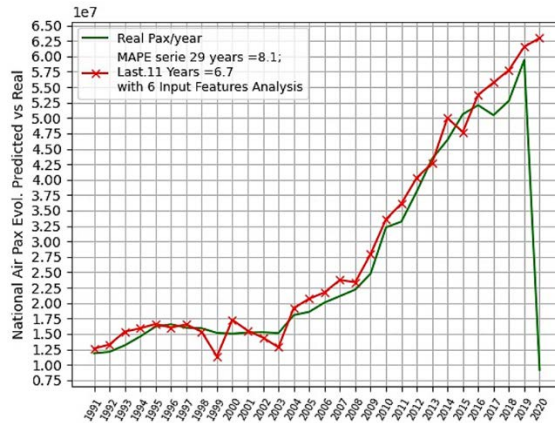


Figura 8. Evolución de la predicción de los pasajeros vs. la serie histórica real, iniciada n_lags años después de 1979 del modelo ya entrenado y descrito en el escenario 1

4.1 Escenario 1

Se presenta una primera predicción considerando secuencias de 12 años previos y de los 12 años siguientes, de entre la serie histórica total, con las series temporales de seis *features* elegidos como variables dependientes (pasajeros nacionales, PIB, población, IPI, IPC y TRM) y con pasajeros nacionales como única variable de salida a predecir. Agrupando los 12 años previos n_lags en tres subsecuencias (o subciclos posibles) de 4 años cada uno. La Figura 9 recoge dicha predicción a medio plazo con un valor del MAPE de 6.7% para los últimos 11 años y de 8.1% para la serie histórica de 29 años (recordar que se contabilizan 12 años después de 1979 como pasos previos n_lags para predecir los 12 años siguientes n_outs). En la Figura 9 se puede observar que para principios del año 2024 el tráfico (o demanda) de pasajeros nacionales, a nivel país, recuperaría el nivel existente en época prepandémica (2019); con una recuperación de la tendencia en la demanda ligeramente superior al del año 2019 pero con oscilaciones que podrían estar indicando potenciales ecos del impacto del Covid-19.

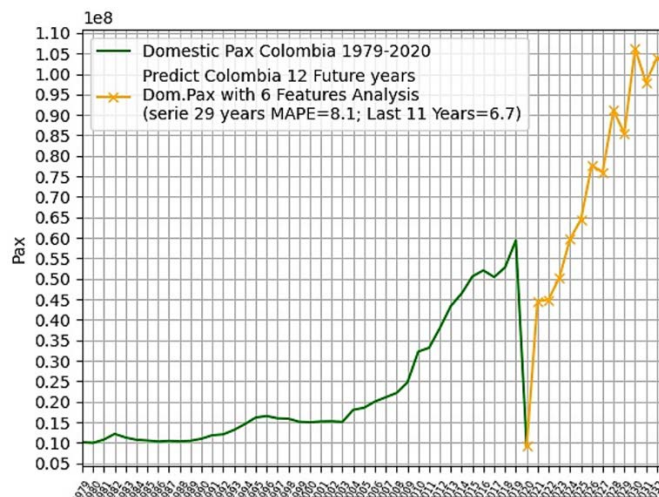


Figura 9. Pronóstico de la demanda de pasajeros nacionales a nivel país, periodo 2021-2032; escenario 1

4.2 Escenario 2

Se presenta una segunda predicción considerando secuencias de 12 años previos y de los 12 años siguientes, de entre la serie histórica total, con las series temporales de solo dos *features* elegidos como variables dependientes (pasajeros internacionales, PIB) y con pasajeros internacionales como única variable de salida a predecir. Agrupando los 12 años previos n_lags en tres subsecuencias (o subciclos posibles) de 4 años cada uno. La Figura 10 recoge dicha predicción a medio plazo con un valor del MAPE de 9.3% para los últimos 11 años y de 9.7% para la serie histórica de 29 años (recuérdese que se contabilizan 12 años después de 1979 como pasos previos n_lags para predecir los 12 años siguientes n_outs). En la Figura 10 se puede observar que para principio del año 2024 el tráfico (o demanda) de pasajeros internacionales de Colombia se recuperaría al nivel existente en época prepandémica (2019), y con una recuperación de la tendencia en la demanda muy similar al del año 2019 y sin oscilaciones.

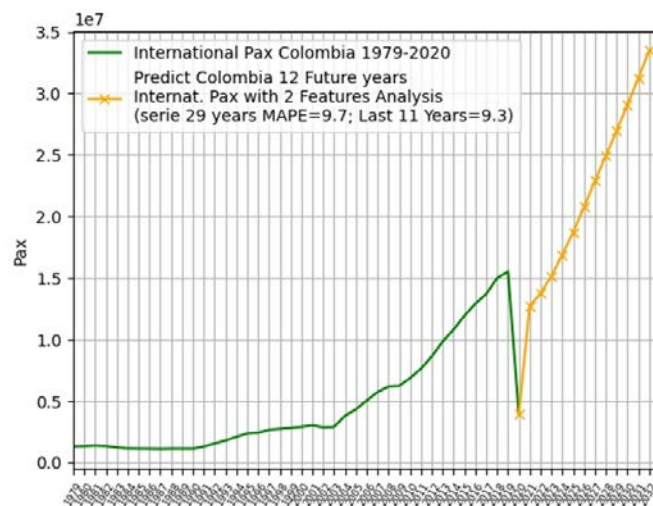


Figura 10. Pronóstico de la demanda de pasajeros internacionales de Colombia, periodo 2021-2032; escenario 2

4.3 Escenario 3

Se presenta una tercera predicción considerando secuencias de seis años previos y de los seis años siguientes, de entre la serie histórica total, con las series temporales de solo dos *features* elegidos como variables dependientes (pasajeros nacionales, PIB) y a pasajeros nacionales como única variable de salida a predecir, y agrupando los seis años previos n_lags en dos subsecuencias (o sub ciclos posibles), por tanto, de tres años cada uno. En la Figura 11 se representa dicha predicción a corto plazo con un valor del MAPE de 4.5% para los últimos cinco años (se excluye el año 2020) y de 6.0% para la serie histórica de 35 años (al empezar seis años después de 1979, año de inicio del histórico disponible, para predecir los n_outs años siguientes). Los resultados muestran que para finales de 2022 o principios del 2023, el tráfico (o volumen de demanda) de pasajeros nacionales, a nivel país, habría recuperado el nivel prepandémico (2019).

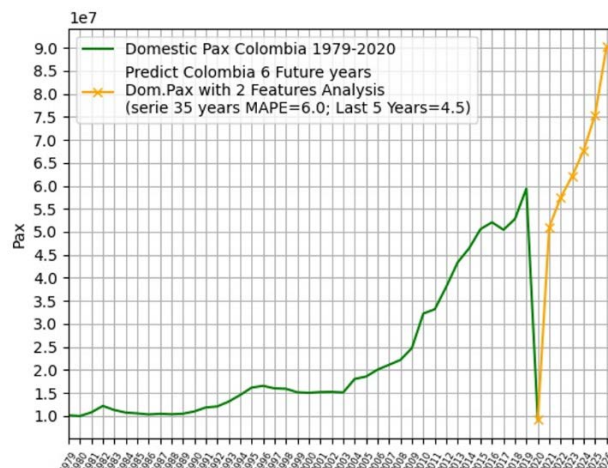


Figura 11. Pronóstico de la demanda de pasajeros nacionales a nivel país, periodo 2021-2026; escenario 3

4.4 Escenario 4

Se presenta una cuarta predicción, calculada con las tendencias de las series temporales de pasajeros nacionales e internacionales usadas como *features* de entrada, para analizar su impacto, dejando en tres la cantidad de los *features* usados como *inputs*. Se han considerado secuencias de seis años previos y de los seis años siguientes, de entre la serie histórica total. Con las series temporales de solo 3 *features* elegidos como variables dependientes (pasajeros internacionales, pasajeros nacionales, PIB) y con pasajeros internacionales como variable a predecir. Agrupando los seis años previos n_lags también en dos subsecuencias (o subciclos posibles), por tanto, de tres años cada uno. Los resultados de este cálculo se muestran en la Figura 12; los valores de MAPE resultantes son de 7.6% para los últimos cinco años (se excluye el año 2020) y de 5.8% para la serie histórica de 35 años (al empezar seis años después de 1979, año de inicio del histórico de datos disponible, para predecir los n_outs años siguientes). Los resultados indican para mediados del año 2022 la demanda de pasajeros internacionales, a nivel país, recuperaría el volumen de demanda prepandémica (año 2019) e incluso con una tendencia superior (en el crecimiento de la demanda).

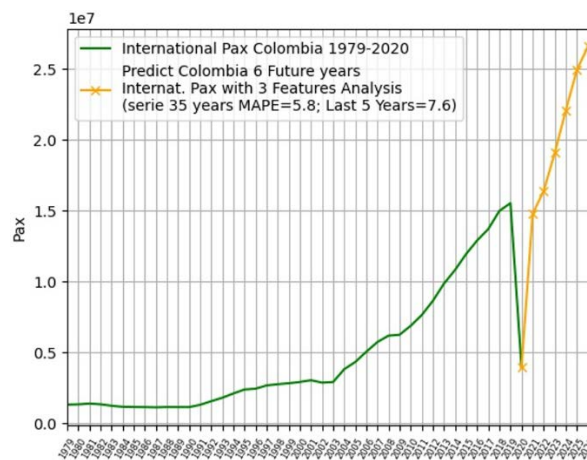


Figura 12. Pronóstico de la demanda de pasajeros internacionales de Colombia, periodo 2021-2026; escenario 4

4.5 Escenario 5

Finalmente, presenta una quinta predicción con secuencias de seis años previos y de los seis años siguientes, de entre la serie histórica total, con las series temporales de solo dos *features* elegidos como variable dependiente (pasajeros internacionales, PIB) y con pasajeros internacionales como única variable de salida a predecir. Agrupando los seis años previos n_lags también en dos subsecuencias (o subciclos posibles), por tanto, de tres años cada uno. Los resultados se muestran en la Figura 13, los valores del MAPE son de 3% para los últimos cinco años (se excluye el año 2020) y de 4.8% para la serie histórica de 35 años (al empezar seis años después de 1979, año de inicio del histórico de datos disponible, y para predecir los n_outs años siguientes). En este escenario, los resultados indican que para mediados del año 2022 la demanda de pasajeros internacionales de Colombia se habría recuperado al nivel de la demanda prepandémica (año 2019).

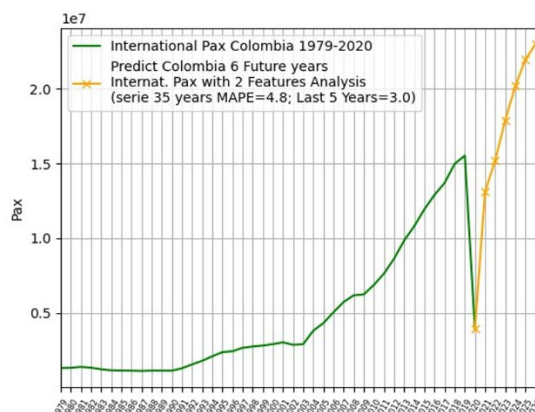


Figura 13. Pronóstico de la demanda de pasajeros internacionales de Colombia, periodo 2021-2026; escenario 5

Como conclusión del análisis de los resultados se desea hacer tres observaciones. En primer lugar, el algoritmo aquí desarrollado tiene una complejidad básica-media, caracterizada por la presencia de 1.920.009 conexiones neuronales, los cuales deben de ser ajustados como incógnitas en cada iteración durante el proceso de aprendizaje. Particularizado dicho valor para el escenario 5 (de dos *features* y seis años de previsión), pero que crecen hasta 3.149.833 conexiones neuronales cuando se manejan seis *features* y 12 años de previsión del escenario 1.

En segundo lugar, como se ha mostrado exhaustivamente en la descripción del modelo de ML/DL del ConvLSTM2D, se trata de procesos estocásticos, originados implícitamente en el mismo proceso del cálculo del gradiente estocástico descendente SGD, que en el presente desarrollo se ha mejorado con la selección del optimizador ADAM [54] y por tanto sujetos a incertidumbres o errores. En tercer lugar, una forma de acotar las incertidumbres asociadas a los procesos estocásticos de los modelos de predicción de redes neuronales presentados en este trabajo, es mediante la ejecución del algoritmo varias veces, con los mismos hiperparámetros, lo que se conocen como técnicas de validación cruzada (*K-fold cross-validation*) [41, 74].

Finalmente, cabe mencionar que los resultados aquí obtenidos coinciden con los pronósticos realizados en un estudio reciente [75], sobre la recuperación del transporte aéreo a nivel mundial, el cual predice que la demanda de pasajeros aéreos se recuperará, a niveles de prepandemia, a finales del 2022 (escenario optimista). Y los resultados también coinciden con estudio de IATA [76] el cual prevé la recuperación del tráfico de pasajeros aéreos (a nivel mundial) a nivel de 2019 para a finales de 2022 (pasajeros domésticos) y principios de 2024 (pasajeros internacionales).

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, estimar, a corto y medio plazo, la demanda pasajeros aéreos a nivel nacional, aporta valiosa información para que los planificadores de la aviación / transporte aéreo de un país puedan diseñar, planificar e implementar, con suficiente antelación: 1) estrategias de desarrollo (infraestructuras, instalaciones, equipos, modernización tecnológica, formación de personal técnico, etc.); 2) un calendario de inversión de capital (para hacer frente a los programas de desarrollos propuestos); y 3) políticas públicas relacionadas (para consolidar y reforzar el desarrollo de la industria del transporte aéreo local).

En segundo lugar, actualmente académicos, analistas, planificadores y decisores de la industria de la aviación civil internacional, en todo el mundo, están desarrollando estudios de pronósticos que les permita saber cuándo y cómo se recuperará el tráfico aéreo (principalmente el volumen de la demanda de pasajeros aéreos) a niveles pre-pandémicos (año 2019), debido a la importancia de la industria de la aviación, no solo en lo que se refiere a la conectividad local/regional/mundial, sino también a su contribución a la economía mundial. El presente trabajo tuvo el objetivo de contribuir, desde lo académico, a estos dos puntos mencionados. Por otro lado, este trabajo aporta una novedad y originalidad de carácter geográfico, al ser el primer estudio (de carácter académico, y al menos publicado), a nivel del subcontinente latinoamericano, sobre previsión del tráfico aéreo para época post-Covid 19.

Y en lo que refiere al planteamiento, se decidió por el desarrollo de un modelo basado en una arquitectura de redes neuronales artificiales frente a otras posibles técnicas estadísticas clásicas al considerar que las técnicas de predicción de ML/DL pueden incorporar más elementos de análisis y por tanto ser potencialmente más eficaces. En particular, para el análisis de las series temporales, se han aplicado técnicas de redes codificadoras-decodificadoras del tipo ConvLSTM2D, El modelo ConvLSTM2D aquí desarrollado admite un tratamiento multivariable (no pasa lo mismo con los métodos clásicos basados en auto regresión).

Por otro lado, el modelo ConvLSTM2D desarrollado es del tipo aprendizaje supervisado, lo que significa que se entrena al modelo con las entradas y salidas tensoriales extraídas de la serie histórica del conjunto de datos. La posibilidad de hibridación de las redes convolucionales CNN con las redes recurrentes de memoria a corto-largo plazo LSTM, ha permitido la implementación del modelo ConvLSTM2D en la presente investigación (novedosa en cuanto su aplicación para las series temporales de predicción del tráfico aéreo).

La aplicación de bloques codificadores-decodificadores con redes convolucionales-recurrentes híbridas suponen una novedad para el tratamiento de series temporales. Finalmente, los resultados de la aplicación de modelo basado en ANN/ML presenta valores MAPE muy aceptables (del orden del 3% al 9%, según el escenario), lo que convierte al modelo aquí desarrollado en uno alternativo, y viable, para desarrollar pronósticos confiables de tráfico aéreo, al menos a corto y medio plazo.

REFERENCIAS

- [1] TRB. *Aviation Demand Forecast: Survey of Methodologies*, Washington DC: Transportation Research Board, 2002.
- [2] Horonjeff, R.; McKelvey, F.; Sproule, W. and Young, S. *Planning and Design of Airports*, McGraw-Hill, 2010.
- [3] Wells, A. y Young, S. *Airport Planning y Management*, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [4] Ashford, N.; Mumayiz, S. y Wright, P. *Airport Engineering*, New Jersey: John Wiley y Sons, 2011.
- [5] Janic, M. *System Analysis and Modelling in Air Transport*, Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [6] Janic, M. *Airport analysis, planning and design: demand, capacity and congestion*, Nova Science Publishers, 2009.
- [7] ICAO. *Master Planning. Part 1. Doc 9184*. Montreal: ICAO, 1987.
- [8] Rodríguez, Y.; Pineda, W. and Díaz Olariaga, O. "Air traffic forecast in post-liberalization context: a Dynamic Linear Models approach", *Aviation*, vol. 24, pp. 10-19, 2020.
- [9] García, M. *Aeropuertos. Planificación, Diseño y Medio Ambiente*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, 2013.
- [10] ICAO. *Manual on Air Traffic Forecasting. Doc 8991*, Montreal: ICAO, 2006.
- [11] ACI. *Traffic Forecast*, Montreal: ACI (Airports Council International), 2016.
- [12] Kazda, A. and Caves, R. *Airport design and operations*, Bingley: Emerald, 2015.
- [13] de Neufville, R. and Odoni, A. *Airport Systems, Planning, Design, and Management*, New York: McGraw-Hill, 2013.
- [14] Dantas, T.; Oliveira, F. and Repolho, H. "Air transportation demand forecast through Bagging Holt Winters methods," *Journal of Air Transport Management*, vol. 59, pp. 116-123, 2017.
- [15] Abed, S. Y.; Ba-Fail, A. O. and Jasimuddin, S. M. "An econometric analysis of international air travel demand in Saudi Arabia," *Journal of Air Transport Management*, vol. 7, pp. 143-148, 2001.
- [16] Fernandes, E. and Pacheco, R. R. "The causal relationship between GDP and domestic air passenger traffic in Brazil," *Transportation Planning and Technology*, vol. 33, pp. 569-581, 2010.
- [17] Garrow, L. A. and Koppelman, F. S. "Predicting air travelers' no-show and standby behavior using passenger and directional itinerary information," *Journal of Air Transport Management*, vol. 10, pp. 401-411, 2004.
- [18] Grosche, T.; Rothlauf, F. and Heinzl, A. "Gravity models for airline passenger volume estimation," *Journal of Air Transport Management*, vol. 13, pp. 175-183, 2007.
- [19] Samagaio, A. and Wolters, M. "Comparative analysis of government forecasts for the Lisbon Airport," *Journal of Air Transport Management*, vol. 16, pp. 213-217, 2010.
- [20] Chin, A. T. H. and Tay, J. H. "Developments in air transport: implications on investment decisions, profitability and survival of Asian airlines," *Journal of Air Transport Management*, vol. 7, pp. 319-330, 2001.
- [21] Tsui, W. H. K.; Balli, H.; Gilbey, A. and Gow, H. "Forecasting of Hong Kong airport's passenger throughput," *Tourism Management*, vol. 42, pp. 62-76, 2014.
- [22] Aston, J. A. D. and Koopman, S. J. "A non-Gaussian generalization of the airline model for robust seasonal adjustment," *Journal of Forecasting*, vol. 25, pp. 325-349, 2006.
- [23] West, M. and Harrison, J. *Bayesian forecasting and dynamic models*, Springer Science y Business Media, 2006.
- [24] Honjo, K.; Shiraki, H. and Ashina, S. "Dynamic linear modeling of monthly electricity demand in Japan: Time variation of electricity conservation effect," *PLoS ONE*, vol 13, e0196331, 2018.
- [25] Petris, G.; Petrone, S. and Campagnoli, P. *Dynamic linear models with R*, Springer, 2009.
- [26] Tascón, D. and Díaz Olariaga, O. "Air traffic forecast and its impact on runway capacity. A System Dynamics approach," *Journal of Air Transport Management*, vol. 90, pp. 1-10, 2021.
- [27] Suryani, E.; Chou, S. and Chen, C. "Dynamic simulation model of air cargo demand forecast and terminal capacity planning," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 28, pp. 27-41, 2012.
- [28] Suryani, E.; Chou, S. and Chen, C. "Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework," *Expert Systems with Applications*, 37, 2324-2339, 2010.
- [29] Zhang, G.; Patuwo, B. and Hu, M.Y. "Forecasting with artificial neural networks: The state of the art," *International Journal of Forecasting*, 14, 35-62, 1998.
- [30] Srisaeng, P.; Baxter, G. and Wild, G. "Using an artificial neural network approach to forecast Australia's domestic passenger air travel demand," *World Review of Intermodal Transportation Research*, vol. 5, pp. 281-313, 2015.
- [31] Mostafaeipour, A.; Goli, A. and Qolipour, M. "Prediction of air travel demand using a hybrid artificial neural network (ANN) with Bat and Firefly algorithms: a case study," *The Journal of Supercomputing*, vol. 74, pp. 5461-5484, 2018.
- [32] Gupta, V.; Sharma, K. and Sangwan, M. "Airlines passenger forecasting using LSTM based recurrent neural networks," *International Journal Information Theories and Applications*, vol. 26, pp. 178-187, 2019.

- [33] Dingari, M.; Reddy, M. and Sumalatha, V. "Air Traffic Forecasting Using Artificial Neural Networks," *International Journal of Scientific y Technology Research*, vol. 8, pp. 556-559, 2019.
- [34] Bao, Y.; Xiong, T. and Hu, Z. "Forecasting Air Passenger Traffic by Support Vector Machines with Ensemble Empirical Mode Decomposition and Slope-Based Method," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1-12, 2012.
- [35] Millstein, F. *Convolutional Neural Networks in Python*, Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018.
- [36] Sewak, M.; Karim, R. and Pujari, P. *Practical Convolutional Neural Networks*, Birmingham: Packt Publishing, 2018.
- [37] Yang, J.; Nguyen, M.; San, P.; Li, X. and Krishnaswamy, S. "Deep convolutional neural networks on multichannel time series for human activity recognition," *Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 3995-4001, 2015.
- [38] Malhotra, P.; Vig, L.; Shroff, G. and Agarwal, P. "Long-short term memory networks for anomaly detection in time series," *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*, Bruges, 2015.
- [39] Hermans, M. and Schrauwen, B. "Training and analyzing deep recurrent neural networks," *Working Paper*, Ghent University, 2013.
- [40] Ketkar, N. and Moolayil, J. *Deep Learning with Python*, New York: Springer, 2021.
- [41] Pedrycz, W. and Chen, S. *Deep Learning: Concepts and Architectures*, Cham: Springer, 2020.
- [42] Calin, O. *Deep Learning Architectures. A Mathematical Approach*, Cham: Springer, 2020.
- [43] Díaz Olariaga, O. "Contribución del transporte aéreo a la conectividad territorial. El caso de Colombia," *EURE*, vol. 47, pp. 117-141, 2021.
- [44] Díaz Olariaga, O. and Ávila Álvarez, J. "Evolution of the airport and air transport industry in Colombia and its impact on the economy," *Journal of Airline and Airport Management*, vol. 5, pp. 39-66, 2015.
- [45] Díaz Olariaga, O. and Pulido, L. "Measurement of airport efficiency. The case of Colombia," *Transport and Telecommunication*, vol. 20, pp. 40-51, 2019.
- [46] Díaz Olariaga, O. and Zea, J.F. "Influence of the liberalization of the air transport industry on configuration of the traffic in the airport network," *Transportation Research Procedia*, 33, 43-50, 2018.
- [47] Aerocivil. Estadísticas aeronáuticas. Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/boletines-operacionales>, 2021.
- [48] Díaz Olariaga, O. and Carvajal, A.F. "Perspectiva geográfica del desarrollo de la conectividad aérea en Colombia," *Boletín Geográfico*, vol. 42, pp. 145-168, 2020.
- [49] Banco de la República de Colombia. Estadísticas. Recuperado: <https://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>, 2021.
- [50] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/>, 2021.
- [51] Díaz Olariaga, O. y Girón, E. "Análisis de la influencia de la privatización de aeropuertos en el pronóstico de la demanda de pasajeros. El caso de Colombia," *Revista Transporte y Territorio*, vol. 22, pp. 94-113, 2020.
- [52] Vang-Mata, R. *Multilayer Perceptrons: Theory and Applications*, Hauppauge (NY): Nova Science Pub. Inc., 2020.
- [53] Hastie, T.; Tibshirani, R. and Friedman, J. *The elements of statistical learning. Data mining, inference, and prediction*, New York: Springer, 2013.
- [54] Kingma, D and Ba, J. "Adam: A Method for Stochastic Optimization," arXiv:1412.6980 [cs.LG], 2014.
- [55] Dorffner, G. "Neural Networks for Time Series Processing," *Neural Network World*, vol. 4, pp. 447-468, 1996.
- [56] Aggarwal, C. *Neural Networks and Deep Learning*, Cham: Springer International, 2018.
- [57] Bianchi, F.; Maiorino, E.; Kampffmeyer, M.; Rizzi, A. and Jenssen, R. *Recurrent Neural Networks for Short-Term Load Forecasting*, Cham: Springer, 2017.
- [58] Blokdyk, G. *Recurrent neural network*, Brendale (Australia): The Art of Service, 2017.
- [59] Mandic, D. and Chambers, J. *Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability*, New York: Wiley, 2001.
- [60] Brownlee, J. *Deep Learning for Time Series Forecasting: Predict the Future with MLPs, CNNs and LSTMs in Python*, Machine Learning Mastery, E-book: Jason Brownlee, 2018.
- [61] Trifa, A.; Sbai, A. and Chaari, W. "Enhancing assessment of personalized multi-agent system through convlstm," *Procedia Computer Science*, vol. 112, pp. 249-259, 2017.
- [62] Yan, W.Q. *Computational Methods for Deep Learning*, Cham: Springer, 2020.
- [63] Hu, W.; Li, H.; Pan, L.; Li, W., Tao, R. and Du, Q. "Feature extraction and classification based on spatial-spectral ConvLSTM neural network for hyperspectral images," arXiv:1905.03577 [cs.CV], 2019.
- [64] Donahue, J., Hendricks, L., Guadarrama, S.; Rohrbach, M.; Venugopalan, S.; Darrel, T. and Saenko, K. Long-term Recurrent Convolutional Networks for Visual Recognition and Description. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Boston (MA), 2015.
- [65] Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. "Long short-term memory," *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780, 1997.
- [66] Shi, X.; Chen, Z., Wang, H.; Yeung, D., Wong, W. and Woo, W. "Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting," arXiv:1506.04214 [cs.CV], 2015.
- [67] Nair, V. and Hinton, G. "Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines," *27th International Conference on Machine Learning*. Haifa (Israel), 2010.

- [68] Goodfellow, I.; Bengio, Y. and Courville, A. *Deep learning*, Cambridge (MA): MIT Press, 2016.
- [69] Hassoun, M. *Fundamentals of Artificial Neural Networks*, Cambridge (MA): MIT Press, 1995.
- [70] Yi, Z and Tan. K. *Convergence Analysis of Recurrent Neural Networks*, Dordrecht: Springer, 2004.
- [71] Patterson, J. and Gibson, A. *Deep Learning: A Practitioner's Approach*, Sebastopol (CA): O'Reilly Media Inc., 2017
- [72] Kim, S. and Kim, H. "A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts," *International Journal of Forecasting*, vol. 32, pp. 669-679, 2016.
- [73] Ren, L. and Glasure, Y. "Applicability of the revised mean absolute percentage errors (mape) approach to some popular normal and non-normal independent time series," *International Advances in Economic Research*, vol. 15, pp. 409, 2009.
- [74] Chang, C. and Lin, C. "LIBSVM: A library for support vector machines," *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3), 1-27, 2011.
- [75] Gudmundsson, S.V.; Cattaneo, M. and Redondi, R. "Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of Covid-19," *Journal of Air Transport Management*, 91, 102007, 2021.
- [76] IATA. *Air Passenger Forecasts: Potential Paths for Recovery into the Medium and Long run*, Geneva: IATA, 2020.

Confort térmico en vehículos convencionales MCI y eléctricos VE: Métodos de evaluación

Bernardo José Mirones Gómez¹
Universidad de Valladolid
España

En los últimos años, con las tendencias de reducción de costos y de peso, el interés en asegurar una eficacia óptima de los vehículos se ha incrementado en un sentido amplio (confort, dinamismo, prestaciones y eficiencia energética). La construcción de vehículos se desarrolla desde una visión simplista a moderna, se integra las tecnologías de última generación, organizadas en criterios funcionales y estéticos, que aseguran el confort, la ergonomía y la seguridad de los ocupantes. El confort térmico en los vehículos representa una sensación subjetiva de equilibrio en el calor que se produce en el cuerpo humano, cuando los parámetros ambientales (aire temperatura, humedad del aire, temperatura radiante, velocidad del aire, nivel de actividad humano y aislamiento de la ropa) están en un rango de valores definidos. La Norma ASHRAE 55 define el confort térmico como *ese estado mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico*. En este trabajo se deja constancia, en términos de confort, de las diferencias que hay entre dos tecnologías de automóviles: el Vehículo Eléctrico VE y el Vehículo Térmico MCI, con motor de combustión interna alternativo, hasta ahora considerado como el vehículo convencional. Se centra en el análisis de los parámetros de confort térmico de los vehículos con el fin de mejorar los métodos de medición y establecer el confort térmico óptimo dentro de un vehículo, también se describe métodos de evaluación para un rápido diagnóstico del rendimiento del vehículo y la puesta en marcha de contramedidas. Se busca desarrollar y poner a punto un procedimiento de medida de la temperatura en la zona del parabrisas del automóvil, con respecto a la Norma Europea de desempañado CEE 78/317, mediante el uso de una cámara de termografía infrarroja de alta velocidad. El objetivo de este estudio es evaluar la eficacia de los sistemas de desempañado de parabrisas en vehículos eléctricos mediante el uso de técnicas de termografía y análisis de imágenes infrarrojas.

¹ Contacto: bjmirones@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Es de amplio conocimiento que el asunto Dieselgate golpeó duramente al Grupo Volkswagen y sacudió a todo el sector automotriz hasta sus raíces. Desde entonces, el panorama automotriz ha experimentado una reorganización completa y profunda. Aunque hoy en día todos los fabricantes avanzan hacia la electrificación, no lo hacen con los mismos activos ni con la misma estrategia. Desde Dieselgate hasta Diesel bashing, la movilidad del mañana parece estar construida sobre la base de *totalmente eléctrico*.

A finales de 2015 las ventas de motores diésel empezaron a caer bruscamente (entre un 30 y un 50%) en la mayoría de los países europeos, empezando por Alemania. Por su parte, las principales ciudades europeas tomaron la delantera en restringir y luego prohibir el diésel en 10 años. A raíz de esto, los propios países están elaborando los lineamientos de una prohibición gradual de la venta de vehículos con motor de combustión en su territorio. Esta prohibición tendrá lugar a gran escala entre 2030 y 2040 para la mayoría de los países e incluso, a partir de 2025, para Noruega.

Como resultado, Tesla se está aprovechando de la situación para tratar de alterar las reglas del nuevo campo de juego automotriz. En este contexto y en solo diez años, Tesla ha cambiado la cara del mercado automotriz. El enfoque del fabricante estadounidense es un gran avance en casi todos los aspectos: vehículos, servicios, marketing, etc.

Un enfoque que puede compararse con el de Apple en el mercado de la electrónica, basado en la promesa de una experiencia premium para el cliente. Esto parece estar dando sus frutos, ya que Tesla ha logrado superar las ventas de Mercedes en los EE.UU., Colocando a su Model 3 en el top 20 de ventas europeas y en el top 10 de ventas en Francia en marzo.

Recientemente, los principales fabricantes de automóviles han aumentado drásticamente sus ambiciones de movilidad eléctrica. En Europa, la búsqueda de CO2 y el futuro estándar de emisiones Euro-7 los están disuadiendo de invertir en motores de combustión.

General Motors ya ha anunciado que solo ofrecerá vehículos 100% eléctricos a partir de 2035. Hasta entonces, solo el mucho más pequeño Volvo se había atrevido a establecer ese calendario, que ahora incluso ha adelantado hasta 2030. A mediados de febrero, Jaguar Land Rover anunció que convertiría toda su flota en vehículos eléctricos para 2025, y que tendría una participación del 60 por ciento de vehículos eléctricos en las ventas de Land Rover para 2030.

Ford solo ofrecerá autos 100% eléctricos en Europa a partir de 2030. BMW también ha anunciado el fin de los motores de combustión para su marca Mini en 2030. Pero es sobre todo el gran cambio de Volkswagen lo que ha impactado a los consumidores. El gigante alemán ahora estima que los vehículos eléctricos representarán el 60% de sus ventas en Europa a finales de la década y el 50 por ciento en todo el mundo.

Por su parte, la ONU proyecta que el 68% de la población mundial vivirá en áreas urbanas para 2050. Por lo tanto, la gestión exitosa del crecimiento urbano es fundamental para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible. Muchas ciudades están buscando sistemas de movilidad integrados y digitalizados, en un esfuerzo por mejorar las opciones y la equidad para los ciudadanos y reducir la congestión y los impactos ambientales.

Este panel discutirá cómo las ciudades están navegando por las opciones de movilidad futuras y cómo garantizar que tomen las mejores decisiones dada la gran cantidad de actores y soluciones. También analizará el papel del ciudadano en la configuración de la movilidad futura de una ciudad. Los líderes de la industria discutirán los beneficios que perciben de un enfoque de ecosistema más colaborativo y liderado por la empresa para brindar soluciones para la ciudad.

En la Figura 1 se observa los impactos en la temperatura global previstos para 2050 en función de la evolución de CO2. Mientras que en la Figura 2 se muestra el impacto en la Salud (muertes prematuras) en el G20 en 2015 debido a la baja calidad del aire.

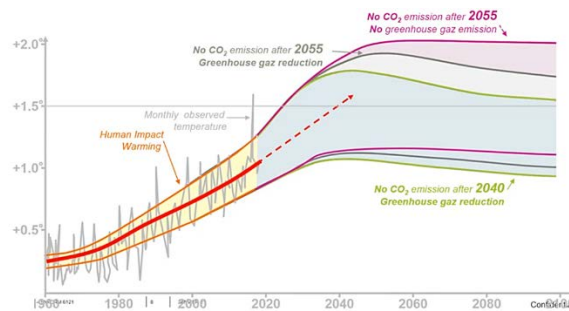


Figura 1. Impactos en la temperatura global previstos para 2050

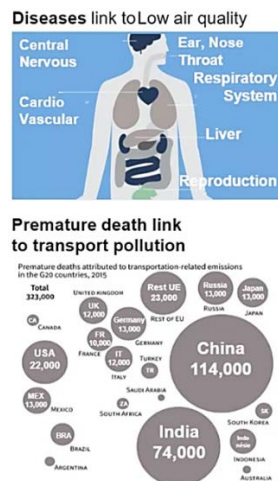


Figura 2. Muertes prematuras en el G20 en 2015

2. MARCO DE REFERENCIA

En este estudio, se tiene como objetivo evaluar la eficacia de los sistemas de desempañado de parabrisas en vehículos eléctricos mediante el uso de técnicas IR de termografía y análisis de imágenes infrarrojas. La termografía permite obtener información objetiva (valores de temperatura) en relación con el estado del parabrisas, a diferencia de otros estudios en los que la evaluación del confort térmico en el interior de las cabinas de los vehículos se basa en evaluaciones subjetivas.

Debido a la utilización de otros métodos, como los termómetros digitales y cristales líquidos, hay relativamente pocos trabajos anteriores donde se utiliza la termografía de infrarrojos para la evaluación de la temperatura o el confort térmico en el interior de las cabinas de los vehículos.

3. MÉTODO

Para el desempañado del parabrisas se aplica el siguiente procedimiento:

1. Antes de la prueba se desengrasará completamente la superficie interior del parabrisas con alcohol metílico o un producto desengrasante equivalente. Después de seca, se aplicará una solución de amoníaco entre el 3 y el 10 %. Se dejará secar la superficie y se usará luego un trapo de algodón seco.
2. La prueba se realizará en una cámara de acondicionamiento lo suficientemente grande como para contener el vehículo completo y apta para producir y mantener una temperatura de prueba de -3 ± 1 °C durante todo el tiempo que dure la misma.
3. La temperatura del local de prueba se medirá a media altura del parabrisas en un punto tal que el calor desprendido por el vehículo probado no pueda afectarla sensiblemente.
4. La cubierta del motor, las puertas y las aberturas de aireación, exceptuando los orificios de entrada y de evacuación del dispositivo de calefacción y de ventilación, deberán estar cerrados; si el constructor lo solicitare una o dos ventanas podrán estar abiertas desde el comienzo de la prueba de desempañado, a una altura total que no sobrepase los 25 mm.

5. La superficie interior del parabrisas se limpiará y se colocará el vehículo en la cámara de acondicionamiento. Se bajará la temperatura del aire ambiente hasta que la temperatura del líquido de refrigeración del motor, de los lubricantes y la del aire en el interior del vehículo se hayan estabilizado a -3 ± 1 °C.
6. Un minuto después de que el observador o los observadores hayan entrado en el vehículo, se pondrá el motor en funcionamiento según las prescripciones del constructor. La duración de la prueba se contará a partir de la puesta en marcha del motor.
7. Durante todo el tiempo que dure la prueba, el motor deberá funcionar a un régimen que no sobrepase el 50% del régimen de máxima potencia; el mando del dispositivo de desempañado del vehículo se regulará de acuerdo con las recomendaciones del constructor del vehículo para la temperatura de prueba; la batería deberá estar completamente cargada; y al final de la prueba se tomará nota del contorno de la zona desempañada

Cámara Termográfica:

- InfraTec ImageIR
- Software: IRBIS 3 Professional
- Lentes: 100 mm + 500 mm
- Resolución espacial mínima de 30 m
- Tamaño de las imágenes: 320 x 256 pixels.
- Velocidad: 1000 fps
- Resolución: 30 mK @ 30 °C
- Tiempos de integración de 1 s a 10 ms

Comprobamos que todo el parabrisas del auto está a -2°C , arrancamos el Motor, cerramos todos los aireadores salvo los de desempañado parabrisas, cerramos todas las puertas y portón, comenzamos el ensayo $t=0$ en el momento justo de arrancar del motor (Figura 3).

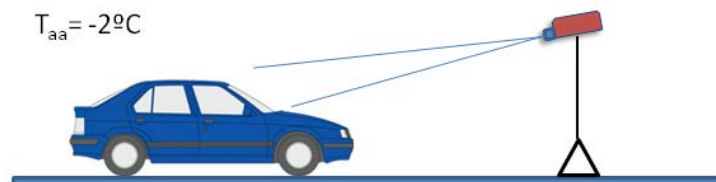


Figura 3. Esquema del Ensayo

Ensayo realizado sobre 3 vehículos: uno dotado con motor térmico convencional ICE, un VE dotado de resistencia y un VE dotado de bomba de calor. La temperatura media en el parabrisas al inicio del Ensayo es de -2°C (Se cumple la Normativa Europea CEE78/317, que exige entre -1°C Y -3°C) (Figura 4).

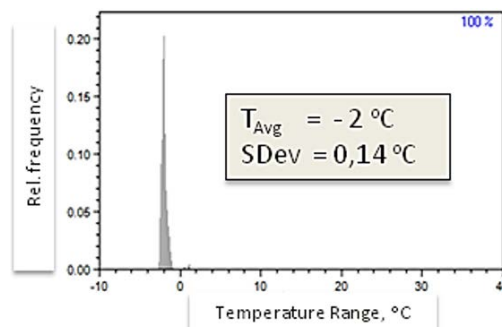


Figura 4. Temperatura media en el parabrisas

4. RESULTADOS

En la Figura 5 se muestra un ejemplo ilustrativo con los resultados al minuto 5, ICE Térmico.

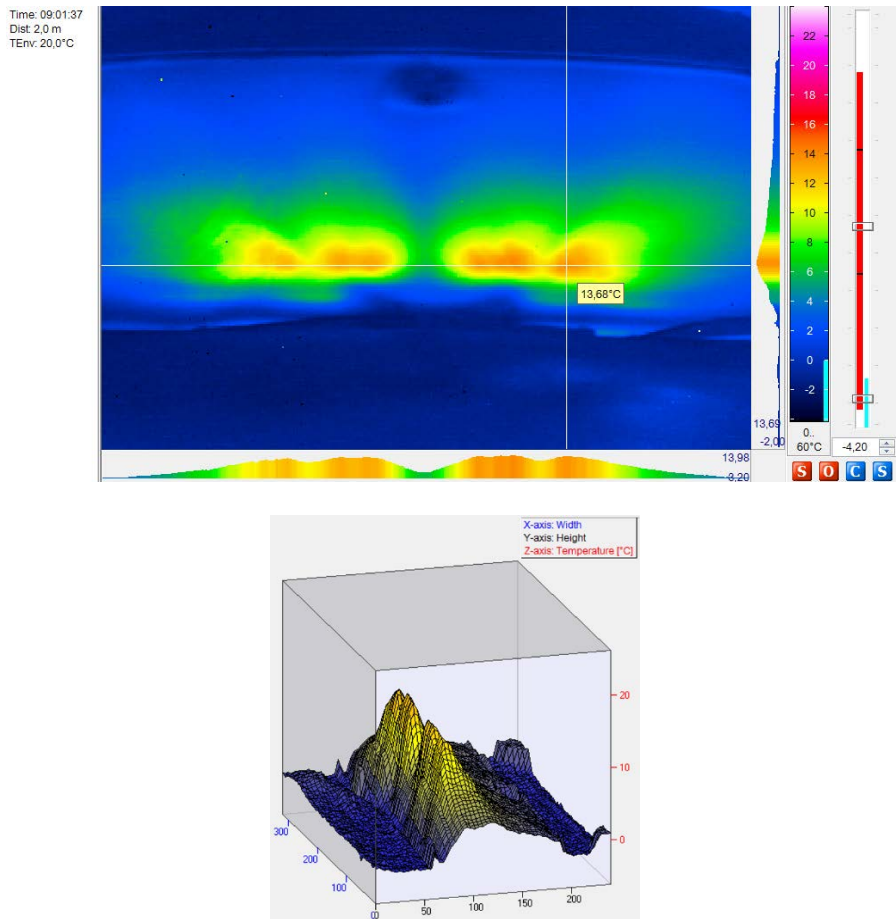


Figura 5. Imagen 2D y 3D del Mapa de temperatura en el parabrisas: Min. 5, ICEV

En la Figura 6 se observa al minuto 20 que toda la superficie está a $>10^{\circ}$, la temperatura interior es incluso de calor. Se muestran las gráficas de la temperatura del parabrisas a lo largo del tiempo del ensayo.

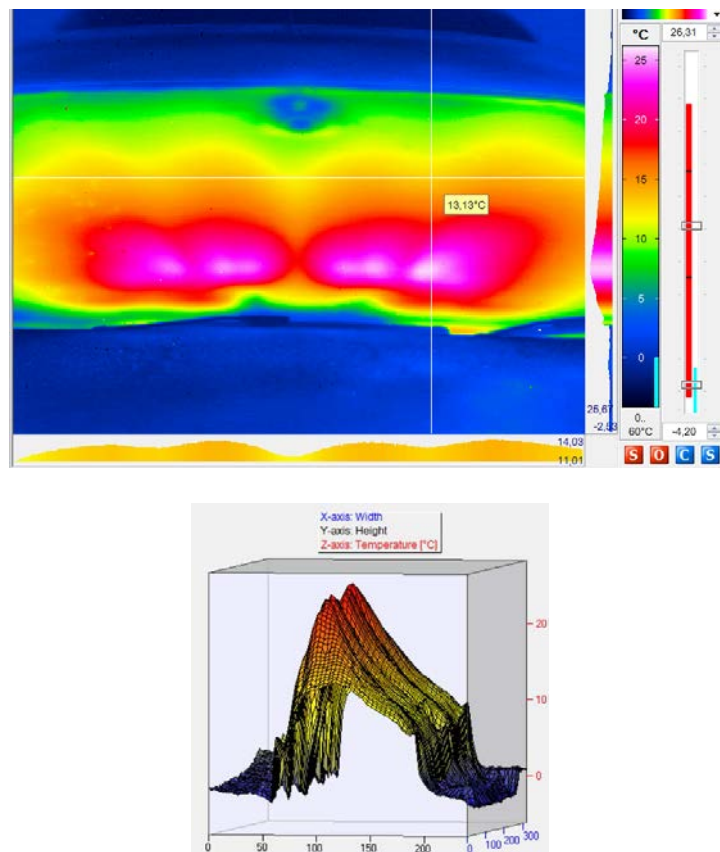


Figura 6. Imagen 2D y 3D del Mapa de temperatura en el Parabrisas: Min. 20, ICEV

Haciendo un gráfico resumen por temperatura media, máxima y mínima en el área R1, durante los 20 minutos que dura el Ensayo, obtenemos lo que muestra la Figura 7.

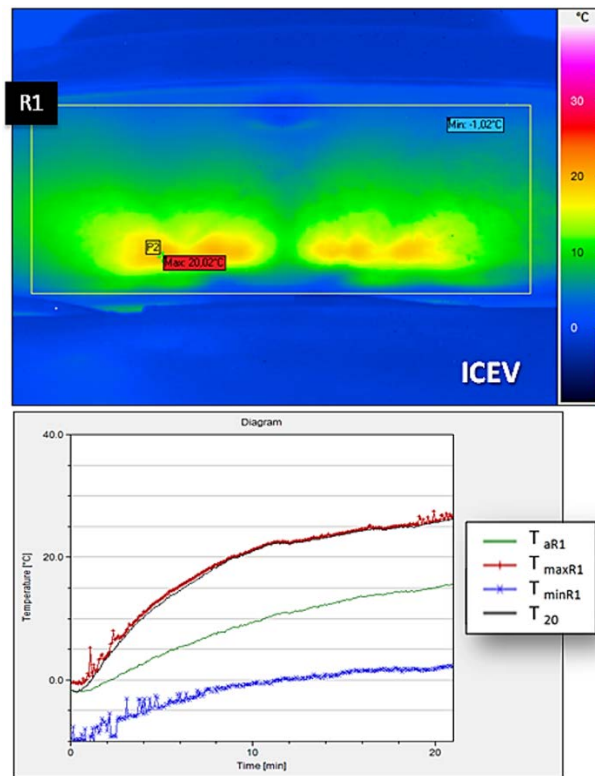


Figura 7. Temperatura media, máxima y mínima en el área R1: Min. 20, ICEV

Haciendo el mismo gráfico resumen por temperatura media, máxima y mínima en el área R1, durante los 20 minutos que dura el Ensayo para el Auto Eléctrico con Calefacción por Resistencia, el resultado se observa en la Figura 8.

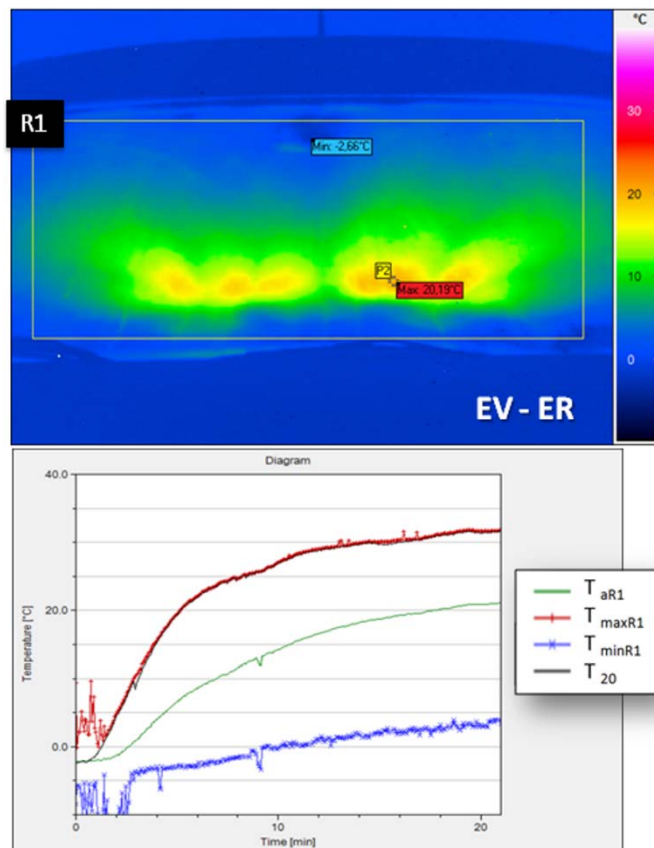


Figura 8. Temperatura media, máxima y mínima en el área R1: Min. 20, EV con ER

Haciendo el mismo gráfico resumen por Temperatura media, máxima y mínima en el área R1, durante los 20 minutos que dura el Ensayo, obtenemos lo siguiente para el Auto Eléctrico con Calefacción por Bomba de Calor (Figura 9).

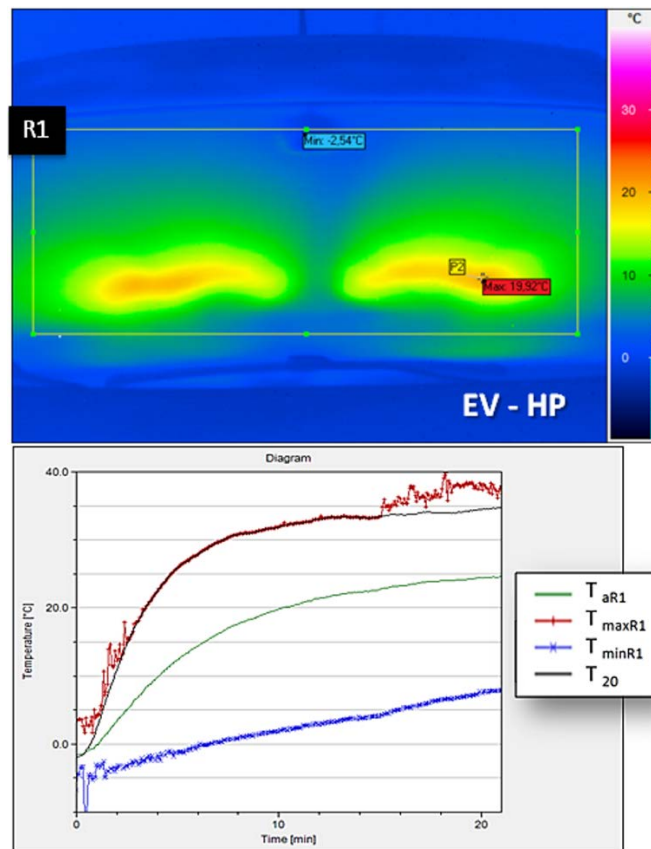


Figura 9. Temperatura media, máxima y mínima en el área R1: Min. 20, EV con HP

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Podemos ver en estas medidas Termográficas que el vehículo más eficiente en la función desempañado es el VE (con bomba de calor), nos apoyamos en los siguientes datos para dejarlo patente: Realizamos una comparativa de Temperatura-tiempo de los 3 modelos por Temperatura media, resaltando el tiempo en alcanzar los 10°C en el área R1 Parabrisas (Figura 10).

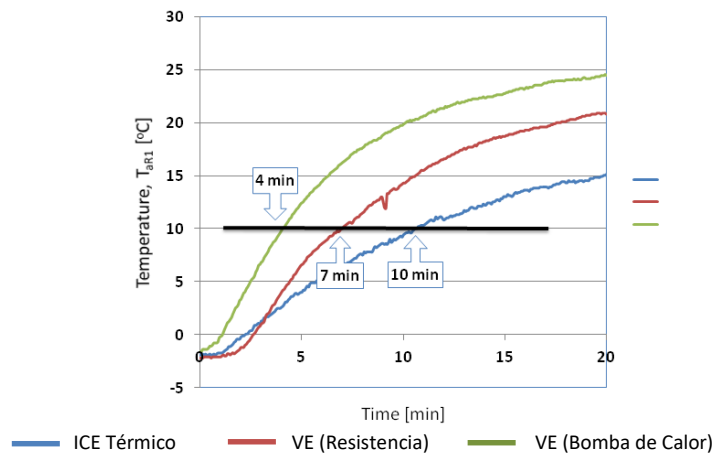


Figura 10. Comparativa de Temperatura-tiempo de los 3 modelos por T media, resaltando el tiempo en alcanzar los 10°C

Por último, estas 2 gráficas que muestran de manera más patente si cabe que la eficiencia de desempañado es VE-HP > VE - R > ICE, en ella se ve el porcentaje del área R1 cuya Temperatura está por encima de un determinado valor a t=10 min (Figura 11); este % es acumulativo, es decir, es la suma de las áreas cuya Temperatura está por encima de una Temperatura determinada en porcentaje (Figura 12).

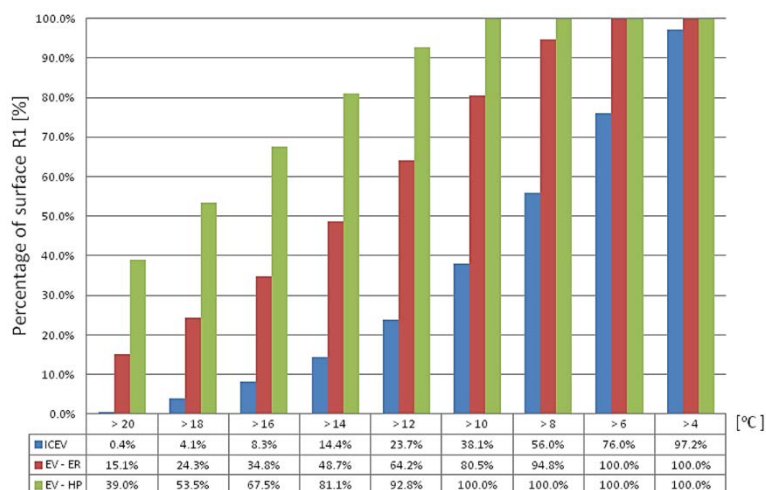


Figura 11. Porcentaje del área R1 cuya Temperatura está por encima de un determinado valor a t=10 min

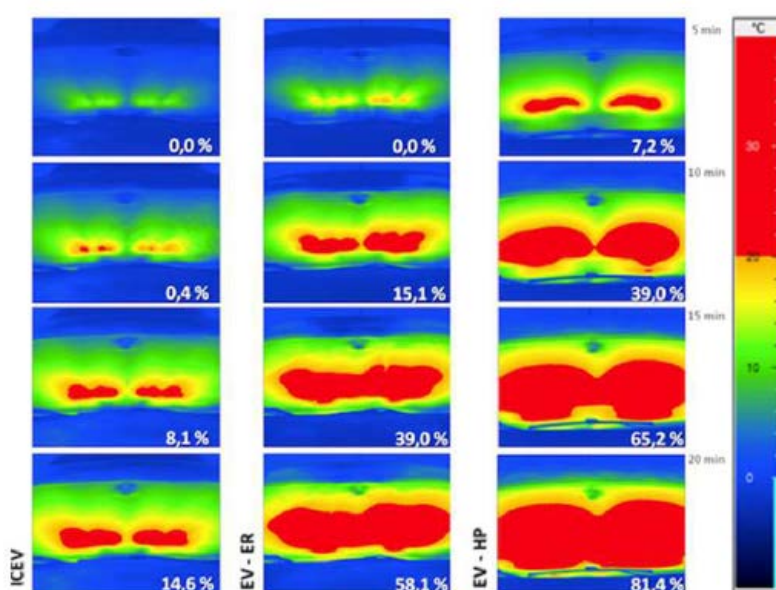


Figura 12. Imagen de la Temperatura que está por encima de un determinado valor a t=10 min para cada tipo de vehículo: ICE -EV/ER – EV/HP

6. CONCLUSIONES

La Termografía IR demuestra la pertinencia de utilizar este medio como útil de análisis y validación en la homologación de la prestación de descongelado/desempañado de los vehículos para la UE (según Normativa actual CEE 87/318) [1-3].

Los vehículos eléctricos testeados son más eficientes en la labor de desempañado que el vehículo térmico.

De los 2 vehículos eléctricos testeados, el VE equipado de una bomba de calor es más eficiente que el VE equipado de resistencia PTC.

El rango (o Autonomía de la batería) perdido en este ensayo es del orden de un 25 % para el VE con resistencia PTC y del 20% para el VE con bomba de calor, esto, teniendo medida general de la temperatura de inicio del ensayo: la Temperatura media es de -2°C: acorde a la Normativa Europea CEE78/317, que exige entre -1°C Y -3°C en cuenta la poca Autonomía de la que disfrutaban ya estos automóviles, hacen de este punto un gran lastre en la satisfacción del cliente.

En conclusión, el vehículo eléctrico disfruta de un mayor confort térmico respecto a su equivalente de combustión, pero al mismo tiempo exige un trabajo más exigente en la *no pérdida* del rango o Autonomía que *sacrificamos* en este confort, con amplias posibilidades de afinar uno respecto al otro.

REFERENCIAS

- [1] Shutty, J.; Wenzel, W.; Becker, M.; Bohan, S.; Kowalske, G., "Advanced Thermal Management for a Light Duty Diesel Vehicle". Submitted for publication at the SAE World Congress, 2013.
- [2] Friedrich, H.; Schier, M.; Häfele, C.; Weiler, T., "Electricity from Exhausts – Development of Thermo electric Generators for Use in Vehicles, *ATZ Worldwide* 112, No. 4, pp. 48-54. 2010.
- [3] Liebl, J.; Neugebauer, S.; Eder, A.; Linde, M.; Mazar, B.; Stütz, W., "The Thermoelectric Generator from BMW is Making Use of Waste Heat", *MTZ Worldwide* 70, No. 4, pp. 4-11, 2009.

Caracterización de las emisiones de los Ground Support Equipment GSE en aeropuertos. Caso de estudio: Aeropuerto de San Andrés, Colombia

Lucas Sznajderman¹

Oscar Díaz Olariaga²

Juan Ignacio D'Iorio³

Alejandro Di Bernardi⁴

^{1,3,4} *Universidad Nacional de La Plata*
Argentina

² *Universidad Santo Tomás*
Colombia

Las emisiones de los vehículos de apoyo (o servicio) a las aeronaves que operan en las plataformas en los aeropuertos (lado aire), denominados formalmente Equipo de Apoyo en Tierra GSE, se producen por una serie de factores que dependen principalmente de: llegadas y salidas de aeronaves y el tiempo de permanencia en los estacionamientos, el tipo de aeronave, el tipo de operación (tradicional, con escala o bajo costo), la disposición geométrica de la plataforma y las características de la flota, incluyendo potencia y años de uso, entre otros. El objetivo de este trabajo es utilizar un modelo integrado (desarrollado por los autores) que identifique los GSE requeridos y las emisiones gaseosas que producen debido al tráfico en plataforma y en su servicio a las aeronaves. El modelo se aplica a un caso de estudio concreto: el Aeropuerto de San Andrés, Colombia.

¹ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: lucas.sznajderman@ing.unlp.edu.ar

² Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

³ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: juanignacio.diorio@ing.unlp.edu.ar

⁴ Ingeniero Aeronáutico.

Contacto: cadibern@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Las aeronaves, automóviles, camiones y otros vehículos que operan en el aeropuerto generan emisiones como resultado de la combustión. Los motores de las aeronaves producen, principalmente, dióxido de carbono CO₂ - aproximadamente el 70% del total de los gases de escape -, y vapor de agua H₂O - cerca del 30% -; menos del 1% restante está compuesto por óxidos de nitrógeno NO_x, óxidos de azufre SO_x, monóxido de carbono CO, hidrocarburos parcialmente quemados o no quemados HC, y material particulado PM [1].

Generalmente, alrededor del 10% de los contaminantes de los aviones se emiten cerca de la superficie de la tierra (menos de 3000 pies sobre el nivel del suelo). El CO y los HC se comportan de diferente manera, ya que se producen cuando los motores de las aeronaves funcionan con su eficiencia de combustión más baja, lo que hace que se dividan aproximadamente un 30% por debajo de los 3000 pies y un 70% por encima [2].

Las aeronaves no son la única fuente de emisiones en los aeropuertos. Los vehículos de acceso al mismo y de apoyo en tierra (lado aire) queman generalmente combustibles fósiles y producen emisiones similares. Esto incluye, por un lado, el tráfico hacia y desde el aeropuerto, y por otro (en el lado aire), los buses y furgonetas que sirven a los pasajeros y los vehículos de asistencia a las aeronaves GSE. Otras fuentes de emisiones comunes en el aeropuerto incluyen unidades de energía auxiliar APU, que proporcionan electricidad y aire acondicionado a las aeronaves estacionadas en plataforma, fuentes de energía estacionaria del aeropuerto y equipos de construcción [3]. En la Tabla 1 se identifican las fuentes según gas emitido en el entorno aeroportuario.

Tabla 1. Emisiones de la aviación en los aeropuertos, todas ellas impactando negativamente en la calidad del aire

Emisión	Fuente
CO ₂	Aeronaves, APU, GSE, Vehículos, Plantas de energía, Equipos de construcción
NO _x	Aeronaves, APU, GSE, Vehículos, Plantas de energía, Equipos de construcción
HC	Aeronaves, APU, GSE, Vehículos, Plantas de energía, Equipos de construcción
CH ₄	APU, GSE, Vehículos, Plantas de energía, Equipos de construcción
CO	Aeronaves, GSE, Vehículos, Equipos de construcción
SO _x	Aeronaves, APU, GSE, Equipos de construcción
Material Particular (PM) (no volátil)	Aeronaves, APU, GSE, Vehículos, Plantas de energía, Equipos de construcción

El modelo aquí utilizado (elaborado por los autores) para el desarrollo de los objetivos es uno integrado que identifica las GSE requeridas y las emisiones gaseosas que producen debido al tráfico en plataforma y en su servicio a las aeronaves [4]. Para ello, en el caso de servicio, el modelo propone considerar carga y descarga y dividir las en las siguientes etapas: espera, conexión, servicio y desconexión.

El modelo genérico desarrollado se puede aplicar cuando se conocen los movimientos de las aeronaves o las condiciones y políticas de demanda de las aeronaves, así como las características físicas del aeropuerto. Además, existen varios requisitos para que el análisis sea exhaustivo, como conocer los horarios de llegada y salida, junto con el estacionamiento de cada aeronave, tipo de vuelo, porcentaje de ocupación y modelo de aeronave, entre otros.

En la presente investigación la caracterización de las emisiones de los GSE se llevará a cabo a partir de las operaciones demandadas en el Aeropuerto de San Andrés, tomándolo como caso de estudio. En el mismo el modelo aquí utilizado parametriza la plataforma, a fin de calcular las distancias recorridas por cada vehículo y los tiempos que esto requiere. A su vez, se cuantifican las emisiones por servicio a cada aeronave según tipo y puesto de estacionamiento (identificando el uso o no de manga).

2. MARCO REFERENCIAL

En las últimas dos décadas la academia ha aportado un número importante de investigaciones en lo que se refiere al impacto, cálculo, estimación, y otros estudios (p.e. huellas de carbono), de las emisiones generadas por la aviación, tanto de forma global (como industria) y a nivel mundial y/o regional, acotado a los aeropuertos y/o zonas de influencia cercana a los mismos.

En relación a este último grupo, en el cual se encuadra el presente trabajo, se puede afirmar que, aunque la temática es muy similar en la mayoría de los trabajos, la principal diferencia radica en dónde se realiza el análisis (el caso de estudio, es decir, país, región, ciudad, aeropuerto); se identifican, sin embargo, ciertas diferencias en los planteamientos:

1. Cálculo y estimación de la calidad del aire en el aeropuerto debido a las emisiones de las aeronaves en ciertas operaciones en tierra [5, 6].
2. Cálculo de las emisiones de las aeronaves en su operación por debajo de los 3000 pies, incluidos los ciclos de despegue y aterrizaje LTO [7-11]
3. Influencia de las frecuencias del vuelo en la polución del aire en la zona aeroportuaria, en especial, la emisión de material particulado [12].
4. Análisis general, a nivel país, de los efectos ambientales (p.e. calidad del aire) generados por la aviación en la red nacional de aeropuertos [13, 14]
5. Estudio del impacto en la calidad del aire en la zona aeroportuaria (externa) debido a las emisiones de diferentes fuentes tanto dentro del aeropuerto como fuera del mismo (p.e. el acceso terrestre) [15].
6. Análisis del impacto de las emisiones, en especial del material particulado (generadas por las aeronaves en los aeropuertos), en la salud de la población [16].
7. Identificación y cálculo de la huella de carbono resultado de las emisiones en el aeropuerto [17].
8. Cálculo de las emisiones y polución del aire debido a los ciclos de despegue y aterrizaje LTO de aeronaves en el aeropuerto [18-21].
9. cálculo de las emisiones y polución del aire debido a los ciclos de despegue y aterrizaje LTO de aeronaves en el aeropuerto como así también por parte de equipos de apoyo en tierra, fuentes estacionarias y vehículos (de servicio) en tierra en el lado aire del aeropuerto [22].
10. Cálculo de las emisiones de la APU de las aeronaves en tierra (en el aeropuerto) [23].
11. Desarrollo de inventario de emisiones de las aeronaves en su ciclo de despegue y aterrizaje LTO, de las APUs de las aeronaves, de los vehículos de servicio, o de asistencia, en tierra [24, 25].

Se puede destacar que muy pocas publicaciones presentan la temática que aborda el presente trabajo, es decir, la caracterización de las emisiones de gases contaminantes derivados de la utilización de los vehículos de asistencia a las aeronaves GSE en el aeropuerto.

3. MÉTODO

La metodología del cálculo para el procesamiento de datos consta de dos etapas: la primera estudia la circulación de los vehículos en plataforma y la segunda consiste en la suma del aporte contaminante debido a la discretización de tiempos de servicio según el proceso de espera, conexión, servicio (realización de la tarea en sí) y desconexión de los equipos GSE. Si bien se trata de una metodología de carácter secuencial, el análisis de la flota operativa puede realizarse en paralelo con la caracterización de los vehículos de asistencia en tierra. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada una de las etapas de la metodología, según el esquema de la Figura 1.



Figura 1. Esquema descriptivo básico de la metodología [4]

3.1 Identificación del día bajo análisis, servicio y puesto

El punto de partida de la metodología es el análisis de los movimientos de las aeronaves en los emplazamientos aeroportuarios. Teniendo en cuenta que la cantidad de vehículos de asistencia en tierra

varía dependiendo del tipo de aeronave, se lleva a cabo un análisis de la flota operativa interviniente en un día tipo a definir.

El análisis en cuestión consta en identificar las aeronaves, arribos y partidas, y puesto de estacionamiento. Además, se propone una caracterización de las aeronaves para vuelos origen-destino con y sin pasarela telescópica. Se omiten posibles vuelos de escala y los llamados de bajo costo LCC. Esta información provee fundamentalmente la cantidad y tipos de GSE requeridos para brindar a la demanda generada.

La identificación del tipo de servicio permite detectar qué vehículos GSE intervienen en cada proceso. A continuación, en la Tabla 2, se identifican los diferentes vehículos de asistencia en tierra intervinientes según el tipo de servicio que brinde a la aeronave.

Tabla 2. Denominación de cada GSE e identificación del uso o no según tenga o no pasarela [4]

GSE	Ground Support Equipment	Origen - Destino	
		Pasarela	Remoto
GPU	Ground Power Unit	✓	✓
CAT	Catering	✓	✓
TUG	Tow Tractor / Tractor de remolque	✓	✓
BAG	Baggage / Tractor de remolque de equipaje	✓	✓
BEL	Belt Loader / Cinta de carga	✓	✓
WAT	Water truck / Camión agua potable	✓	✓
LAV	Lavatory / Vehículo de aguas residuales	✓	✓
FUE	Fuel / Vehículo cisterna de combustible	✓	✓
STA	Passenger stairs / Tractor remolque escalera	-	✓
BUS	Bus	-	✓
CLE	Cleaning / vehículo de limpieza	✓	✓

Se observa que, por consideración de los autores, los únicos vehículos que no se tienen en cuenta con el uso de la pasarela son los asociados a la movilidad de los pasajeros (bus y escalera de acceso a la aeronave). La cantidad de vehículos por operación dependerá exclusivamente del servicio y el tipo de aeronave que se estudie.

3.2 Caracterización de la plataforma

La determinación de los recorridos de los equipos depende en gran medida de la ubicación de su base. La misma debería ser emplazada estratégicamente, en la medida en lo posible, de forma tal que los equipos recorran las mínimas distancias posibles.

La caracterización de una plataforma no solo está asociada a la configuración geométrica e identificación de puestos de estacionamiento para aeronaves, sino también a la determinación de puestos de estacionamiento de los GSE y sus respectivas bases.

Los emplazamientos aeroportuarios cuentan con diversas áreas destinadas al estacionamiento y a la circulación de vehículos de apoyo en tierra. Identificar la disposición de estos puestos de estacionamiento y las zonas permitidas para la circulación resulta de gran importancia ya que permite la determinación de las trayectorias asociadas a cada uno de los vehículos. Dicha caracterización deviene beneficiosa para la estimación de los tiempos de circulación en plataforma.

3.3 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos, la caracterización de los GSE resulta primordial a la hora de determinar el aporte contaminante generado por los mismos. Se definirán entonces las siguientes características que servirán de *inputs* al modelo como:

- Años de uso de los GSE para cuantificar el factor de deterioro.
- Factor de carga para circulación y servicio.

- Tiempos de servicio de cada GSE según aeronave.
- Factor de emisión.
- Potencia.
- Velocidad de circulación.

Una vez definidas las vías de circulación y los procedimientos de actuación de los vehículos GSE en relación con los movimientos de las aeronaves, se procede a determinar el aporte contaminante gaseoso e identificar los vehículos requeridos para la demanda por medio de un modelo empírico utilizado en la presente investigación [4]. La cuantificación de las emisiones se calcula con las ecuaciones (1) y (2).

$$E_{i,l} = P_i \cdot FE_{i,l} \cdot f_{d_t} \cdot \sum_{j=1}^8 (f_{c_j} \cdot t_j)_i \quad (1)$$

Donde:

$E_{i,l}$: Emisión gaseosa del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l'. [g] o [kg] producto del servicio

P_i : Potencia al freno del equipo GSE 'l', [HP]

$FE_{i,l}$: Factor de emisión del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l', $\left[\frac{g}{HP \cdot h}\right]$ o $\left[\frac{kg}{HP \cdot h}\right]$.

f_{c_j} : Factor de carga del equipo GSE por cada tiempo discretizado 'j', según operación de carga y descarga, adimensional.

f_{d_t} : Factor de deterioro del equipo GSE 'l', adimensional.

t_j : Tiempos discretizados de los GSE en la espera, conexión, servicio y desconexión para la carga y descarga, en unidades [h].

$$E_{i,l} = P_i \cdot FE_{i,l} \cdot f_{d_l} \cdot f_{c_l} \cdot \frac{1}{v_l} \cdot d_l \quad (2)$$

Donde:

$E_{i,l}$: Emisión gaseosa del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l'. [g] ó [kg] producto de la circulación

P_i : Potencia al freno del equipo GSE 'l', [HP]

$FE_{i,l}$: Factor de emisión del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l', $\left[\frac{g}{HP \cdot h}\right]$ o $\left[\frac{kg}{HP \cdot h}\right]$.

f_{c_l} : Factor de carga del equipo GSE por circulación 'l', para ida y vuelta, adimensional.

f_{d_l} : Factor de deterioro del equipo GSE 'l', adimensional.

v_l : velocidad de circulación del GSE 'l', constante de 15 km/h

d_l : distancia por tramo de ida y vuelta para el GSE 'l'

Durante los procedimientos de circulación en plataforma, los vehículos de asistencia en tierra no trabajan a la máxima potencia. Por esta razón se emplean factores de carga que ajustan la potencia al freno de los equipos hasta dar con la potencia media de funcionamiento.

Los factores de emisión representan la cantidad de producto de combustión quemado por unidad de potencia por hora para un vehículo certificado con un motor nuevo, es decir, la cantidad de emisión contaminante en un tiempo determinado de servicio a una determinada potencia de operación. Los mismos son obtenidos de la base de datos del software AEDT 2.b que utiliza el reporte técnico de la EPA's NONROAD [26] el cual contempla el tipo de GSE: modelo y regulación gaseosa por tipo de motor correspondiente.

El factor de deterioro es utilizado para corregir los factores de emisión. Como los motores no son completamente nuevos, los niveles de emisión aumentan en relación a los años de uso que hayan tenido los equipos. Para cuantificar estos valores adimensionales, se esgrime la ecuación (3) definida por el software EDMS y avalado por la FAA [27] y que utiliza el AEDT.

$$f_d = 1 + A \cdot \left(\frac{GSE_{año}}{GSE_{vida\ útil}} \right)^b \quad (3)$$

Donde:

$GSE_{año}$ [años]: Años en servicio del equipo GSE.

$GSE_{vida\ útil}$ [años]: Vida útil del equipo GSE.

A, b [adimensionales]: Coeficientes de ajuste, dependientes del contaminante gaseoso y el rango de potencia.

De acuerdo al manual de operaciones de rampa Aerolíneas Argentinas [28], la velocidad máxima en plataforma operativa es de 20 km/h. Las distancias de traslado dependen de los procedimientos que realizan los distintos tipos de vehículos GSE, los puestos o áreas de estacionamiento GSE (fijos o temporales), la disponibilidad de equipos para brindar servicio y la asignación de puestos de estacionamiento de aeronaves. Dichas distancias repercuten directamente en los niveles de contaminación.

3.3.1 Características operativas de los GSE

Las variables presentadas en la ecuación del modelo que contempla las emisiones tanto por servicio como por circulación dependen a su vez de una serie de características operativas, a continuación, se mencionan algunas de ellas:

- *Tipo de servicio*: si el servicio es FSC todos los GSE estarán brindando el servicio a la aeronave. En cambio, si es LCC algunos vehículos pueden no llegar a tenerse en cuenta.
- *Aeronave*: la característica de la aeronave en cuanto a tamaño y cantidad de pasajeros, influye directamente en la cantidad de buses, además de cantidad y capacidad de otros GSE.
- *Horarios de arribo y partida*: el tiempo en el puesto de estacionamiento influye directamente en la asignación de los GSE tanto para brindar el servicio de descarga una vez que estaciona como la carga previa a la salida.
- *Tipos de procedimientos*: a fines prácticos, el presente estudio tiene en cuenta la clasificación de cada GSE en distintos tipos de procedimientos (A, B y C) según funciones específicas (Tabla 3).
 - *Procedimiento tipo A*: de acuerdo con la disponibilidad del equipo se puede simular que se traslada entre puestos de estacionamiento temporales (ESA) dependiendo de la cantidad de puestos de aeronave en caso de ser posible, y sino de su puesto base.
 - *Procedimiento tipo B*: este grupo vehicular siempre tiene que volver a un área de operaciones fija definida después de brindar el servicio a la aeronave, por lo tanto, es sencillo calcular su distancia de traslado debido a que el equipo se dirige hacia cada puesto de estacionamiento de aeronaves y vuelve a su área fija definida antes de trasladarse a otra aeronave.
 - *Procedimiento tipo C*: como estos equipos cuentan con un puesto de estacionamiento fijo se puede estimar sus distancias de traslado dependiendo del primer arribo y luego la posibilidad de una secuencia de servicio para tres aeronaves más, aunque depende de la capacidad de carga, antes de volver a su puesto de estacionamiento fijo para reabastecerse o descargar residuos.

Tabla 3. Tipos de Procedimiento según puestos de estacionamiento de vehículos GSE

Procedimiento	GSE	Puesto de estacionamiento
A	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cinta transportadora ▪ Remolque de aeronaves (TUG) ▪ Tractor para GPU ▪ Escalera de pasajeros ▪ Limpieza aguas residuales ▪ Abastecimiento Agua Potable 	Ubicados en área de espera (ESA) de acuerdo con sus tiempos de servicio por aeronave. *
B	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tractor carga de equipaje ▪ Bus MR (movilidad reducida) ▪ BUS 	Área de estacionamiento fija. **
C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Camión catering ▪ Camión cisterna de combustible 	Para catering. *** El camión cisterna tiene puestos de estacionamientos asignados en la planta de combustible dentro del predio aeroportuario.

* La secuencia de circulación en plataforma depende de la disponibilidad de cada grupo vehicular de servicio.

** Se elige de tal manera que lo óptimo es que el equipo esté siempre en movimiento entre este punto y cada puesto de estacionamiento de aeronave.

*** Los vehículos tienen una capacidad de carga mayor, de tal manera que estos salen del puesto de estacionamiento y pueden brindar un servicio a mayor cantidad de aeronaves.

Para la cuantificación de las emisiones, es necesario caracterizar los GSE según las variables que hacen al cálculo, como se propone en las ecuaciones previas. En la Tabla 4 se observa los valores según potencia, factor de emisión y deterioro; y en las Tablas 5 y 6 los factores de deterioro y parámetros asociados.

Tabla 4. Valores potencia para los GSE y los factores de emisión por gases analizados [26]

GSE	HP	Factor de emisión gr/HP.h					
		CO2	CO	HC	Nox	Sox	PM
GPU	194	262	0,96	0,30	4,13	0,05	0,25
CAT	210	262	0,45	0,20	1,04	0,04	0,07
TUG	88	262	1,50	0,33	4,49	0,05	0,29
BAG	71	262	3,87	0,37	4,26	0,06	0,50
BEL	71	262	2,55	0,38	4,54	0,06	0,40
WAY	235	262	0,80	0,29	2,90	0,05	0,13
BUSr	175	262	0,11	0,13	2,50	0,22	0,17
LAV	175	262	0,73	0,27	2,71	0,05	0,10
FUE	320	262	0,61	0,25	2,18	0,05	0,06
STA	65	262	0,80	0,29	2,89	0,05	0,13
BUS	175	262	0,11	0,13	2,50	0,22	0,17
CLE	235	262	0,65	0,26	2,42	0,05	0,07

Tabla 5. Tiempos en servicio y de vida útil de los equipos GSE [29]

GSE	Tiempo en servicio [años]	Vida útil [años]
CAT	7	10
LAV	7	13
WAT	7	10
TUG	7	13
BEL	7	11
BUS	7	10
STA	7	14
GPU	7	14
FUE	7	14

Tabla 6. Factor de deterioro según GSE y gases analizados [29]

GSE	Factor de deterioro					
	CO2	CO	HC	NOX	SOx	NOx
CAT	1	1,090	1,016	1,005	1	1
LAV	1	1,069	1,012	1,004	1	1
WAT	1	1,090	1,016	1,005	1	1
TUG	1	1,069	1,012	1,004	1	1
BEL	1	1,082	1,015	1,004	1	1
BUS	1	1,090	1,016	1,005	1	1
STA	1	1,064	1,012	1,003	1	1
GPU	1	1,064	1,012	1,003	1	1
FUE	1	1,064	1,012	1,003	1	1

3.4 Resultados de GSE requeridos y emisiones generadas

El modelo aquí utilizado genera distintos resultados y en distintos formatos. Estos son en función de lo que se desea calcular y comparar. De manera general, brinda valores de las emisiones de los gases que afectan a la salud (primarios) y también al medioambiente CO2, discretizadas por cada equipo GSE y según tipo de procedimiento (servicio y circulación). Además, el modelo puede brindar la cantidad de kilómetros recorridos por cada equipo, las emisiones por puesto, por aeronave o por aerolínea en caso de que se requiera y tenga la información para utilizar como inputs. Por otro lado, también calcula la cantidad de vehículos requeridos para la demanda de las aeronaves planteadas en el día bajo estudio.

3.5 Visualización de resultados

Los valores arrojados permiten comparar las emisiones según el servicio (independiente del aeropuerto) y la circulación. Esta última será función de la ubicación de la base de los vehículos y los puestos de

estacionamiento de las aeronaves, es decir, de la configuración geométrica de la plataforma y los recorridos propios de cada equipo.

La posibilidad de obtener valores de las emisiones según distintas variables (aeronaves, puestos, aerolíneas) tiene como fundamento obtener índices de contaminantes que son fundamentales a la hora de proponer distintas medidas de mitigación o analizar casos críticos si los hubiese.

Y, finalmente, obtener la cantidad de vehículos requeridos para una demanda asociada tiene como objetivo visualizar los requerimientos que tendría el aeropuerto en cuestión para no tener inconvenientes de demoras (sin tener en cuenta otras variables).

4. CASO DE ESTUDIO

El emplazamiento aeroportuario adoptado como caso de estudio, es el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla SKSP en la Isla de San Andrés, región insular de Colombia situada en el mar Caribe. El predio en cuestión se encuentra ubicado 1,3 km al noreste del centro de la Isla; en la Figura 2 se presenta su localización.



Figura 2. Ubicación del Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla SKSP [30]

4.1 Hipótesis

El análisis se enmarca en el servicio de transporte aéreo comercial (regular y no regular), para operaciones internacionales y de cabotaje o regionales. Se adoptan todos los vuelos como origen-destino con servicio *full* sin escala. Se excluyen del estudio unidades de acondicionamiento de aire, unidades de arranque neumático, vehículos elevadores de carga, vehículos de pasajeros con movilidad reducida y vehículos anticongelantes. Las razones se exponen a continuación:

- Las unidades de acondicionamiento de aire y de arranque neumático no son contempladas ya que son utilizadas con baja o nula frecuencia en vuelos comerciales.
- Los elevadores de carga no son considerados ya que son empleados mayoritariamente en plataformas de carga.
- Los vehículos de pasajeros con movilidad reducida son excluidos ya que suelen utilizarse en vuelos específicos bajo previa solicitud de los pasajeros.
- Las temperaturas anuales expuestas en el aeropuerto de estudio hacen que se pueda prescindir de vehículos anticongelantes.
- Todos los vehículos GSE han entrado en servicio el mismo año (2014).
- Los vehículos utilizan combustible diésel.

Se considera que todos los vehículos de servicio tienen su emplazamiento en la *Base* a excepción de los camiones de abastecimiento de combustible, que se localizan en la Planta Chevron Aviación Fuel, que se observa en la Figura 3. En la Tabla 7 se presenta un resumen en donde se puede visualizar la cantidad de GSE según aeronave.



Figura 3. Plataforma del Aeropuerto y Base de los GSE [30]

Tabla 7. Cantidad de vehículos requeridos según aeronaves analizadas

	A319	A320	A321	B737	E190
GPU	1	1	1	1	1
CAT	1	1	1	1	1
TUG	1	1	1	1	1
BAG	2	2	2	2	2
BEL	1	1	1	1	1
WAT	1	1	1	1	1
LAV	1	1	1	1	1
FUE	1	1	1	1	1
PAS	1	1	1	1	1
BUS	2	2	2	2	2
CLE	1	1	1	1	1

4.2 Caracterización del aeropuerto de referencia

Como primera medida se caracteriza el aeropuerto de referencia. Dicha caracterización implica la identificación y descripción de los principales elementos que integran la parte aeronáutica. El estudio de pistas, calles de rodaje y plataforma resulta sustancial para comprender en detalle las operaciones que se llevan a cabo en un aeropuerto (Figura 4).



Figura 4. Esquema parte aeronáutica del Aeropuerto: en blanco pista, en azul calles de rodaje y rojo plataforma [30]

Los emplazamientos aeroportuarios son capaces de brindar servicio a un cierto número de aeronaves. Dicha capacidad se ve reflejada a partir de la caracterización de la rampa aeroportuaria. Esta última implica: 1) cantidad, tipo y descripción geométrica de la plataforma, y 2) cantidad de puestos de estacionamiento y restricciones de uso según tipo de aeronave.

El análisis en cuestión es de gran importancia ya que los recorridos de circulación de los vehículos de asistencia en tierra GSE serán mayores o menores dependiendo de la localización de los puestos de estacionamiento para aeronaves y los puestos base de cada uno de los vehículos identificados. El predio dispone de una plataforma de pasajeros, tal como se indica en la Figura 5, con 5 puestos de estacionamiento (3 con uso de manga).



Figura 5. Plataforma del Aeropuerto [30]

4.3 Análisis de la flota operativa

Se dispone de datos operacionales por meses de los últimos años [31]. Dado que uno de los objetivos del presente es cuantificar los GSE requeridos según demanda, el estudio debe hacerse para un día. Es por ello que primero se analizaron los movimientos mensuales del año 2019, siendo julio el mes con más operaciones de transporte de pasajeros identificado, con 1.483 operaciones mensuales [31]. El día de diseño surge de dividir las operaciones del mes identificado por la cantidad de días del mismo, obteniendo así la cantidad de operaciones totales por aeronave del día resumida en la Tabla 8.

Tabla 8. Operaciones por día según aeronaves [31]

Aeronaves	A319	A320	A321	B737	E190
Cantidad por día	7	11	5	5	1

4.4 Caracterización de los vehículos de asistencia en tierra

Los modelos GSE tomados como referencia para el cálculo fueron extraídos de la base de datos del software AEDT 2.d que utiliza los de la EPA's NONROAD [26]. Los mismos presentan las características descritas en la Tabla 9.

Tabla 9. Modelos de referencia para el cálculo [26]

GSE	Modelo	POTENCIA MÁXIMA [kW]
CAT	Hi-way F650	157
LAV	Wollard TLS-770A	175
WAT	Wollard TWS-402	175
BAG	Tug MA 50	64
BEL	Tug 660	64
BUS	Volvo Neobus B7R	216
PAS	Wollard CMPS-228	48
TUG	Tug GT-35	55
FUE	Titan Aviation	268

Los factores de carga asociados a la circulación de los vehículos dependen de la masa y el área frontal de los vehículos [32]. En la Tabla 10 se presentan los valores calculados.

Tabla 10. Factor de Carga por circulación calculado

TIPO DE GSE	FC por circulación
CAT	0,10
LAV	0,02
WAT	0,03
BAG	0,04
BEL	0,04
BUS	0,07
PAS	0,09
TUG	0,22
FUE	0,19

4.5 Determinación de recorridos y tiempos de circulación/operativos de los GSE

En primera instancia se identificaron los puestos de estacionamiento GSE que se corresponden con el procedimiento del tipo A (ver Tabla 2). Los mismos hacen referencia a las áreas de espera ESA que se encuentran ubicadas en el entorno del puesto de estacionamiento para aeronaves. En segunda instancia se identificaron los puestos de estacionamiento GSE correspondientes a procedimientos del tipo B y luego tipo C. En función de la identificación de los procedimientos y puestos de estacionamiento de las aeronaves y puestos base de cada equipo GSE, el modelo cuantifica las distancias de cada vehículo dependiendo de su disponibilidad demandada en el servicio y circulación.

Las distancias entre puestos de estacionamiento fueron obtenidas por medio de un algoritmo de distancias entre puntos. Para ello el usuario introduce una serie de nodos sobre una imagen a escala de la plataforma y a través de una matriz se le indica las distancias entre los mismos junto a la de la base de cada equipo. Dichos nodos fueron posicionados sobre las vías de servicio de forma tal que se pueda restringir el movimiento de los GSE en plataforma.

4.6 Tiempos operativos

El modelo propone una discretización de los tiempos durante el servicio [33], el mismo consta de proponer en primer lugar 2 etapas: descarga y carga. Para ambas, la discretización tiene en cuenta estados como la Espera, la Conexión, el Servicio y la Desconexión.

Todos los valores que se muestran en la Tabla 11 han sido medidos y estandarizados para todas las aeronaves. A diferencia de ello, en el servicio los valores dependen fundamentalmente de cada aeronave, y se toman los de cada *Airport Planning AP*. Observar que, donde no hay valores se considera que no se requiere del GSE para determinada etapa. En el caso de los GSE LAV y CLE, se emiten valores durante el servicio dado que no se requiere de un vehículo para el mismo, pero sí se consideran las emisiones por circulación.

Tabla 11. Tiempos en horas según aeronave para cada GSE

GSE	Descarga				Carga			
	Espera	Conexión	Servicio	Desconexión	Espera	Conexión	Servicio	Desconexión
GPU					0,00	0,01	AP	0,01
CAT					0,01	0,03	AP	0,03
TUG					0,01	0,03	AP	0,01
BAG	0,02	0,01	AP	0,00	0,02	0,01	AP	0,00
BEL	0,03	0,01	AP	0,03	0,03	0,01	AP	0,03
WAT	0,01	0,00	AP	0,00	0,01	0,00	AP	0,00
LAV								
FUE					0,24	0,02	AP	0,03
PAS	0,00	0,02	AP	0,00	0,00	0,02	AP	0,00
BUS	0,00	0,02	AP	0,00	0,00	0,02	AP	0,00
CLE								

4.7 Determinación de la cantidad óptima de GSE

Para la determinación de la cantidad óptima de vehículos de asistencia en tierra, se hizo uso del modelo desarrollado por los autores. El mismo dispone que cada vehículo estará disponible si en el momento que debe comenzar el servicio es mayor al que haría el mismo en otro puesto de estacionamiento antes (considerando la circulación de ida, todo el servicio y la circulación de vuelta).

5. RESULTADOS

A continuación, en la Tabla 12, se resume los datos extraídos por el programa.

Tabla 12. Emisiones en kg para los gases analizados por GSE para el servicio y la circulación

		CO2 (kg)	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)	SOx (kg)	PM10 (kg)
CAT	Servicio	321,47	0,79	0,34	1,72	0,07	0,15
	Circulación	2,65	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	324,12	0,79	0,35	1,73	0,07	0,15
GPU	Servicio	194,85	1,02	0,30	4,15	0,05	0,33
	Circulación	0,68	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	195,52	1,03	0,30	4,16	0,05	0,34
TUG	Servicio	31,80	0,26	0,05	0,73	0,01	0,06
	Circulación	1,90	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00
	Total	33,70	0,28	0,06	0,78	0,01	0,07
BAG	Servicio	251,17	5,31	0,49	5,51	0,08	0,88
	Circulación	1,13	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00
	Total	252,30	5,33	0,49	5,53	0,08	0,88
BUS	Servicio	77,53	0,05	0,05	1,00	0,09	0,09
	Circulación	0,71	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	78,24	0,05	0,05	1,01	0,09	0,09
BEL	Servicio	128,53	1,79	0,26	3,01	0,04	0,35
	Circulación	0,40	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	128,94	1,80	0,26	3,02	0,04	0,36
WAT	Servicio	34,93	0,15	0,05	0,52	0,01	0,03
	Circulación	0,45	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	35,39	0,16	0,05	0,53	0,01	0,03
LAV	Servicio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Circulación	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FUE	Servicio	132,58	0,44	0,17	1,49	0,03	0,06
	Circulación	4,88	0,02	0,01	0,05	0,00	0,00
	Total	137,46	0,46	0,18	1,55	0,03	0,06
STA	Servicio	4,52	0,02	0,01	0,07	0,00	0,00
	Circulación	0,36	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
	Total	4,89	0,02	0,01	0,07	0,00	0,00
CLE	Servicio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Circulación	2,41	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
	Total	2,41	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00

De la Tabla 12 se puede observar que, si se quiere comparar las emisiones de servicio con circulación según GSE, a excepción del LAV y CLE (en donde no se requiere de un vehículo a la hora de ejercer el servicio) y WAT (los valores de ambos son comparables); en todos los vehículos tiene una gran preponderancia las emisiones durante el servicio con relación a la circulación (en promedio se emite alrededor de 90% servicio contra 10% de circulación). A modo de ejemplo, en la Figura 6 se puede visualizar para el GSE FUE.

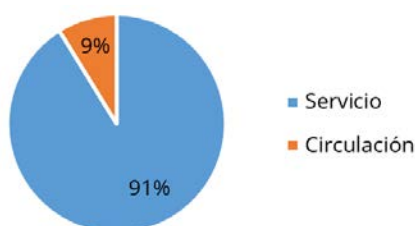


Figura 6. Comparación de las emisiones según circulación y servicio para el GSE FUE

De los resultados también se puede observar y comparar los valores en kilogramo de cada gas analizado. En la Figura 7 se observa la cuantificación producto de cada GSE para el CO₂, y en la Figura 8 se muestra para el resto de los gases.

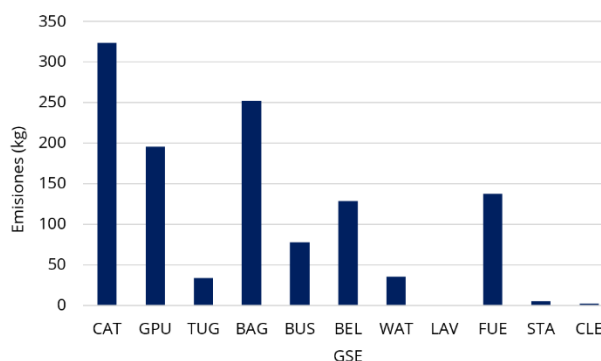


Figura 7. Emisiones en kilogramo según CO₂ para todos los GSE analizados

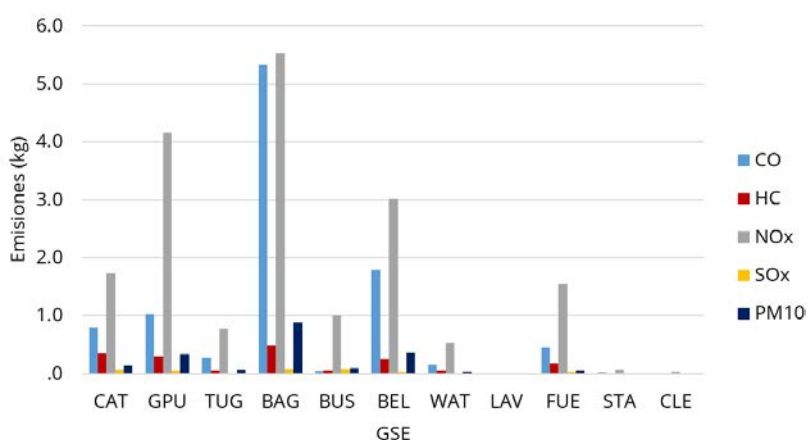


Figura 8. Emisiones en kilogramo según gases CO, HC, NOx, SOx y PM10 para todos los GSE

Finalmente, el modelo identifica la cantidad de vehículos requeridos para la demanda asociada bajo el día de diseño para el aeropuerto caso de estudio (Tabla 13).

Tabla 13. Cantidad de vehículos requeridos por GSE

CAT	GPU	TUG	BAG	BUS	BEL	WAT	LAV	FUE	STA	CLE
2	4	1	4	4	6	1	1	2	2	1

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados que se pueden visualizar en la sección anterior, se puede analizar la preponderancia que tienen ciertos vehículos GSE según el tipo de gas. Respecto al CO₂, se observa que los vehículos CAT, GPU y BAG emiten el 70% del total, por lo que, propuestas de medidas de mitigación para estos vehículos afectarían beneficiosamente al medio ambiente. En cuanto a los otros gases, se observa que la tendencia entre ellos para cada equipo GSE se mantiene: el NOx es el gas que más emite en kg, luego el CO y luego van alternando parejamente el HC y el PM10.

Otros resultados que se pueden analizar son las emisiones que surgen entre el servicio y la circulación. Tal como se muestra y menciona previamente, hay un dominio proveniente del primero respecto del segundo a excepción de algunos vehículos (que justamente son los que menos emiten). Sin embargo, esta tendencia se debe a las características propias del aeropuerto, en donde las emisiones por circulación son en función del parámetro distancia recorrida.

Finalmente, se puede observar que el modelo arroja la cantidad de vehículos requeridos por equipo. Estos valores pueden tenerse en cuenta a la hora del diseño de la plataforma, ubicación de bases para cada equipo, mantenimiento de equipos y posibles inversiones en nuevos vehículos o eléctricos, por mencionar

algunos. Los valores identificados surgen de la demanda operativa de las aeronaves (cantidad, puesto de estacionamiento, tipo de vuelo) y las distancias y tiempos operativos de cada vehículo.

7. CONCLUSIONES

El modelo aquí utilizado permite cuantificar las emisiones generadas por los GSE producto de la demanda asociada que representan las aeronaves según puesto de estacionamiento, tipo de operación, y uso o no de manga.

Además, cuantifica estos gases contaminantes producto del recorrido que tienen que hacer estos vehículos parametrizando la plataforma aplicable a cualquier geometría. Esto es fundamental, dado que permite dimensionar cuán influyente son las distancias recorridas y de esta manera proponer posibles medidas de mitigación como asignación de nuevos puestos base para los vehículos o aeronaves según los recorridos que los GSE deban hacer.

La discretización de los tiempos en el servicio para las etapas de descarga y carga en espera, conexión, servicio y desconexión, permiten acercarse a los valores de salida de la herramienta a situaciones aún más reales que otros los modelos, que persiguen el mismo objetivo, en donde solo se tienen en cuenta las emisiones por servicio brindado por los *Airport Planning*.

Las relaciones de emisiones entre el servicio y la circulación son dependientes de la plataforma y la ubicación de los puestos base de cada equipo GSE, independientemente del gas analizado. En este caso, al ser un aeropuerto con baja cantidad de operaciones, influyendo en la característica de la plataforma, las emisiones por circulación son considerablemente inferiores en comparación con la de servicio. Esto podría verse afectado si, por ejemplo, se considerara que los puestos base de los combustibles FUE estuvieran más alejados de donde se ubicaron.

Los altos valores que emiten los GSE para el CO₂ en comparación del resto de los gases analizados, es producto del alto factor de emisión que este presenta. Si se analizan el resto de los gases sin considerar el CO₂, se puede observar que el NO_x tiene una preponderancia por el resto, siendo este uno de los principales gases denominados primarios que afectan directamente a la calidad del aire local.

Se destacan los vehículos GPU, BEL y BAG como aquellos que más emisiones generan, en total, producto de su asistencia a la aeronave. Esto se debe a las variables que influyen en su cuantificación de las emisiones. El primero suministra la energía a la aeronave mientras está en tierra y con los motores apagados, por lo tanto, sus tiempos de servicio para todas las aeronaves analizadas son altos. En cuanto a los BEL y BAG, son de los pocos equipos que requieren de todos los tiempos discretizados y ambos necesitan 6 y 4 unidades respectivamente para brindar el servicio sin demoras (junto al BUS son los que más vehículos se cuantifican).

En cuanto a la cantidad de vehículos, se considera que son acorde a la demanda asociada para el día analizado. Se observa que se requerirían 6 *belt loader* (BEL) para abastecer el servicio sin generar demoras, esto se debe al tiempo de servicio y circulación que conlleva este tipo de vehículos.

REFERENCIAS

- [1] Simone, N.; Stettler, M. and Barrett, S. "Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification," *Transportation Research Part D*, vol. 25, pp. 33–41, 2013.
- [2] ICAO. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. Recuperado: <http://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>, 2020.
- [3] Guillamón, J.M. *El aeropuerto y su entorno. Impactos ambientales y desarrollo sostenible*, Madrid: AENA, 2010.
- [4] Sznajderman, L; Ramírez Díaz, G; Di Bernardi A. "Influence of the Apron Parking Stand Management Policy on Aircraft and Ground Support Equipment (GSE) Gaseous Emissions at Airports," *Aerospace*.
- [5] Ashok, A.; Balakrishnan, H.; and Barrett, S. "Reducing the air quality and CO₂ climate impacts of taxi and takeoff operations at airports," *Transportation Research Part D*, vol. 54, pp. 287–303, 2017.

- [6] Martini, G., Scotti, D. and Volta, N. "Including local air pollution in airport efficiency assessment: A hyperbolic-stochastic approach," *Transportation Research Part D*, vol. 24, pp. 27–36, 2013.
- [7] Tokuslu, A. "Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport," *Energy*, vol. 206, 118219, 2020.
- [8] Bo, X.; Xue, X.; Xud, J.; Dud, X.; Zhoua, B. and Tang, L. "Aviation's emissions and contribution to the air quality in China," *Atmospheric Environment*, vol. 201, pp. 121–131, 2019.
- [9] Yang, X.; Cheng, S.; Lang, J., Xu, R. and Lv, Z. "Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 72, pp. 198–207, 2018.
- [10] Vujović, D. and Todorović, N. "An assessment of pollutant emissions due to air traffic at Nikola Tesla International Airport, Belgrade, and the link between local air quality and weather types," *Transportation Research Part D*, vol. 56, pp. 85–94, 2017.
- [11] Xu, H.; Fu, Q.; Yu, Y.; Liu, Q., Pan, J.; Cheng, J.; Wang, Z. and Liu, L. "Quantifying aircraft emissions of Shanghai Pudong International Airport with aircraft ground operational data," *Environmental Pollution*, vol. 261, 114115, 2020.
- [12] Dong, Q.; Chen, F. and Chen, Z. "Airports and air pollutions: Empirical evidence from China," *Transport Policy*, vol. 99, pp. 385–395, 2020.
- [13] Grampella, M.; Martini, G.; Scotti, D.; Tassan, F. and Zambon, G. "Determinants of airports' environmental effects." *Transportation Research Part D*, vol. 50, pp. 327–344, 2017.
- [14] Hepting, M.; Pak, H.; Grimme, W.; Dahlmann, K.; Jung, M. and Wilken, D. "Climate impact of German air traffic: A scenario approach," *Transportation Research Part D*, vol. 85, 102467, 2020.
- [15] Peace, H.; Maughan, J.; Owen, B. and Raper, D. "Identifying the contribution of different airport related sources to local urban air quality," *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, pp. 532–538, 2006.
- [16] Penn, S.; Boone, S.; Harvey, B.; Heiger-Bernays, W.; Tripodis, Y.; Arunachalam, S. and Levy, J. "Modeling variability in air pollution-related health damages from individual airport emissions," *Environmental Research*, vol. 156, pp. 791–800, 2017.
- [17] Postorino, M. and Mantecchini, L. "A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions," *Journal of Air Transport Management*, vol. 37, pp. 76–86, 2014.
- [18] Yilmaz, I. "Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey," *Journal of Air Transport Management*, vol. 58, pp. 176–182, 2017.
- [19] Song, S. and Shon, Z. "Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea," *Atmospheric Environment*, vol. 61, pp. 148–158, 2012.
- [20] Kesgin, U. "Aircraft emissions at Turkish airports," *Energy*, vol. 31, pp. 372–384, 2006.
- [21] Unal, A.; Hu, Y.; Chang, M.; Odman, M. and Russell, A. "Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport," *Atmospheric Environment*, vol. 39, pp. 5787–5798, 2005.
- [22] Mokalled, T.; Le Calvé, S.; Badaro-Saliba, N.; Abboud, M.; Zaarour, R.; Farah, W. and Adjizian-Gérard, J. "Identifying the impact of Beirut Airport's activities on local air quality - Part I: Emissions inventory of NO₂ and VOCs," *Atmospheric Environment*, vol. 187, pp. 435–444, 2018.
- [23] Padhra, A. "Emissions from auxiliary power units and ground power units during intraday aircraft turnarounds at European airports," *Transportation Research Part D*, vol. 63, pp. 433–444, 2018.
- [24] Winther, M.; Kousgaard, U.; Ellermann, T., Massling, A.; Nojgaard, J. and Ketzler, M. "Emissions of NO_x, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport," *Atmospheric Environment*, vol. 100, pp. 218–229, 2015.
- [25] Stettler, M.; Eastham, S. and Barrett, S. "Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions," *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 5415–5424, 2011.
- [26] EPA's NONROAD, Washington DC: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2005.
- [27] *Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) User's Manual*, Washington DC: Federal Aviation Administration, 2007.
- [28] *Manual de Operaciones de Rampa (M.O.R.)*, Buenos Aires: Aerolíneas Argentinas, 2015.
- [29] Trujillo C.; Di Bernardi A. y Sznajderman L. "Estudio del aporte contaminante gaseoso generado por la circulación de vehículos de apoyo en tierra (GSE) en emplazamientos aeroportuarios: desarrollo metodológico y validación," *Working Paper*, Universidad Nacional de La Plata (Argentina), 2018.
- [30] Google Earth, 2021.
- [31] Aerocivil. Estadísticas de las actividades aeronáuticas. Recuperado: <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas>, 2021.
- [32] Granda E.; Sznajderman L.; Di Bernardi A. and Coppa M. "Desarrollo metodológico para la incorporación de vehículos eléctricos de asistencia a las aeronaves (eGSE) y su aplicación en el aeropuerto de Ezeiza (SAEZ), 2021.
- [33] Sznajderman, L.; Coppa, M. y Di Bernardi A. "Cuantificación del aporte contaminante gaseoso producto de las operaciones de GSE en plataforma: metodología según tiempos operativos," *V Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*, Córdoba, 2018.

Caracterización de las demoras de vuelos comerciales. Caso de estudio: Aeropuerto Internacional El Dorado, Colombia

Luis Manuel Pulido Moreno¹

Oscar Díaz Olariaga²

Universidad Santo Tomás
Colombia

Actualmente, las demoras de los vuelos comerciales de pasajeros son un problema en los grandes aeropuertos internacionales a nivel mundial, situación que se agrava cuando los aeropuertos están en permanente situación de congestión. Las demoras generan importantes pérdidas económicas a los operadores aéreos, molestias a los pasajeros y problemas de gestión de la capacidad y de las operaciones para los aeropuertos. Entonces, el objeto de esta investigación es indagar el volumen de las demoras, además de investigar y analizar su causalidad para los vuelos comerciales programados. Se utiliza la metodología de Análisis de Datos y como caso de estudio se elige el aeropuerto El Dorado de Colombia, el tercero con mayor tráfico en Latinoamérica, situado en la ciudad de Bogotá. Esto se debe a que, como se presenta en este capítulo, el aeropuerto está experimentando considerables volúmenes de demoras, aunque su infraestructura aún no ha alcanzado, teóricamente, una situación de congestión o saturación, es decir, cuando la demanda supere la capacidad disponible.

¹ Ingeniero industrial

Contacto: luis.pulido@usantotomas.edu.co

² Ingeniero Aeronáutico

Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la globalización, la industria mundial de la aviación civil está creciendo a un ritmo acelerado. Ahora bien, si esta situación de alta demanda no es compensada o equilibrada con un aumento de la capacidad (infraestructura) en el aeropuerto entonces se llega a una situación de congestión (donde la demanda supera a la capacidad instalada), paso seguido y como consecuencia, en el aeropuerto se empiezan a generar retrasos (o demoras, que en el presente trabajo se usarán de forma indiferente), el cual puede ser formalmente así considerado (sobre todo de cara a poner en marcha penalizaciones, dependiendo de quién sea el responsable del retraso) cuando la diferencia entre el tiempo programado de una operación (por ejemplo, de despegue) y el real alcanza o supera el umbral de los 15 minutos [1-3].

Los problemas de retraso de vuelo que han resultado del rápido desarrollo de la industria de la aviación civil se han convertido en un desafío mundial [4]. Los retrasos en los vuelos tienen un impacto negativo en los pasajeros, las aerolíneas y los sistemas de transporte aéreo [5]. Los vuelos retrasados desordenan los planes de viaje, lo que a menudo hace que los pasajeros estén insatisfechos con las aerolíneas [6]. Las compañías aéreas también sufren, no solo pagando por el desperdicio de recursos causado por retrasos, sino también teniendo que invertir más para mejorar la satisfacción de los pasajeros [7, 8].

Hasta finales de la década de 1980 los principales retrasos en el tráfico aéreo se limitaban en gran medida a un número relativamente pequeño de aeropuertos (sobre todo los más grandes) [9]. Sin embargo, el fuerte crecimiento en el número de operaciones aeroportuarias que tuvieron lugar durante las tres décadas posteriores (hasta el presente) ha llevado a problemas de congestión en todo el sistema. En los últimos 15-20 años se han experimentado, en muchos grandes aeropuertos internacionales (en especial en Estados Unidos y Europa occidental), niveles de demoras importantes y preocupantes, en donde los aeropuertos estuvieron muy cerca o incluso superaron las capacidades de éstos durante varias horas cada día, especialmente durante la temporada alta de verano (boreal).

Como resultado, los retrasos en los aeropuertos internacionales están alcanzando niveles récord (y con mayores problemas en los días en que prevalecen condiciones climáticas adversas), y además se verifica que la congestión se extiende o *propaga* a otros aeropuertos afectando al sistema aeroportuario local/regional. El costo neto de la congestión, que conduce irremediablemente a la generación de retrasos, es enorme; para dar un simple ejemplo las estimaciones para los Estados Unidos en 2007 fueron aproximadamente de entre USD 12 mil millones [10] y USD 41 mil millones [11], ésta última estimación incluye tanto los costos directos de los retrasos a las aerolíneas como a sus pasajeros y los costos indirectos e inducidos que los retrasos causan a la industria de las aerolíneas (por ejemplo, al obligar a la industria a aumentar el tiempo programado de vuelos de puerta a puerta) y a otros sectores de la economía [9].

El Aeropuerto Internacional El Dorado BOG en la capital de Colombia, ya está experimentando un volumen considerable de retrasos, algo preocupante considerando que la demanda aún no ha alcanzado la máxima capacidad operativa del aeropuerto. Por ello se estima de interés conocer y analizar la causalidad de los retrasos en dicho aeropuerto. Entonces, partiendo de una completa y detallada base de datos para el año 2018, y para todos los vuelos programados en dicho aeropuerto (generados por la Autoridad Aeronáutica de Colombia), se realizará un análisis estadístico sobre la causalidad de los retrasos utilizando el análisis exploratorio de la Analítica de Datos como línea metodológica o de planteamiento.

Para el tratamiento de la base de datos inicial se utilizará la metodología de CRIPS que de acuerdo con [12] y bajo un esquema de CRM permite centrarse en el desarrollo de la visión del interesado, y una vez depurada el Big Data para el objetivo del estudio se cuenta con una base de prueba que evidencian los retrasos en el despegue en los vuelos programados en el aeropuerto de estudio. Sobre esta base de datos, y de acuerdo con [13], se trabajará en la búsqueda de un modelo de clasificación que permita realizar un análisis sobre las causas que generan los retrasos en los despegues de los vuelos nacionales e internacionales (programados) que tienen su origen en el aeropuerto analizado. Inicialmente la técnica seleccionada, entre la variedad que ofrece la Analítica de Datos, será la Minería de Datos, que se puede definir como una serie de pasos escalonados aplicados sobre una base de datos para obtener conocimiento y es solo un paso en el proceso de descubrimiento de conocimiento [14].

Finalmente mencionar que la presente investigación es la primera en su tipo en Colombia, y sobre un caso de un aeropuerto específico del país, lo que contribuye a cubrir el enorme vacío en la literatura científica en la temática a nivel local/regional.

2. MARCO REFERENCIAL

El problema de las demoras en los vuelos programados comerciales se ha generalizado, a nivel mundial, hace aproximadamente 20 años, por lo que la academia viene publicando investigaciones desde hace un tiempo similar, quizá algo más reciente, década o década y media. Entonces, a continuación, se presentan las principales o más relevantes investigaciones en la temática y con alto grado de actualidad.

El trabajo de Wang et al. [15] es uno de los primeros en utilizar como metodología la estabilidad de retraso de tiempo (Time Delay Stability) para analizar el problema de los retrasos en el transporte aéreo. Su trabajo se enfocó en el mercado doméstico de los EE.UU. y trabajaron con un histórico de datos de 20 años. Con la metodología antes citada los autores investigaron las correlaciones cruzadas entre las series temporales de velocidades adimensionales de diferentes vuelos domésticos de pasajeros de los Estados Unidos. Los autores determinaron un (nuevo) indicador para detectar altos (o graves) niveles de retrasos.

Borsky y Unterberger [16] analizan la influencia de la meteorología adversa en los retrasos de los vuelos. Los autores trabajan en el mercado doméstico de los EE.UU. con datos estadísticos del periodo 2012-2107. De sus resultados los autores concluyen que las fuertes inclemencias climáticas como la lluvia, la nieve y el viento tienen un impacto significativo en los retrasos de salida dentro del sistema de aviación de EE. UU. Dependiendo de la intensidad de la inclemencia climática considerada, la lluvia y las nevadas conducen a demoras de salida adicionales entre 10 y 23 min. Para el viento, los efectos descubiertos son de menor magnitud, que van de 1 a 3 min.

Yu et al. [17] presentan un modelo práctico de predicción de retrasos de vuelos. El método propuesto por los autores demuestra ser altamente capaz de gestionar grandes conjuntos de datos y capturar los factores clave que influyen en los retrasos. Los autores concluyen que dicho método permitiría a los aeropuertos conectados entre sí aliviar colectivamente la propagación de las demoras dentro de su red. la investigación utilizó como caso de estudio el Aeropuerto Internacional de Beijing.

Du et al. [7] recurren a un análisis topológico de una red de causalidad de retrasos (creada por ellos mismos) para analizar y comprender el mecanismo de propagación del retraso de vuelo a nivel de sistema. Los autores, utilizando como caso de estudio la red aeroportuaria china, descubren que solo una cuarta parte de los aeropuertos estaban involucrados en la propagación diferida durante el período pico del día. Además, concluyen que los culpables de la propagación diferida en el sistema de transporte aéreo no son un conjunto fijo de aeropuertos, sino que varían diariamente según el entorno operativo.

La investigación de Henriques y Feiteira [18] se enfoca en la predicción de la ocurrencia de demoras en las llegadas (utilizando como caso de estudio el Aeropuerto Hartsfield-Jackson de Atlanta). Los autores utilizaron la metodología Knowledge Discovery Database KDD y aplicaron varias técnicas de minería de datos. Los datos históricos del vuelo y el clima, la información del avión y la propagación de la demora se recopilaron para incorporarlos al modelo.

Utilizando un planteamiento de analítica de datos, Scarpel y Pelicioni [19] desarrollan y proponen un modelo de alerta temprana para anticipar la ocurrencia de días congestionados en el Aeropuerto de São Paulo, Brasil, con el objetivo de formular estrategias efectivas para reducir las demoras en los vuelos en los días congestionados.

Pérez et al. [20] proponen un modelo de probabilidad de *logit*(bayesiano) asimétrico para estimar y predecir las probabilidades diarias de retraso en la llegada de aeronaves (usando como caso de aplicación el mercado doméstico de EE.UU.). Los autores concluyen que el modelo propuesto obtiene el mejor ajuste, de acuerdo con las estadísticas consideradas, e identifica un factor de retraso novedoso, a saber, la distancia,

que no se identifica por los otros modelos analizados. Belcastro et al. [21] utilizan una metodología de minería de datos escalable para desarrollar un predictor del retraso de llegada de vuelos programados debido a las condiciones climáticas adversas (tanto en el aeropuerto de destino como en el de origen). Los autores trabajan con datos del sistema del transporte aéreo y meteorológico de EE.UU. entre 2009 y 2013.

Sternberg et al. [22] utilizan una metodología de minería de datos (con técnicas de indexación de datos combinadas con reglas de asociación) para revelar patrones ocultos de retrasos en los vuelos. Trabajando con datos del mercado doméstico de Brasil determinan que el sistema de vuelo brasileño tiene dificultades para recuperarse de retrasos anteriores, y cuando opera bajo condiciones meteorológicas adversas los retrasos pueden aumentar hasta un 216%.

Kafle y Zou [23] desarrollan un modelo analítico para cuantificar la propagación de los retrasos. Con los retrasos calculados a partir del modelo analítico desarrollan un modelo econométrico discreto continuo y utilizan el procedimiento de dos pasos de Heckman para revelar los efectos de varios factores influyentes en la propagación de los retrasos. El análisis utiliza datos sistema de aviación nacional de los EE.UU.

Campanelli et al. [24] comparan el modelado en las redes de tránsito aéreo de EE. UU. y Europa, analizando la propagación de demoras debido a fallas en el cronograma o perturbaciones. Los resultados muestran que un protocolo de gestión de vuelos por orden de llegada produce una mayor congestión en comparación con un sistema de prioridad de *slots* Air Traffic Flow Management ATFM.

Fleurquin et al. [25] analizan la propagación de los retrasos en la red aeroportuaria de EE.UU. Los autores estudian el desempeño del sistema de transporte aéreo en términos de demoras, y consideran los problemas técnicos, operativos o meteorológicos que afectan a algunos vuelos dan lugar a retrasos primarios. De entre sus principales resultados los autores indican que existe un riesgo no despreciable de inestabilidad sistémica incluso en condiciones normales de operación.

Pyrgiotis et al. [9] desarrollan un modelo analítico de colas y descomposición de red para estudiar la propagación de demoras dentro de una gran red de aeropuertos principales de EE.UU. Santos y Robin [26] analizan los determinantes de los retrasos en los aeropuertos europeos. Utilizando los datos de vuelo para el período 2000–2004, los autores encuentran cuatro variables significativas para explicar los retrasos en los aeropuertos europeos: la concentración del mercado, la coordinación de *slots*, los aeropuertos centrales y las aerolíneas centrales.

Tu et al. [27] desarrollan un modelo para estimar las distribuciones de retrasos de salida de vuelo requeridas por los modelos de predicción de congestión de tráfico aéreo. Los autores identifican los principales factores que influyen en los retrasos en la salida del vuelo y desarrollan un modelo de predicción del retraso en la salida. El modelo propuesto emplea métodos no paramétricos para tendencias diarias y estacionales y utiliza una distribución de mezcla para estimar los errores residuales. Los autores utilizaron datos de vuelos de United Airlines y el Aeropuerto Internacional de Denver de los años 2000/2001 para validar el modelo.

3. CASO DE ESTUDIO: AEROPUERTO EL DORADO

El Aeropuerto Internacional El Dorado (H24, código IATA: BOG; código OACI: SKBO), situado en la ciudad de Bogotá, y único aeropuerto que sirve a la ciudad, es de propiedad pública pero con operación concesionada desde 2007 a la empresa (privada) OPAIN, S.A. [28], año en que el aeropuerto experimentó el inicio de una importante ampliación de su infraestructura e instalaciones (principalmente el nuevo edificio terminal de pasajeros), con una inversión de USD 650 millones, y que culminó en 2013. En 2015 dio inicio una segunda ampliación (en el lado tierra) que finalizó en 2018.

El aeropuerto cuenta con un sistema de dos pistas paralelas, 13L/31R (pista norte) y 13R/31L (pista sur), ambas para operaciones de despegue y aterrizaje, y cada una con una longitud y ancho de 3.800 x 45 m; la clave de referencia del aeródromo es 4-E. Las estadísticas para el año 2018 (año de análisis de la presente

investigación) indican que el aeropuerto movilizó 32,7 millones de pasajeros totales (nac. + int.), 741 mil toneladas de carga aérea totales y gestionó 333 mil operaciones (despegues / aterrizajes) totales [29].

BOG ha liderado e impulsado el desarrollo del tráfico aéreo a nivel nacional en las últimas dos décadas y media; desde el año de la liberalización del transporte aéreo en el país (1991) hasta 2018 el tráfico total de pasajeros creció más de siete veces [29]. Este superlativo crecimiento del tráfico, y de la demanda, fue absorbido de forma paulatina en el tiempo, y muy especialmente por las dos últimas ampliaciones del aeropuerto, 2007-2013 y 2015-2018 (Figura 1). Mencionar que no se exponen los datos de tráfico del año 2020, debido que, a la fecha de edición del presente trabajo, no se disponían de datos consolidados; además de comentar que los valores de tráfico aéreo se prevén extremadamente bajos debido al efecto de la pandemia del COVID-19 en dicho año.

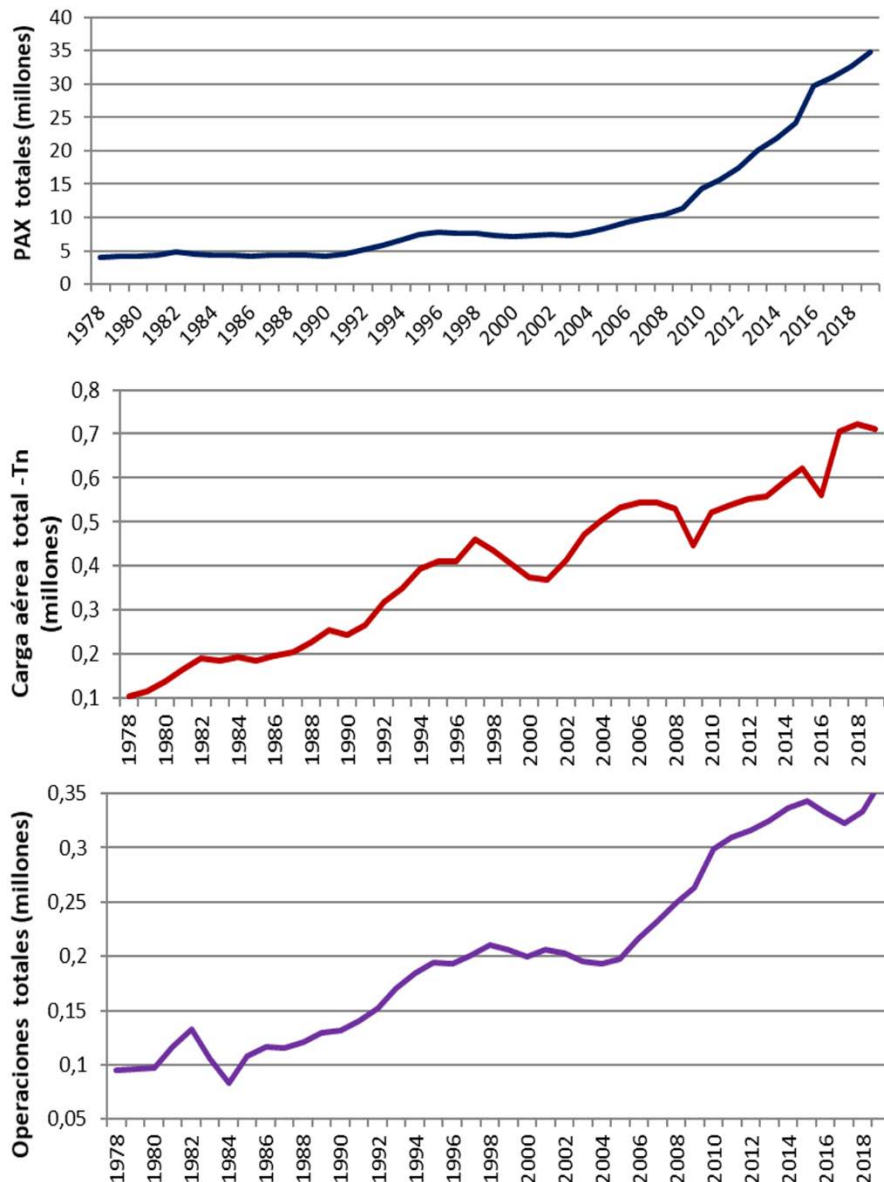


Figura 1. Desarrollo del tráfico en BOG, periodo 1978-2019 [29]

Ahora bien, esta alta dinámica de crecimiento del tráfico aéreo en el aeropuerto en estudio no ha venido acompañada de un aumento de su capacidad en el lado aire, más precisamente, no se han construido nuevas pistas. Esta situación llevó a acercar a Bogotá-El Dorado a situaciones de congestión (parciales o puntuales, nunca permanentes), lo que dio pie a la aparición de un volumen preocupante de demoras en los vuelos programados. Y como suele pasar en las redes de transporte aéreo las demoras generadas en ciertos aeropuertos de la red se trasladan o propagan a otros aeropuertos de la red no necesariamente congestionados [7], por ello es de gran interés caracterizar las demoras en el aeropuerto en estudio, que es el principal aeropuerto distribuidor (*hub*) del país.

4. MÉTODO

La analítica de datos es un término general que simplemente significa aplicar varias técnicas analíticas avanzadas a los datos para responder preguntas o resolver problemas. No es una tecnología en sí misma, sino una metodología que utiliza un grupo de herramientas, y en combinación entre sí, para obtener información, analizar esa información y predecir los resultados de las soluciones de problemas [30]. La integración de datos y la minería de datos son la base para el análisis avanzado. A mayor cantidad de información que se recopila e integra permite más reconocimiento de patrones e identificación de relaciones. El análisis estadístico es otro componente muy importante en la analítica de datos para ver las tendencias y patrones en los datos.

Algunas otras técnicas utilizadas para manipular los datos son la lógica difusa, el tratamiento de datos incompletos o ambiguos, y las redes neuronales para anticipar decisiones y ayudar en el análisis predictivo que ayuda a predecir resultados probables [31]. La minería de datos es una poderosa tecnología emergente para la extracción automática de patrones, asociaciones, cambios, anomalías y estructuras significativas de los datos. Estos patrones descubiertos a partir de datos, juegan un papel crítico en la toma de decisiones porque revelan áreas para la mejora de procesos. La mayor parte del valor de la minería de datos proviene del uso de la tecnología para mejorar el modelado predictivo [32, 33].

La metodología Cross Industry Standard Process for Data Mining CRISP-DM es un modelo estándar abierto propuesto en 1999 por IBM para proyectos relacionados con minería de datos [34]. CRISP-DM divide el proceso de minería de datos en seis fases principales: entendimiento de negocio, entendimiento de datos, preparación de datos, modelamiento, evaluación y publicación. Posteriormente en el año 2015 IBM propuso una versión extendida de CRISP-DM denominada Analytics Solutions Unified Method ASUM-DM la cual contiene los mismos pasos de CRISP-DM bajo el nombre de Ciclo de Elaboración e introduce un nuevo ciclo denominado Operacional [34].

Los modelos de proceso como CRISP-DM, de acuerdo con Wirth y Hipp [35] y Long y Kelly [36] en el ciclo de vida analítico de un proyecto de analítica de datos, debería ayudar con la obtención rápida de resultados y pueden ser mejorado también por enfoques ágiles. En los proyectos actuales de ciencia de datos, los modelos de proceso no están bien establecidos, aunque existen modelos de proceso desde hace varios años. Como muestra Saltz y Shamshurin [37], solo el 18% de los equipos de ciencia de datos siguen una modelo de proceso explícito. La implementación en ciencia de datos también ha recibido una atención considerable en los últimos años, información recopilada por Schröerab et al. [38]. En la Tabla 1 se describe la aplicación de la metodología CRISP-DM que se implementa en esta investigación.

Tabla 1. Descripción de la aplicación de la metodología CRIPS en las fases de Minera de Datos [34]

Minería de Datos	Descripción del proceso
Data understanding	<p>COLLET INICIAL DATA: Archivo en Excel con 357.595 registros de información con el registro de la información aeroportuaria en Colombia en el año 2018.</p> <p>DESCRIBE DATA: Cada uno de los registros está compuesto por dieciséis (16) componentes de información: Trafico, Aerolínea, Origen, Destino, Fecha programada de salida, Hora programada de salida, Fecha de remolque, Hora de remolque, Demora Aerocivil, Demora, Estado del vuelo, Código de la demora, Motivo de la demora, Observaciones y Estatus Aerocivil.</p>
	<p>EXPLORE DATA: En la primera exploración se evidencia que no existe un formato unificado para la presentación de los datos y que no todas las posiciones de la base contienen información.</p> <p>VERIFY DATA QUALITY: Se verifica la consistencia de las transformaciones de registros de información de la base y la calidad de las operaciones matemáticas realizadas, sin la necesidad de realizar ninguna corrección al respecto. Esta primera base, se denominó BASE 0.</p>
Data preparation	<p>SELECT DATA: el interés del grupo está concentrado en el Aeropuerto El Dorado, por lo que se generó la BASE 1 que contiene la información de la operación del aeropuerto caso de estudio con 145.385 registros.</p> <p>CLEAN DATA: Se realizó una nueva base de datos, denominada BASE 3 que contiene la información calificada por la columna Estatus de la Aerocivil con 40.027 registros de información relacionados con vuelos con retraso con origen en el aeropuerto caso de estudio en el año 2018 y sobre esta base se desarrollan los siguientes pasos de la metodología.</p> <p>CONSTRUCT DATA: se construyeron dos bases de datos con la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ BASE 4.1: 40.027 registros de información que tienen el código de la causa del retraso del vuelo. ▪ Base 4.2: 35.020 registros de información acerca de la duración de la demora en minutos.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar, en la Figura 2 se presenta el número de retrasos en el aeropuerto en estudio para el año 2018 distribuido por tipo de tráfico (nacional / internacional).

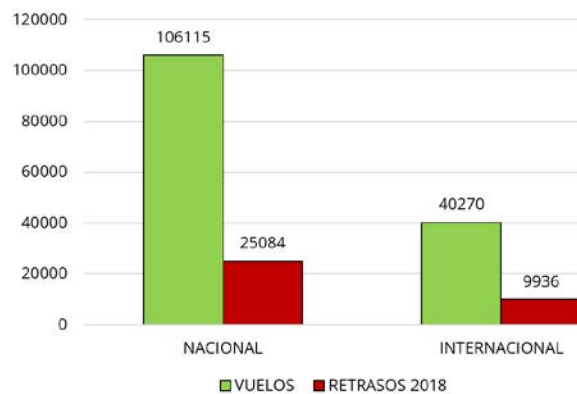


Figura 2. Número de vuelos programados (verde) y de retrasos (rojo) en el aeropuerto en estudio (2018) [29]

En términos comparativos a nivel porcentual de las cifras de la Figura 2, de todos los vuelos programados a destinos nacionales desde el Aeropuerto El Dorado, un 38% presentaron retraso. Con destino internacional un 40% de los vuelos de partida (o salida) de BOG fueron reportados con retraso. Es decir que en promedio el 38% de los vuelos programados desde el Aeropuerto de Bogotá-El Dorado independientes de su destino, sufren algún tipo de retraso. Este nivel o grado de retraso se puede considerar elevado bajo la consideración de que el aeropuerto en estudio no se encuentra, en teoría, en estado de saturación, es decir, cuando la demanda supera la capacidad (en infraestructura) instalada y disponible.

En la Figura 3 se puede apreciar el número de retrasos por mes en los tráficos internacional y nacional distribuidos por meses a lo largo del año.

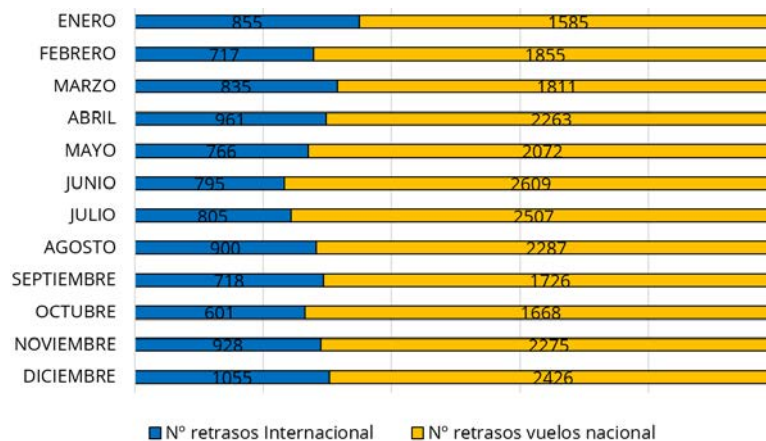


Figura 3. Retrasos por tipo de tráfico (nacional / internacional) y por mes (2018) en el aeropuerto en estudio [29]

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 3, el mes del año 2018 donde se presentó el mayor número de retrasos con destino internacional desde el Aeropuerto El Dorado fue diciembre con 1055 retrasos y el mes con menos retrasos fue octubre con 601. A destinos nacionales, el mes con mayor número de retrasos fue junio con 2609 y el de menor número de retrasos fue enero con 1585. No hay coincidencia en los meses de mayor y menor número de retrasos de las salidas desde el aeropuerto en estudio, lo que indica que por lo menos a nivel inicial que el fenómeno se podría estudiar de manera separada para el tipo de destino. Asimismo, mencionar que los picos en los retrasos se verifican en los meses de fin (diciembre) e inicio (enero) de año, esto tiene mucho sentido, ya que el transporte aéreo está fuertemente sujeto a la estacionalidad en el comportamiento de la demanda, y son en estos meses cuando la demanda de transporte aéreo (es decir de viajes, principalmente de ocio/turismo) se verifica (además de semana santa). En la Tabla 2 se presenta el análisis descriptivo realizado al conjunto de los retrasos presentados por mes del año 2018 en los tráficos nacional e internacional.

Tabla 2. Análisis estadístico descriptivo de retrasos por mes por tipo de tráfico

Estadístico	Internacional	Nacional
Media	828	2090
Mediana	820	2168
Desviación estándar	123	351
Coficiente Variación	15%	17%
Curtosis	0,13	-1,53
Coficiente de asimetría	0,04	-0,05

La media de los retrasos mensuales de los vuelos nacionales es superior a la de los vuelos internacionales, lo que coincide con la participación porcentual de la operación del aeropuerto. A nivel de variación, su dispersión es muy parecida, determinada por el coeficiente de variación, que en los destinos nacionales es del 17% y en los internacionales del 15%, lo que puede indicar que la variación del fenómeno es independiente del destino del vuelo. Los retrasos en vuelos internacionales tienen sesgo a la derecha, lo que indica que hay valores concentrados en los valores más grandes de la variable, mientras que en los retrasos en vuelo nacionales el sesgo es a la izquierda, lo que permite ubicar datos concentrados en los valores más pequeños de la variable. En la Figura 4 se presentan las estadísticas de retrasos por día de la semana para el año 2018.

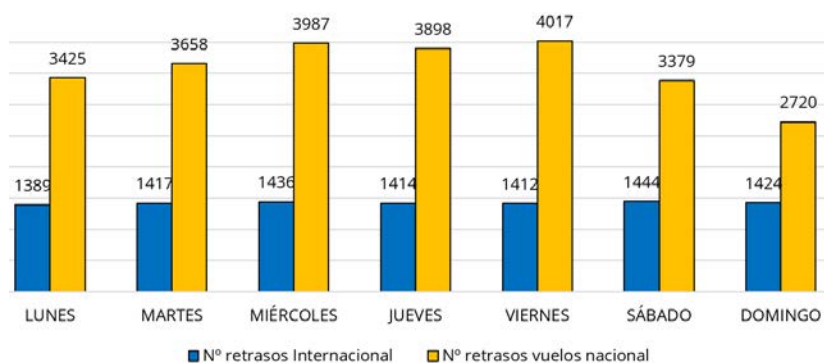


Figura 4. Retrasos por tipo de tráfico (nacional / internacional) y por día (2018) en el aeropuerto [29]

Con relación a los días de la semana, a destinos nacionales, y de acuerdo con los datos de la Figura 4, son los días de mitad de semana donde se presentan más retrasos, y el día sábado para los destinos internacionales. Esto es coherente con la característica de la demanda de viajes, en los días laborales la demanda es principalmente de carácter doméstico (doméstico), y los viajes son de tipo negocio/trabajo. La distribución de los retrasos de vuelos internacionales es homogénea a lo largo de la semana; de todas maneras, tocaría analizar, y ya sería en otra investigación posterior, la distribución de los retrasos en los diferentes destinos internacionales (y también por aerolínea), entre destinos largos (continentales) y muy largos (intercontinentales).

En las Figuras 5 y 6 se presentan los retrasos, por día de la semana y mes, en términos porcentuales según duración del retraso.

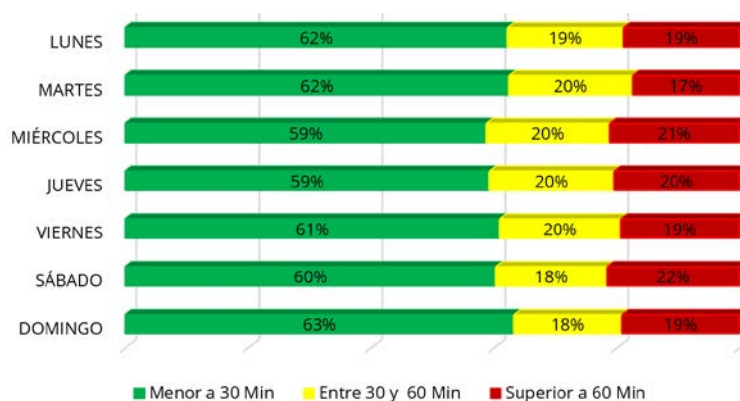


Figura 5. Distribución de los retrasos por día de la semana, según duración de los mismo en minutos y en grupos porcentuales (2018) en el aeropuerto [29]

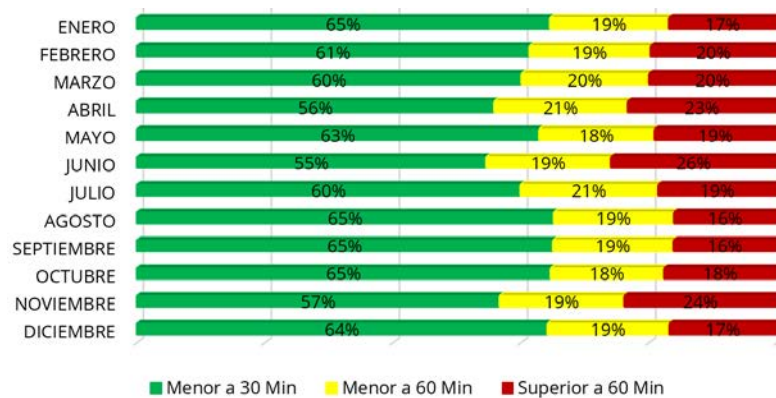


Figura 6. Distribución de los retrasos por mes del año, según duración de los mismo en minutos y en grupos porcentuales (2018) en el aeropuerto en estudio [29]

Los resultados mostrados en las Figuras 5 y 6 muestran cifras muy preocupantes, desde el punto de vista del pasajero y también en relación a la gestión de las operaciones, tanto de las líneas aéreas como del aeropuerto. El alto porcentaje de demoras en rango de 0-30 minutos no es grave, ni tampoco tiene que afectar a la calidad del servicio (ya sea de la línea aérea como del aeropuerto), ya que es un tiempo que un pasajero puede aceptar con relativa paciencia, por ello, y por este rango de demoras, las aerolíneas no se ven penalizadas económicamente por la autoridad aeronáutica (siempre y cuando sean ellas las responsables de las demoras).

Ahora bien, el porcentaje de demoras en el rango de horario desde los 30 minutos a más allá de 1 hora, que alcanza una media de casi 40%, es muy alto, considerando, como se dijo anteriormente, que el aeropuerto en estudio no está, teóricamente, en situación de saturación. Esta situación atenta contra la calidad del servicio (tanto de líneas aéreas como del propio aeropuerto), afecta a la imagen del aeropuerto, penaliza económicamente, y mucho, a las aerolíneas, y genera una propagación de los retrasos a otros aeropuertos de la red, ya que es sistema de transporte aéreo funciona en estructura de red, y bajo una modalidad conocida como *hub-and-spoke*, es decir, concentración y distribución a través de un aeropuerto *hub* (distribuidor), como es el caso del Aeropuerto El Dorado.

La información de la base de datos de retrasos se cruzó con la información de parámetros de los retrasos, es decir, las causas precisas a las que se puede imputar un retraso (85 parámetros causales diferentes). En la Tabla 3 se presentan las primeras treinta causas generadoras de retrasos (que además son las más relevantes).

Tabla 3. Causalidad de los retrasos Aeropuerto El Dorado en 2018 [29]

Código	Causa	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta
63	Abordaje tardío de la tripulación técnica o procedimientos de salida demorados	9%	9%
41	Defectos del avión (técnicos u otros)	8%	17%
71	Problemas en el aeropuerto de salida	6%	23%
87	Problemas en instalaciones aeroportuarias	6%	30%
89	Restricciones en el aeropuerto de origen	6%	36%
72	Restricciones en el aeropuerto de destino	5%	41%
81	Problemas imputables a ATFM	5%	46%
93	Demoras o problemas en rotación (servicios de handling)	4%	50%
66	Abordaje tardío de la tripulación de cabina o problemas en procedimientos especiales de salida	4%	54%
51	Daño durante operaciones de vuelo	4%	58%
66	Abordaje tardío de la tripulación de cabina o procedimientos especiales de salida	4%	61%
19	Problemas de abordaje (Pax)	3%	64%
15	Problemas de abordaje (tripulación)	2%	66%
62	Requerimientos operacionales	2%	68%
3	Incontrolables (<i>handling</i>)	2%	70%
36	Problemas en suministro de combustible	2%	72%

96	Control de operaciones	2%	74%
9	Tiempo de tránsito por itinerario inferior	2%	76%
46	Cambio de avión	2%	78%
55	Control de salidas	2%	79%
73	Problemas en aeropuerto alterno de destino o en ruta	2%	81%
86	Inmigración, aduanas, sanidad	2%	83%
83	Restricción en aeropuerto de destino	2%	84%
52	Daño en aeronave durante operaciones de tierra	1%	85%
91	Conexión de carga o equipaje	1%	86%
68	Error de la tripulación de cabina o solicitudes especiales	1%	87%
42	Mantenimiento programado	1%	88%
95	Rotación de tripulación	1%	89%
64	Faltante de tripulación técnica	1%	90%
61	Plan de vuelo	1%	91%

En la Figura 8 se presenta las 30 causas principales que generaron el 91% de los retrasos en toda la operación del año 2018 para el aeropuerto en estudio, cada causa lleva el valor de la frecuencia relativa y la línea curva verde la frecuencia absoluta de la causalidad de los retrasos.

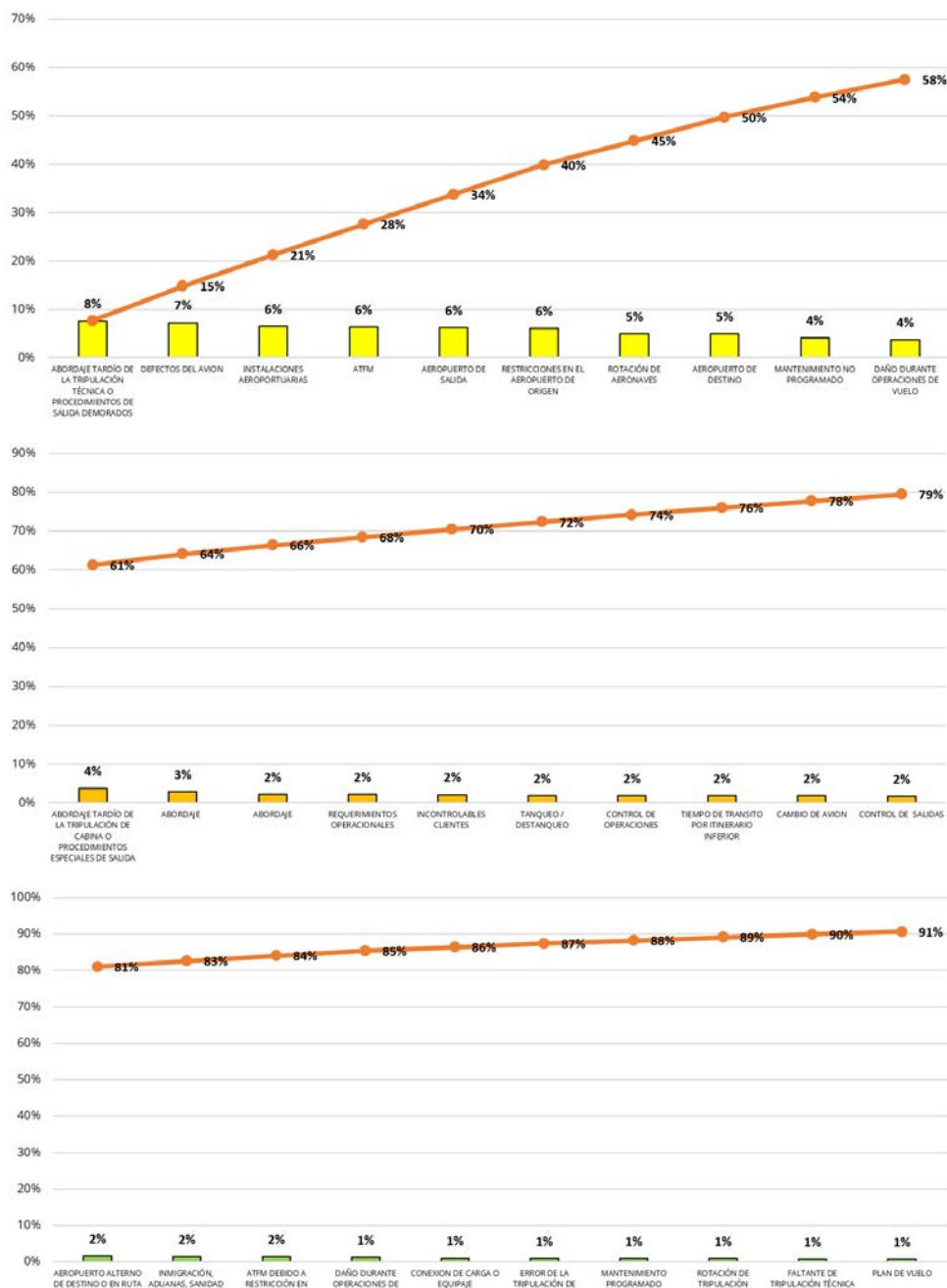


Figura 8. Diagramas de Pareto. Distribución de las causas (o motivos) de los retrasos totales (nac. + intl.), 2018 [29]

De las 80 causales existentes y aceptadas por la normatividad utilizada por la autoridad aeronáutica de Colombia para identificar y clasificar un retraso, en el Aeropuerto de Bogotá-El Dorado, 30 causales representan el 91% de la totalidad de los retrasos y de la totalidad de la información reportada para el año 2018, 70 causales representan el 100% de los retrasos.

6. CONCLUSIONES

Analítica de Datos, en conjunción con la metodología aquí implementada (CRIPS en las fases de Minería de Datos), se presenta como muy oportuna y útil, para la caracterización de los retrasos o demoras de vuelos comerciales programados en un aeropuerto.

Como se ha podido apreciar, el origen de los retrasos en un aeropuerto, sobre todo grande o muy grande (como es el caso del aeropuerto de estudio aquí seleccionado), es muy variado. Múltiples circunstancias, habitualmente, generan o son fuentes de generación de demoras, y muchas de ellas, muy relevantes en lo que se refiere al tiempo que consume dicha demora.

Caracterizar las demoras en un aeropuerto es el primer paso para indagar otros efectos derivados de dichas demoras, tanto en el mismo aeropuerto como en otros, ya que el transporte aéreo funciona en estructura de red, y ya está demostrado (ver Revisión de la Bibliografía) que los retrasos tienen la capacidad de propagarse a lo largo de la red (local/regional de aeropuertos). La siguiente línea de investigación es precisamente eso, indagar como los retrasos generados en el principal aeropuerto de Colombia se propagan a lo largo de la red nacional de aeropuertos, y viceversa.

REFERENCIAS

- [1] Ashford, N.; Mumayiz, S. y Wright, P. *Airport Engineering*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W. and Young, S. *Planning and Design of Airports*, New York: McGrawHill, 2010.
- [3] de Neufville, R. and Odoni, A. *Airport Systems, Planning, Design, and Management*, New York: McGrawHill, 2013.
- [4] Czerny, A. "Airport congestion management under uncertainty," *Transportation Research Part B*, vol. 44, pp. 371–380, 2010.
- [5] Ahmadbeygi, S.; Cohn, A.; Guan, Y. y Belobaba, P. "Analysis of the potential for delay propagation in passenger airline networks," *Journal of Air Transport Management*, vol. 14, pp. 221–236, 2008.
- [6] Britto, R.; Dresner, M. and Voltes, A. "The impact of flight delays on passenger demand and societal welfare," *Transportation Research Part E*, 48(2), 460–469, 2012.
- [7] Du, W.; Zhang, M.; Zhang, Y.; Cao, X. and Zhang, J. "Delay causality network in air transport systems," *Transportation Research Part E*, vol. 118, pp. 466–476, 2018.
- [8] Zou, B. and Hansen, M. "Flight delay impact on airfare and flight frequency: A comprehensive assessment," *Transportation Research Part E*, vol. 69, pp. 54–74, 2014.
- [9] Pyrgiotis, N.; Malone, K. and Odoni, A. "Modelling delay propagation within an airport network," *Transportation Research Part C*, vol. 27, pp. 60–75, 2013.
- [10] *Cost of ATC Delays*. Washington DC: Air Transportation Association (USA), 2009.
- [11] *Your Flight Has Been Delayed Again: Flight Delays Cost Passengers, Airlines, and the U.S. Economy Billions*. Washington, DC: U.S. Congress Joint Economic Committee, 2008.
- [12] Swift, R.S. *Accelerating customer relationships: Using CRM and relationship technologies*. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall PTR, 2000.
- [13] Carrier, C. and Povel, O. "Characterising data mining software," *Intelligent Data Analysis*, vol. 7, pp. 181–192, 2003.
- [14] Han, J., Kamber, M., and Pei, J. *Data Mining: Concepts and Techniques*, Waltham (MA): Elsevier, 2011.
- [15] Wang, Y.; Zhu, Y.; Zhu, C., Wu, F.; Yang, H.; Yan, Y. and Hue, C. "Indicator of serious flight delays with the approach of time-delay stability," *Physica A*, vol. 518, pp. 363–373, 2019.
- [16] Borsky, S. y Unterberger, C. "Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events," *Economics of Transportation*, vol. 18, pp. 10–26, 2019.
- [17] Yu, B.; Guo, Z.; Asian, S.; Wang, H. and Chen, G. "Flight delay prediction for commercial air transport: A deep learning approach," *Transportation Research Part E*, vol. 125, pp. 203–221, 2019.
- [18] Henriques, R. and Feiteira, I. "Predictive Modelling: Flight Delays and Associated Factors, Hartsfield–Jackson Atlanta International Airport," *Procedia Computer Science*, vol. 138, pp. 638–645, 2018.
- [19] Scarpel, R. and Pelicioni, L. "A data analytics approach for anticipating congested days at the São Paulo International Airport," *Journal of Air Transport Management*, vol. 72, pp. 1–10, 2018.

- [20] Pérez-Rodríguez, J.; Perez-Sanchez, J. and Gomez-Deniz, E. "Modelling the asymmetric probabilistic delay of aircraft arrival," *Journal of Air Transport Management*, vol. 62, pp. 90-98, 2017.
- [21] Belcastro, L.; Marozzo, F.; Talia, D. y Trunfio, P. "Using scalable data mining for predicting flight delays," *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 8, pp. 1-20, 2016.
- [22] Sternberg, A.; Carvalho, D.; Murta, L.; Soares, J. and Ogasawara, E. "An analysis of Brazilian flight delays based on frequent patterns," *Transportation Research Part E*, vol. 95, pp. 282-298, 2016.
- [23] Kafle, N. and Zou, B. "Modeling flight delay propagation: A new analytical-econometric approach," *Transportation Research Part B*, vol. 93, pp. 520-542, 2016.
- [24] Campanelli, B.; Fleurquin, P.; Arranz, A.; Etxebarria, I.; Ciruelos, C.; Eguíluz, V. y Ramasco, J. "Comparing the modeling of delay propagation in the US and European air traffic networks," *Journal of Air Transport Management*, vol. 56, pp. 12-18, 2016.
- [25] Fleurquin, P.; Ramasco, J. and Eguiluz, V. "Systemic delay propagation in the US airport network," *Scientific Reports*, vol. 3, pp. 1-6, 2013.
- [26] Santos, G. and Robin, M. "Determinants of delays at European airports," *Transportation Research Part B*, vol. 44, pp. 392-403, 2010.
- [27] Tu, Y.; Ball, M. and Jank, W. "Estimating Flight Departure Delay Distributions-A Statistical Approach with Long-Term Trend and Short-Term Pattern," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 103, pp. 112-125, 2008.
- [28] Díaz Olariaga, O. "Políticas de privatización de aeropuertos. El caso de Colombia," *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal*, vol. 29, pp. 7-35, 2017.
- [29] Aerocivil. Estadísticas. Recuperado: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas>, 2021.
- [30] Jones, H. *Data Analytics*, Bromsgrove: Vicelane, 2020.
- [31] Wu, Y.B.; Li, Q.; Bot, R.S. and Chen, X. "Finding nuggets in documents: a machine learning approach," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 57, pp. 740-52, 2006.
- [32] Wang, H. and Wang, S. "A knowledge management approach to data mining process for business intelligence," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 108, pp. 622-634, 2008.
- [33] Dorre, J.; Gerstl, J. and Seiffert, R. "Text Mining: Finding Nuggets in Mountains of Textual Data," *KDD-99, Fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Diego (USA), 1999.
- [34] Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C. and Wirth, C. *CRISP-DM 1.0 Step by Step Data Mining Guide*, SPSS Inc., 2000.
- [35] Wirth, R. and Hipp, J. "CRISP-DM: Towards a Standard Process Model for Data Mining," *Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining*, pp. 29-39, 2000.
- [36] Long, C. and Talbot, K. *Data science & big data analytics. Discovering, analyzing, visualizing and presenting data*. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons, 2015.
- [37] Saltz, S. and Shamshurin, I. "Big data team process methodologies: A literature review and the identification of key factors for a project's success," *Proceeding of IEEE International Conference on Big Data*, pp. 2872-2879, 2016.
- [38] Schröerab, C.; Kruse, F. and Gómez J. "A Systematic Literature Review on Applying CRISP-DM Process Model," *Procedia Computer Science*, vol. 181, pp. 526-534, 2020.

Propiedades estructurales y conducción térmica en nanohilos de CuO por medio de simulación molecular. Resultados previos

José Darío Agudelo Giraldo¹

Diego Arias Mateus²

Henry Reyes Pineda³

¹ *Universidad del Quindío*

² *Universidad Autónoma de Manizales*

³ *Universidad Católica de Pereira*

Colombia

Por medio de dinámica molecular y utilizando un potencial tipo Charge optimizing many body potential COMB3, se simularon nanohilos de CuO. Los nanohilos fueron crecidos a lo largo del eje $\langle 001 \rangle$, como se observa experimentalmente. Las simulaciones de relajación del sistema fueron realizadas por 50ns con paso de tiempo de 5 fs a Temperatura constante. Los resultados evidencian que la falta de periodicidad en el plano basal hace que la muestra sufra un efecto de contracción del parámetro de red b de la estructura triclinica con una reducción de la distancia Cu-O. Adicionalmente, un efecto de constricción sobre los planos inclinados, producto de las cargas superficiales, deforma el nanohilo, produciendo ondulaciones. La conductividad térmica del nanohilo se calcula a diferentes temperaturas, entre 200K y 600K, por medio de la ecuación de Green-Kubo bajo ensamble NVE. Los resultados evidencian un pico alrededor de la temperatura ambiente con una tendencia similar a las observadas en materiales semiconductores.

¹ Pasante Posdoctoral. Profesor investigador.

Contacto: josed.agudelog@autonma.edu.co

² Profesor investigador.

Contacto: diego.arias@ucp.edu.co

³ Profesor investigador.

Contacto: hreyes@uniquindio.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, muchas investigaciones se han centrado en controlar y manipular la conductividad térmica de materiales unidimensionales. Esta propiedad es un criterio crucial en el rendimiento operativo de los dispositivos semiconductores, en especial aquellos involucrados en la producción de energía a partir de nuevas fuentes como la luz y la temperatura.

Estudios tanto experimentales como teóricos han incluido principalmente elementos como Si, Ge, Bi, Ti, óxidos de Cu y de Zn y sus híbridos [1, 2]. Los estudios han estado principalmente enfocados en dos aspectos 1) en los efectos de tamaño, longitud, diámetro, orientación y sección transversal, sobre la conductividad térmica y 2) en la puesta a prueba de diferentes formas de nanoestructuración para controlar los fonones en la red cristalina [1, 3].

Nuestro trabajo está orientado al análisis térmico de nanohilos de ZnO/CuO. Los compuestos ZnO de tipo n y CuO de tipo p son actualmente materiales de alta demanda para aplicaciones termoeléctricas [4]. Aunque su figura de mérito ZT no las ubica dentro de los materiales de alta productividad, su bajo costo y bajo índice de contaminación en producción les han garantizado un espacio en la industria. Los resultados aquí presentados se concentran en CuO, inicialmente.

Aunque un gran número investigaciones experimentales han sido realizadas en los óxidos de Cobre, persisten aún algunas especulaciones en cuanto a la influencia de factores estructurales, pues el carácter iónico de estos elementos tiene a deformar las estructuras cristalinas de los nanohilos [2].

En aras de dilucidar el efecto, en este trabajo se presentan resultados de simulación por medio de la técnica de dinámica molecular. El estudio se enfoca principalmente en la correlación entre las deformaciones de estructura cristalina y la conductividad térmica a diferentes temperaturas.

2. MÉTODO

Las simulaciones se realizarán con los archivos del potencial COMB3 (Charge-Optimized Many-Body third-generation) en LAMMPS [5] [6]. La parametrización se realizó en unidades metálicas. Brevemente, la energía total del potencial está descrita por la ecuación (1).

$$E_T = \sum_i \{E_i^{Self}(q_i) + \sum_{j>i} [E_{ij}^{Short}(r_{ij}, q_i, q_j) + E_{ij}^{Coul}(r_{ij}, q_i, q_j)] + E^{polar}(r_{ij}, q_i) + E_{ij}^{VDW}(r_{ij}) + E_i^{barr}(q_i) + E^{corr}(r_{ij}, \theta_{ijk})\} \quad (1)$$

Dónde:

$E_i^{Self}(q_i)$ es la energía propia del átomo i (incluidas las energías de ionización atómica y las afinidades electrónicas).

$E_{ij}^{Short}(r_{ij}, q_i, q_j)$ es el potencial de orden de enlace entre los átomos i y j.

$E_{ij}^{Coul}(r_{ij}, q_i, q_j)$ son las interacciones de Coulomb.

$E^{polar}(r_{ij}, q_i)$ es el término de polarización para sistemas orgánicos.

$E_{ij}^{VDW}(r_{ij})$ es la energía de van der Waals.

$E_i^{barr}(q_i)$ es una función de barrera de carga.

$E^{corr}(r_{ij}, \theta_{ijk})$ son términos de corrección angular.

Los potenciales COMB son potenciales de carga variable. La carga de equilibrio en cada átomo se calcula mediante el método de ecualización de electronegatividad QEq. No obstante, se inicializó la carga de acuerdo a un valor aproximado efectivo de $-0.9e$ y $-1.21e$ para el CuO de acuerdo a reportes de [7].

La muestra inicial consiste en cilindros de 400nm de largo ubicado en la dirección z, con diámetros menores o iguales 25nm. Ejemplos de estructuras cristalinas iniciales a escalas más pequeñas pueden observarse en la Figura 1, tanto para el CuO con estructura tipo tenorita como para el ZnO con estructura tipo Wurtzita. Los parámetros de red para ambas estructuras se presentan en la Tabla 1. En ambos casos el parámetro c fue ubicado en dirección z, a en xy b en y.

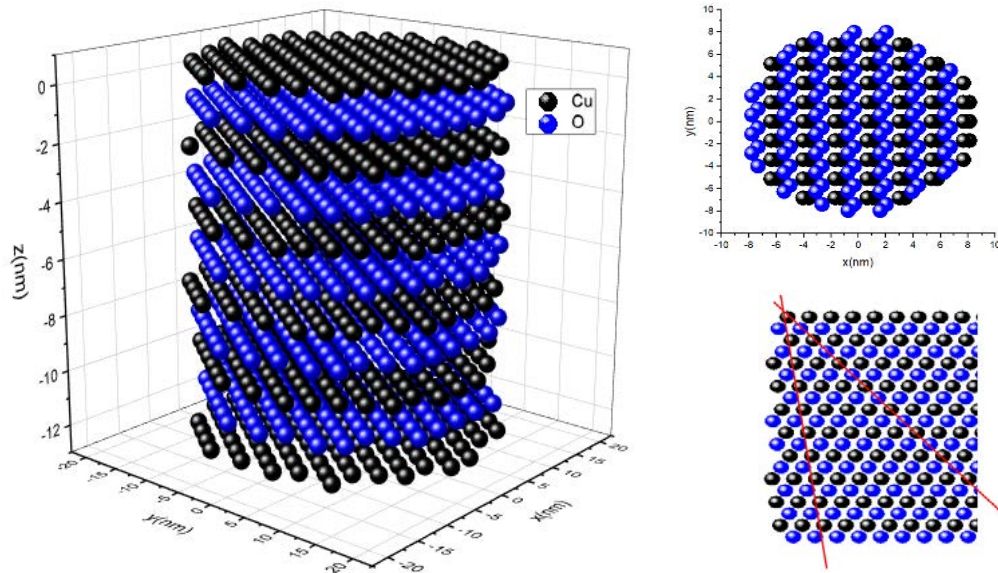


Figura 1. Muestra iniciales de nanohilos de CuO con estructura tipo tenorita [8]

Tabla 1. Parámetros de red cristalina para CuO implementados en la construcción de la muestra [8]

CuO	
Estructura	Tenorita
sistema cristalino	Triclínico
a	4.6837 Å
b	3.4226 Å
c	5.1288 Å
β	99.54°

Bajo un ensamble termodinámico tipo NVT se recopilaban los datos de energía y temperatura instantánea en función del tiempo para constatar la estabilidad del sistema. Después de diferentes pruebas preliminares fue seleccionado un paso de tiempo de 5fs por un periodo de 5 ns a diferentes temperaturas, sin utilizar límites periódicos.

Posteriormente, bajo un ensamble termodinámico tipo NVE por 0.2ns a paso de tiempo de 0.2 fs, fue calculada la conductividad térmica κ . Por definición, el tensor κ es una medida de la propensión de un material a transmitir energía térmica de manera difusiva según la ley de Fourier de la ecuación (2).

$$\vec{j} = -\kappa \vec{\nabla} T \quad (2)$$

Donde J es el flujo de calor en unidades de energía por área por tiempo y $\vec{\nabla} T$ es el gradiente espacial de temperatura. A menudo se aproxima como una cantidad isotrópica, es decir, como un escalar. La conductividad posee un componente electrónico y otro acústico.

En nuestros resultados se presenta únicamente la componente acústica a lo largo del nanohilo. No obstante, su dependencia con la temperatura, la ley de Fourier parece no estar total acuerdo con los resultados experimentales a nanoescala. Por tal motivo el método implementado para hallar κ se basó en estabilización bajo condiciones de equilibrio termodinámico de la ecuación (3) de Green-Kubo.

$$\kappa = \frac{1}{k_B T^2 V} \int_0^\infty \langle J_z(0) J_z(t) \rangle dt \quad (3)$$

Esta ecuación relaciona el promedio de la autocorrelación del flujo de calor en el tiempo. Así entonces, el flujo de calor se puede calcular a partir de las fluctuaciones de las energías cinética y potencial por átomo, e_i y del tensor de estrés por átomo \vec{S}_i , según la ecuación (4).

$$\vec{j} = \frac{1}{V} [\sum_i e_i \vec{v}_i - \sum_i \vec{S}_i \vec{v}_i] \quad (4)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 2 presenta el estado final de un nanohilo de CuO a 200K. Como puede observarse, la estructura muestra deformaciones con respecto al cilindro inicial planteado.

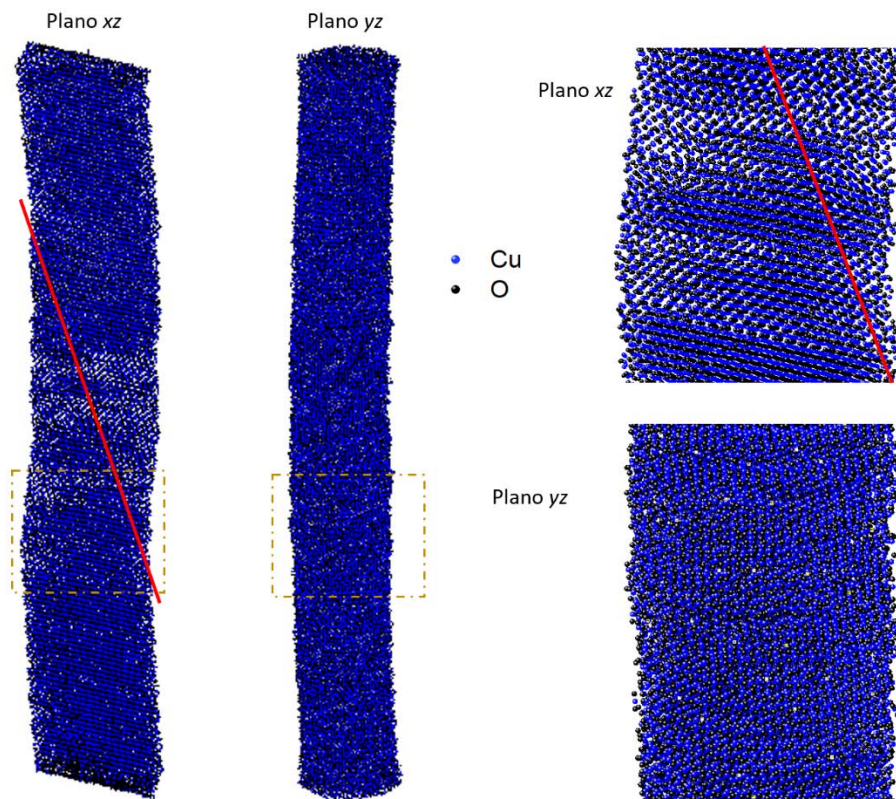


Figura 2. Estado final de nanohilos de CuO luego de la relajación a 200K. los recuadros en línea punteada son para identificar la ampliación representada a la derecha tanto en los planos xz como en el plano yz . La línea roja representa un plano cristalino cuyas conexiones con la superficie coinciden con máximos y mínimos de ondulaciones del nanohilo

En primer lugar, el nanohilo se contrae en dirección y , pasando del radio inicial de 25nm a distancias de 21nm aproximadamente. De manera correspondiente, esta situación es observable en la distribución radial presentada en la Figura 3, donde el pico que se observa en su estado inicial a una distancia igual a $b=3.4226$ Å desaparece, y en cambio uno ubicado alrededor de 3.21 Å aparece en su estado final. De otra parte, la distancia Cu-O más corta (reportada para un material en bulk) pasa de 1.951 Å a 1.62 Å [8]. Esta situación surge por la pérdida de periodicidad en el plano basal, que permite interacciones de Coulomb más fuertes, y por ende enlaces iónicos más contraídos.

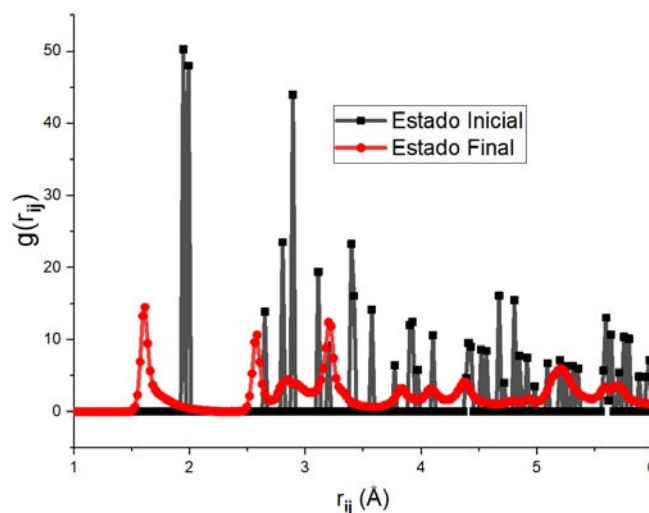


Figura 3. Distribución radial en el estado inicial y final

Adicionalmente, un efecto de contricción se presenta como resultado de las cargas superficiales. Este efecto ha sido reportado en simulaciones de materiales con enlaces iónicos [9]. Particularmente en este material, este esfuerzo produce una cizalladura en la estructura del nanohilo dado el carácter Triclínico de la red cristalina. En las Figuras 1 y 2 puede observarse el plano inclinado involucrado. Especialmente, en la Figura 2 puede notarse una diagonal del plano cruzando el ancho del hilo y definiendo los máximos y mínimos de la ondulación.

Adicionalmente, estos esfuerzos de cizalladura hacen que en los extremos del nanohilo se formen puntas. La distribución radial evidencia también como picos de cristalinidad se ven disminuidos, siendo reemplazados por ensanchamiento de otros picos a baja altura. Tal situación es el reflejo de un desorden estructural que depende de la posición, así: 1) en los extremos del nanohilo un efecto de compresión localizada donde se generan algunas prominencias en los bordes, 2) en las regiones de máxima ondulación, efectos de estrés por incremento y disminución de distancias interatómicas, 3) en zonas intermedias estructuras cristalinas estables, y 4) por pérdida de número de coordinación los átomos superficiales presentan deformaciones de la estructura cristalina.

En nanohilos, el calor es transportado principalmente por fonones acústicos. La dispersión consta de tres tipos diferentes de modos: de corte, correspondientes a la rama acústica transversal, de dilatación, correspondientes a la acústica longitudinal y modos de flexión. Las simulaciones evidenciaron que, en su modo transversal, tanto en dirección x como en dirección y , la conductividad térmica no se presenta ningún tipo alguno de tendencia con la temperatura, con valores que oscilaban entre 0.1 y 0.7 W/m-K. En dirección longitudinal, por el contrario, la conductividad térmica presenta una tendencia clara, como se puede observar en la Figura 4.

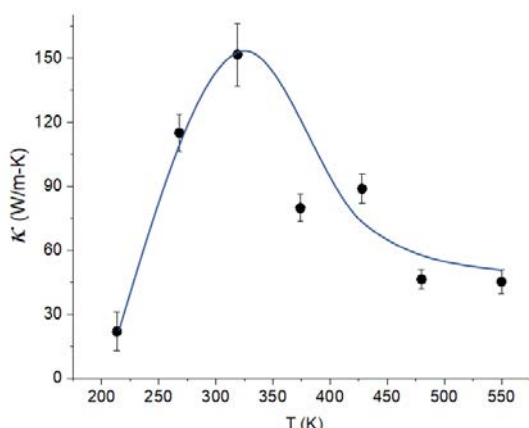


Figura 4. Conductividad térmica en función de la temperatura para nanohilos de CuO. Diferentes realizaciones fueron generadas en cada temperatura. La línea azul es una guía visual

Los valores son evidentemente mucho mayores. Dada esta prevalencia de los modos longitudinales, puede establecerse el nanohilo como un elemento térmicamente unidimensional. La tendencia es similar a la presentado por otros tipos de materiales semiconductores en bulk, en donde un pico característico es observado a una temperatura establecida [10]. Al final de la relajación, la energía potencial del sistema muestra estabilizarse alrededor de $-4.02\text{eV}/\text{átomo}$ a 200K y $-3.98\text{eV}/\text{átomo}$ a 450K, lo cual son valores esperados a causa de la dilatación térmica.

La energía de Coulomb, en cambio muestra estabilizarse a valores muy semejantes alrededor de -1.760eV sin importar la temperatura. Esto evidencia que los grandes cambios de conductividad térmica obedecen principalmente a la energía de interacción de pares.

En el futuro se abordará un estudio de la variación de la conductividad térmica con el diámetro del nanohilo, en donde se caracterizarán la influencia de los efectos superficiales sobre la conductividad. Finalmente, nanohilos de CuO/ZnO serán también simulados para analizar las ventajas y desventajas de la unión p-n en relación a la conductividad térmica.

4. CONCLUSIONES

Se presentan los resultados preliminares obtenidos por dinámica molecular de nanohilos de CuO. Los parámetros iniciales para la ubicación de los átomos en la muestra se tomaron de los reportes en bulk del material. Los resultados indican que, aunque se conservan aproximadamente las dimensiones de parámetros de red en xz , en y se presenta una disminución considerable.

La pérdida de periodicidad de la red en plano haría los enlaces iónicos más fuertes acortando la distancia Cu-O. Un efecto de constricción producido por la atracción de las cargas superficiales genera deslizamientos de planos internos, produciendo ondulaciones en la forma general del nanohilo.

La conductividad térmica muestra estar en el rango de valores presentados en la literatura. No obstante, se observa un desplazamiento del máximo valor a temperaturas más altas. Probablemente, este resultado es debido a una mayor dispersión de fonones de la red bajo la unidimensionalidad del nanohilo y a los defectos establecidos por la constricción.

REFERENCIAS

- [1] Z. Zhang and J. Chen, "Thermal conductivity of nanowires," *Chin. Phys. B*, vol. 27, pp. 35101–13, 2018.
- [2] Noluthando Kana, K. Kaviyarasu, T. Khamliche, C. Maria Magdalane, and M. Maaz, "Stability and thermal conductivity of CuO nanowire for catalytic applications," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, pp. 103255–8, 2019.
- [3] L. Debbichi, M. C. Marco de Lucas, J. F. Pierson, and P. Krüge, "Vibrational Properties of CuO and Cu₄O₃ from First-Principles Calculations, and Raman and Infrared Spectroscopy," *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, p. 10232–10237, 2012.
- [4] S. M. Galagali, R. G. Vaidya, M. D. Kamatagi, and N. S. Sankeshwar, "Lattice thermal conductivity of ZnO nanowires," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1665, pp. 120017–3.
- [5] T. Liang *et al.*, "Classical atomistic simulations of surfaces and heterogeneous interfaces with the charge-optimized many body (COMB) potentials," *Mat. Sci. & Eng*, vol. R 74, pp. 255–279, 2013.
- [6] S. Plimpton, "Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics," *J Comp Phys*, vol. 117, pp. 1–19, 1995.
- [7] B. Devinet *et al.*, "Atomistic simulations of copper oxidation and Cu/Cu₂O interfaces using charge-optimized many-body potentials," *Phys. Rev. B*, vol. 84, p. 125308, 2011.
- [8] P. A. Korzhavii and B. Johansson, "Literature review on the properties of cuprous oxide Cu₂O and the process of copper oxidation," *Technical Report-Svensk Kärnbränslehantering AB*, vol. SKB TR-11-08, pp. 1–47, 2011.
- [9] A. J. Kulkarni and M. Zhou, "Surface-effects-dominated thermal and mechanical responses of zinc oxide nanobelts," *Acta Mech Sinica*, vol. 22, pp. 217–224, 2006.
- [10] C. de Tomas, A. Cantarero, A. F. Lopeandia, and F. X. Alvarez, "Thermal conductivity of group-IV Semiconductors from a Kinetic-Collective Model," *Proceedings of The Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, vol. 470, p. 20140371(14), 2014.

Diseño de productos funcionales derivados del fruto y la hoja del sauco

Laura López Salgado¹
Santiago Torres Pacheco²
María Hernández Carrión³
Universidad de Los Andes
Colombia

En Colombia crecen diferentes especies de plantas que son desaprovechadas a pesar de su potencial uso para la nutrición y salud, como es el caso del sauco. De igual forma, en la actualidad, la demanda de productos elaborados con componentes naturales y que aporten beneficios para la salud ha aumentado. Debido a esto, se identificó la oportunidad de desarrollar productos elaborados a partir del fruto y de la hoja del sauco. Mediante un análisis de mercado se decidió elaborar unas barritas energéticas y una mascarilla facial. Posteriormente, mediante un análisis sensorial en el que se empleó una escala hedónica de 9 puntos y una escala Just About Right, quedó en evidencia que la textura crujiente es de suma importancia para los consumidores. Haciendo uso de un texturómetro se determinó la dureza de la barrita y se comparó con 2 barritas control. Se encontró que eran estadísticamente iguales. Adicionalmente, se midió la humedad y la dureza de las barritas a lo largo de 4 semanas, en las cuales no hubo cambios significativos, lo que quiere decir que tienen buena estabilidad. De igual forma, se realizó un cálculo teórico de la información nutricional de la barrita, la cual tiene 94 kcal, un alto contenido de fibra dietética, un bajo contenido en sodio, un contenido básico de vitamina C y hierro, no contiene grasas trans, gluten, nueces, y contiene 8 g de sauco en una porción de 25 gramos. En cuanto a la mascarilla, se obtuvo un Índice de Estabilidad del Turbiscan de 0.5 a los 30 minutos, lo que la hace estadísticamente igual de estable que una mascarilla comercial. Por otro lado, la textura de la mascarilla de sauco es diferente a la de control, lo que la hace ligeramente más difícil de aplicar sobre la piel.

¹ Ingeniera Química.

Contacto: l.lopez12@uniandes.edu.co

² Ingeniero Químico.

Contacto: s.torresp@uniandes.edu.co

³ Profesora Asistente. Grupo de Diseño de Productos y Procesos GDPP.

Contacto: m.hernandez1@uniandes.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En los andes colombianos, se desarrollan diferentes especies de plantas alimenticias que son desaprovechadas a pesar de su potencial para la alimentación, nutrición y salud, como es el caso del sauco en Bogotá, el cual se encuentra de manera natural por toda la ciudad. El sauco *Sambucus nigra* se da en altitudes entre los 1000 y 3000 msnm en zonas templadas y frías, crece cerca a fuentes hídricas y se destaca por ser poco exigente en suelos [1]. Su reproducción puede ser sexual o vegetativa (asexual) y presenta alto porcentaje de sobrevivencia por lo que se favorece su reproducción y siembra en diferentes medios [2].

Esta planta, se caracteriza por tener principios bioactivos antioxidantes, que se encuentran distribuidos en diferentes concentraciones, en las diferentes partes de la planta. Su actividad antioxidante se debe a la alta cantidad de compuestos fenólicos que se encuentran en las bayas, flores y hojas. Estos compuestos, constituyen una de las principales clases de metabolitos secundarios de los vegetales que intervienen en el crecimiento y reproducción de la planta, así como en procesos defensivos contra agentes patógenos, depredadores o radiación ultravioleta [3]. Entre los compuestos fenólicos se encuentran los fenoles, flavonoides y antocianinas; estas últimas, son los pigmentos responsables del intenso color morado de las bayas del sauco. La capacidad antioxidante de estos compuestos se debe a que, en su estructura, contienen al menos un grupo fenol, que consta de un anillo aromático unido a un grupo hidroxilo, lo que les permite actuar como agentes reductores, mediante la donación de un hidrógeno [4].

Esto, les confiere la capacidad de inhibir o retardar el proceso oxidativo de las células, captando y neutralizando los radicales libres e interfiriendo con la iniciación, o propagación, de reacciones en cadena incontroladas que pueden causar la degeneración, envejecimiento y pérdida de su función [5]. Así mismo, estos compuestos poseen actividad antiinflamatoria, antitumoral, antiviral, entre otros [6], por lo que se han utilizado tradicionalmente para la elaboración de medicinas caseras y se han hecho numerosos estudios para determinar las características físicas y químicas de esta planta con el fin de su implementación en la industria farmacológica y en la industria de alimentos.

Adicionalmente, en la actualidad, las personas se preocupan más por llevar un estilo de vida saludable en el que la alimentación sana y con mayores beneficios juega un papel esencial. Es por esto que las exigencias de los consumidores se dirigen más a la búsqueda de nuevos productos funcionales que, además de tener un alto aporte nutricional, contengan en su composición compuestos bioactivos de origen vegetal [7]. Consecuentemente, se ha dado el surgimiento de un nuevo mercado: el de los alimentos funcionales. Estos alimentos son aquellos que, además de aportar los nutrientes básicos, contiene uno o más componentes que desempeñan funciones fisiológicas específicas en el organismo con el fin de mejorar la salud y reducir el riesgo a padecer ciertas enfermedades [8]. El desarrollo de estos alimentos se da mediante la incorporación de algún compuesto bioactivo, como prebióticos, probióticos, compuestos fenólicos, vitaminas, ácidos grasos, entre otros [9]. Con esto en mente, los efectos beneficiosos del alimento desarrollado no solo dependen de su contenido en compuestos bioactivos, sino que estas moléculas deben llegar al órgano de acción, por lo que, una vez ingeridas, deben ser absorbidas, pasar a la sangre y así distribuirse en el organismo [10].

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue diseñar, elaborar y evaluar un alimento funcional y un producto cosmético a base de sauco y, de esta forma fomentar la explotación de esta planta tan beneficiosa y abundante en Bogotá. Con estos dos productos se pretende abarcar la funcionalidad del sauco en el cuerpo humano tanto internamente como externamente, pues la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos es diferente para los dos casos. Es importante resaltar que, la biodisponibilidad, es la rapidez y cantidad de compuesto bioactivo que es absorbido en el sitio de acción [11]. Con esto en mente, en cuanto al alimento, para que el sauco pueda ejercer sus efectos favorables, las moléculas bioactivas deben llegar al sitio de acción, por lo que, una vez ingeridas, deben ser absorbidas, pasar a la sangre y así distribuirse en el organismo [10]. Por otro lado, en cuanto al producto cosmético, la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos es mayor debido a que su aplicación es cutánea por lo que actúan directamente en las células de la piel sin necesidad de atravesar más barreras lo que hace que la concentración del compuesto en el órgano de acción sea más alta que al ser ingeridos [11].

Ahora bien, para la elaboración de los productos, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre las propiedades y caracterización de las bayas y la hoja del sauco con el fin de conocer su actividad antioxidante. Posteriormente, se realizó un estudio de mercado con el fin de que los consumidores proporcionaran la información necesaria para escoger los productos que se van a desarrollar. Posteriormente, se realizó un análisis sensorial del alimento y se analizaron los productos fisicoquímicamente con el fin de determinar si estos pueden ser competitivos en el mercado colombiano.

2. MÉTODO

2.1 Encuesta

Inicialmente, para la elección de los productos a desarrollar y, para realizar un correcto diseño del producto, fue necesario conocer qué es lo que está demandando el consumidor. Por esta razón, se elaboró una encuesta, la cual respondieron 727 personas de las cuales 57% fueron mujeres y el 43% hombres que se encontraban en rangos de edad entre los 18 y 66 años. En esta, se les preguntó a los consumidores sus preferencias acerca de ciertos productos en los que se podría emplear el sauco. Las primeras preguntas de la encuesta permitieron identificar al consumidor. Entre estas se encontraron: el rango de edad, género, nivel de estudios, estrato socio económico y hábitos alimentarios.

A continuación, se les dio una contextualización acerca del sauco y sus propiedades con el objetivo de que pudieran responder si les interesaría consumir o utilizar un producto elaborado a partir del sauco. Los productos que se propusieron en la encuesta se dividieron en dos categorías de acuerdo con las características del producto. Inicialmente, se evaluaron diferentes alimentos como unas gomitas saludables, un té tipo *bubble tea*, una mermelada, un jugo y unas barritas de fruta.

Estos productos se agruparon de acuerdo a su rango de precios. A continuación, se evaluaron los productos cosméticos como una mascarilla y una crema facial. Por último, con base en los resultados de la encuesta se decidió cuales productos elaborar, así como las restricciones que se debían tener en cuenta en relación a qué aditivos utilizar y a qué precios ajustarse. Con esto en mente, el alimento escogido a desarrollar fue la barrita de fruta debido a que además de tener la segunda mayor cantidad de votos, tuvo la mejor aceptación. En cuanto al producto cosmético, se escogió la mascarilla debido a que más personas están dispuestas a incorporarla en su rutina de cuidado personal.

2.2 Formulación del alimento

La formulación de la barrita consistió en cuatro partes. La primera se basó en la elaboración de una mermelada baja en azúcar de sauco con el fin de incorporar el fruto a la barrita. Debido a que las bayas tienen un sabor amargo, la mermelada permitía incorporar el fruto de forma que tuviera un sabor agradable. Adicionalmente, en el proceso de la elaboración de la mermelada se maceraron las bayas lo que permite extraer una mayor cantidad de antioxidantes los cuales se encuentran principalmente en las paredes celulares de las cáscaras [6]. Por esta razón, la bioaccesibilidad de los compuestos fenólicos aumenta [6].

Adicionalmente, entre las sustancias constituyentes del sauco se encuentra la sambunigrina, que es un glucósido cianogenético que se encuentra en las semillas de las bayas y que, en contacto con la enzima emulsina, que se encuentra en la saliva, produce ácido cianhídrico y se libera cianuro. Por este motivo, el consumo de las bayas de sauco crudas y, en grandes cantidades puede llegar a ser nocivo [12]. Sin embargo, el proceso térmico aplicado a la materia prima hace que la sambunigrina se degrade [13], por lo que la mermelada es el método más adecuado para la incorporación del sauco al alimento.

Para esto, se utilizaron 500g de sauco fresco, recogido de diferentes árboles de sauco en la ciudad de Bogotá, 50g de azúcar blanca marca Manuelita y, 6g de edulcorante con Stevia marca D'Light. Inicialmente se dejaron en un recipiente las bayas con el azúcar durante 3h. Seguidamente, se colocó el recipiente sobre fuego, se le adicionó el edulcorante y, se maceraron las bayas. Esta mezcla, se dejó en cocción durante 1h y 15 min con agitación constante. Finalmente, se coló la mezcla, quedando 250g de mermelada.

La segunda parte, consistió en la incorporación de pectina procedente de manzana verde con el fin de darle consistencia a la mermelada ya que esta resultó muy líquida por el bajo contenido de azúcar. Para esto, se agregaron en un recipiente 800g de manzana verde peladas, 25g de zumo de limón y, 350ml de agua. Esta mezcla se dejó cocinar a fuego lento durante 2h con agitación constante. Pasadas las dos horas, se obtuvieron 660g de pectina, de los cuales se adicionaron 200g a la mermelada de sauco. Finalmente, se adicionaron 25g semillas de chía con el propósito de aumentar su contenido nutricional y mejorar la textura de la mermelada.

A continuación, se elaboró una avena tostada con el fin de conferir mayor crocancia y sabor a la formulación final. Para esto, se utilizaron 160g de avena en hojuelas marca Toning, 30g de miel, 15g aceite de coco, 12.5g de canela molida y 3.75g de esencia de vainilla marca Lavapan. Los ingredientes se incorporaron y, posteriormente, se tostaron en un horno Hotpoint Ariston FH 103 IX/HA, a 165°C durante 35 minutos. Finalmente, se mezclaron 200g de la mermelada final, 145 g de la avena tostada, 45 g de harina de avena y se adicionaron 30 g de miel y 7 g de aceite de coco. Se incorporaron todos los ingredientes, se engrasó una refractaria con aceite de coco y se introdujo la mezcla en el horno a 165°C durante 35 minutos. Posteriormente, se porcionaron las barritas, obteniéndose 12 barritas de 25g cada una. Por último, con el fin de que los consumidores escogieran, se elaboró una presentación en forma de bolita para la que se utilizó la misma mezcla y cantidad que para la barrita y se introdujeron al horno durante 5 minutos a 165°C.

2.3 Análisis sensorial

Con el fin de analizar al consumidor y escoger el producto final entre la barrita y la bolita energéticas desarrolladas a partir de sauco, se realizó un análisis sensorial en el que 71 personas de la ciudad de Bogotá y sus alrededores, de forma anónima, cataron las dos muestras. De los consumidores el 58% fueron mujeres y el 42% fueron hombres y, se encontraban entre los 18 y 65 años de edad. Para llevar a cabo este análisis, se le asignó a cada presentación un código de tres dígitos. La barrita fue porcionada en cuadrados de 3.5 ± 0.1 cm y, 1cm de espesor. Con la misma cantidad con que se cortaron las barritas, se elaboraron las muestras en forma de bolita.

Para calificar estos snacks, la hoja de cata consistía en dos tipos de pruebas. La primera, fue una prueba afectiva de satisfacción en la cual se empleó una escala hedónica de 9 puntos para la aceptabilidad global, la aceptabilidad de la apariencia, de la textura, del color y del sabor de las muestras. La segunda, una descriptiva en escala JAR (Just About Right) de 5 puntos para la dureza, la textura crujiente y el dulzor donde 3 se considera el valor ideal, 1 y 2 demasiado bajo y 4 y 5 demasiado alto [14]. Adicionalmente se hizo un cálculo de penalizaciones con el fin de identificar los atributos que requerían de una mejora. Finalmente, los catadores debían indicar cuál de las dos muestras les gustó más y por qué.

El análisis de las escalas JAR se llevó a cabo en Excel y el análisis estadístico de los atributos en escala hedónica se realizó con el software Minitab. Este último consistió en un análisis de varianza ANOVA utilizando una significancia de $\alpha = 0.05$

2.4 Evaluación del alimento

Con el fin de determinar si las características del alimento formulado cambiaron con el tiempo, se realizaron pruebas de textura por triplicado una vez a la semana, durante 4 semanas. Para ello, se hizo uso del texturómetro TA:HD*plus*C Texture Analyzer (Stable Micro Systems). El equipo, permite determinar la dureza de la muestra mediante un ensayo de flexión de 3 puntos en donde la fuerza máxima es equivalente a la dureza del producto. Adicionalmente, se seleccionaron dos barritas comerciales (TAEQ y JBO) con características similares para utilizarlas como muestras control a las cuales también se le determinó su dureza por triplicado.

Por otro lado, una vez a la semana durante 4 semanas, se determinó la humedad de la barrita con ayuda de una termobalanza Precisa XM 60-HR, con el fin de determinar si se produjeron cambios en el tiempo. Esta medición se realizó por duplicado cada semana. Las barritas se almacenaron a temperatura ambiente envueltas en papel aluminio.

2.5 Formulación de la mascarilla

Para la elaboración de la mascarilla facial se usó como base la formulación de una mascarilla exfoliante de sandía de *Making Cosmetics* [15]. Para preparar esta, fue necesario hacer diferentes fases. Las composiciones de los componentes de cada fase están en base total de toda la mascarilla y son porcentaje peso/peso. La fase A, estuvo compuesta de agua destilada 51.3%, la cual se utiliza como diluyente, glicerina 4% que se utiliza como humectante y, goma xanthan 0.5%, que actúa como espesante. La fase B, estuvo compuesta de escualeno 3.5% que es un emoliente, estearato de glicerilo 2% y alcohol cetearílico 3% que funcionan como emulsificantes y, manteca de karité 2% que se usa como emoliente. La fase C, estuvo compuesta por 24.7% de caolín y 3% de avena pulverizada los cuales sirven para darle textura a la mascarilla.

La fase D, estuvo compuesta por 1% de ácido sórbico que sirve como conservante, 1% de extracto de quinoa que sirve como hidratante, 2.5% de aceite de jojoba que sirve como exfoliante y, 1.6% de extracto de sauco que tiene la función de antioxidante y de darle fragancia a la mascarilla. De este 1.6%, el 0.6% es extracto del fruto el cual también tiene la función de colorante. La fase A se mezcló en un vaso de precipitado y se colocó en una plancha de calentamiento a 60°C. En paralelo, se mezcló la fase B en otro vaso de precipitados y se colocó en otra plancha a la misma temperatura. A la fase A se le adicionó el extracto del fruto para poder darle buen el color a la mascarilla. Seguidamente, se mezcló la fase A y la fase B y, mientras la mezcla seguía sobre la plancha de calentamiento, se adicionaron uno a uno los componentes de la fase C hasta que la mezcla estuvo homogénea. Por último, se dejó enfriar la mezcla hasta unos 30°C y añadió los componentes de la fase D uno por uno.

Ahora bien, en la formulación estuvo incluido el extracto de sauco, el cual reemplazó de la formulación original al extracto de sandía, la vitamina E como antioxidante y el colorante rojo. Este extracto se realizó utilizando como solvente etanol al 95%. Para esto, se maceraron inicialmente las flores y hojas y luego se les adicionó el etanol. Posteriormente, se dejaron en el solvente por 72 horas y, una vez pasó este tiempo se prosiguió a evaporar el solvente. La separación del extracto se debe realizar mediante roto evaporación a 35°C y luego secado al vacío con el fin de no afectar las propiedades de este [16]. Por otro lado, para el extracto de las bayas, se hizo un procedimiento similar; el fruto fresco se adicionó para ocupar entre 1/3 y 1/4 de un recipiente de 470 ml y luego se llenó el resto de etanol al 95% [17]. Se dejó por varios días y luego se evaporó el solvente.

2.6 Evaluación de la mascarilla

Utilizando el texturómetro disponible en el laboratorio: TA:HD plusC Texture Analyzer de la marca Stable Micro Systems, se realizó Back Extrusion con el fin de obtener la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de la mascarilla. Una de las ventajas del test de Back Extrusion, es que no hay necesidad de utilizar un recipiente específico, se puede utilizar el mismo beaker en donde se preparó la mascarilla. El test consiste en que el émbolo del disco realiza una prueba de compresión que extruye el producto hacia arriba y alrededor del borde del disco [18], luego el software del equipo genera una gráfica [18] y, de esta manera determina las propiedades de textura de la muestra.

Adicionalmente, mediante el uso del analizador óptico Turbiscan LAb se evaluó la estabilidad de la mascarilla durante un tiempo de 30 minutos a 25°C. Por último, se hizo la prueba de Back Extrusion y de estabilidad a una mascarilla similar en el mercado con el fin de comparar los resultados. Es importante resaltar que, se escogió una mascarilla del mercado con componentes similares a la desarrollada, con el fin de utilizar esta muestra como control y, de esta forma, comparar con un producto ya comercializado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis Estudio de mercado

A partir de los resultados de la encuesta, quedó en evidencia que la mayoría de las personas ya conocían la planta, sin embargo, desconocían las propiedades de esta. Luego de leer la nota informativa: *El Sauco es*

un arbusto famoso por sus propiedades benéficas para la salud, por lo que se ha utilizado para la elaboración de medicinas caseras a lo largo de la historia. Sus flores, frutos y hojas, poseen actividad antioxidante, lo que hace que las células no envejeczan. Adicionalmente, poseen actividad antioxidante, antitumoral y antiviral lo que ayuda a combatir la gripe y, además, ayuda a prevenir múltiples enfermedades, la mayoría de los encuestados sí estuvo dispuesto a comprar o probar un producto que contuviera sauco debido a los múltiples beneficios para la salud que aporta esta planta. Estos resultados son importantes debido a que dejan en evidencia que, en general, las personas no conocen las propiedades y los efectos favorables que tiene el sauco, por lo que a la hora de realizar el etiquetado se le debe informar al consumidor sobre estos beneficios y así posicionarse mejor en el mercado.

Ahora bien, en cuanto a los alimentos propuestos a base de sauco, se dividió la pregunta en dos debido a la similitud del rango de precios de los diferentes productos. Por un lado, se evaluaron el té con bolitas de gelatina (bubble tea) y las gomitas saludables. Por el otro lado, se evaluaron la mermelada, las barritas de fruta y el jugo. Sin embargo, se analizó inicialmente la aceptación unificada de estos productos, con el fin de seleccionar el producto a desarrollar, pues el rango de precios que los consumidores están dispuestos a pagar tendrá relevancia más adelante a la hora de la elección de las materias primas. Con esto en mente, teniendo en cuenta que los consumidores podían escoger más de un producto, el que tuvo más votos fue las gomitas saludables con un 27%, seguido de las barritas de frutas con un 24%, el té con bolitas estilo bubble tea un 22%, la mermelada con 14% y el jugo con un 13%. Adicionalmente, el 74% de los encuestados, indicó la razón por la que escogieron los productos que seleccionaron.

Con estas respuestas, quedó en evidencia que, a pesar de que las gomitas tuvieron una mayor cantidad de votos, los consumidores las relacionan con productos poco saludables lo cual se aleja del objetivo al que se pretende llegar con el alimento a desarrollar. Por esta razón, se escogió desarrollar las barritas de fruta pues además de tener la segunda mayor cantidad de votos, los consumidores tienen una buena percepción de esta clase de productos tipo snack saludable debido a sus beneficios y a su fácil consumo y portabilidad.

Por otro lado, en cuanto a los productos cosméticos, se propuso una crema facial y una mascarilla. El más votado fue la crema facial con un 57%. Sin embargo, en la pregunta abierta, a pesar de que los comentarios sobre la crema fueron positivos, en los comentarios acerca de la mascarilla los consumidores afirmaron que escogieron este producto sobre la crema debido a que es de uso periódico y no diario. Adicionalmente, las respuestas evidenciaron que las personas prefirieron la mascarilla sobre la crema debido a que es más fácil experimentar con esta, pues algunos afirmaron que, las cremas al ser de uso diario, las prefieren especiales recetadas por el dermatólogo. Así mismo, los encuestados expresaron que es más fácil incorporar una mascarilla que una crema en sus rutinas de cuidado para la piel. Por lo anterior, a pesar de que no fue la opción más votada, se decidió que la mascarilla sería el producto cosmético a elaborar.

Es importante resaltar que, para los consumidores, es de gran importancia que el alimento sea hecho con ingredientes naturales provenientes de plantas y no animales, que el producto no contenga sustancias artificiales y, además, que sus empaques sean amigables con el medio ambiente. Lo anterior, nos ayuda a tener en cuenta aspectos importantes que van más allá del tipo de alimento a desarrollar y que hacen parte de los factores para tener éxito en la formulación de este.

Por último, se les preguntó a los consumidores el precio que estarían dispuestos a pagar por los productos que seleccionaron. Los encuestados están dispuestos a pagar entre los 7000 y 10000 COP (pesos colombianos) por un empaque de 6 barritas energéticas (presentación del mercado). Así mismo, están dispuestos a pagar entre 20000 y 30000 COP por una mascarilla que contenga sauco. Esta información es de suma importancia a la hora de desarrollar el producto, pues al seleccionar el empaque del producto y los ingredientes que harán parte de la formulación, se deben tener en cuenta estos precios ya que, en el caso de superarlos, los consumidores ya no estarían dispuestos a comprarlo por más beneficios que tenga.

3.2 Análisis de las escalas JAR

A partir de los resultados de las escalas JAR, ilustrados en la Figura 1A y B, se puede observar de manera general que, para la barrita y la bolita, la mayoría de los encuestados consideraron que los atributos de

dureza y textura crujiente se encuentran en un punto demasiado bajo. Ahora bien, según [14], los atributos que tengan porcentajes que superen el 20% deben ser revisados y, con ayuda del cálculo de las penalizaciones determinar si estos deben o no ser optimizados. Por otro lado, para ambas muestras, la mayoría consideró que el dulzor se encontraba en su punto ideal. Sin embargo, para la bolita, el 21% percibió un dulzor demasiado bajo por lo que también se le debe prestar atención a este atributo.

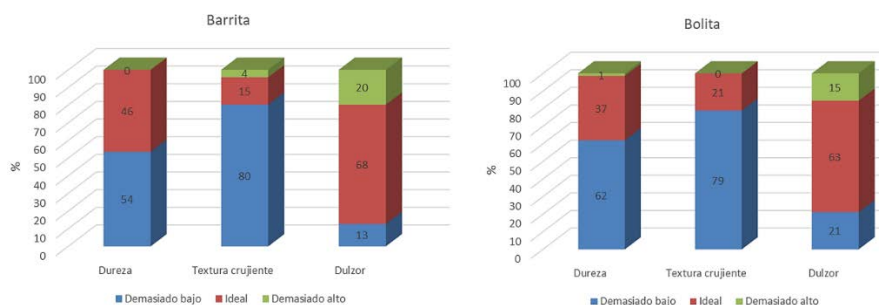


Figura 1. Izquierda: Porcentaje para diferentes niveles en escalas JAR para la Barrita. Derecha: Porcentaje para diferentes niveles en escalas JAR para la Bolita

El cálculo de las penalizaciones, que tiene como fin determinar que atributos deben o no ser revisados, arroja los resultados mostrados en la Figura 2. Es importante destacar que se considera que un atributo necesita ser revisado si el % de jueces que indicaron que un atributo fue demasiado bajo o demasiado alto fue superior al 20% y la penalización fue superior a 1 [14].

Como se observa en la Figura 2, en cuanto a la barrita, únicamente el atributo de textura crujiente demasiado bajo presentó un porcentaje de jueces del 80% y una penalización de 1.432, lo que confirma que este atributo efectivamente debe ser revisado, es decir, que se le debe aumentar la textura crujiente a la barrita para que esta, tenga una mayor aceptación. Se puede afirmar, por tanto, que este atributo sí influye de manera significativa en la aceptación global de la barrita.

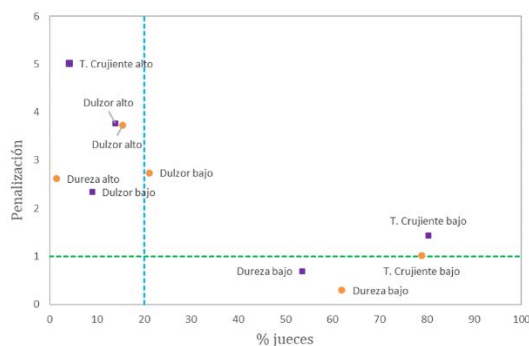


Figura 2. Análisis de penalizaciones para la Barrita y para la Bolita

En cuanto a la bolita, como se observa en la Figura 2, con un porcentaje de jueces de 21% y una penalización de 2.739 para dulzor demasiado bajo y, con un porcentaje de jueces de 79% y una penalización de 1.022 para textura crujiente demasiado bajo, se afirma que estos atributos sí influyen de manera significativa sobre la calificación global de la bolita. Esto quiere decir se debe aumentar tanto el dulzor como la crujencia de la bolita. Una vez identificados los atributos que deben ser revisados, se procede a analizar las demás propiedades sensoriales que fueron evaluadas con el fin de determinar las diferencias que encuentran los consumidores entre las dos presentaciones y de esta forma identificar la razón por la cual escogieron la que más les gustó.

Ahora bien, para determinar las diferencias significativas entre las propiedades sensoriales de la barrita y la bolita, se realizó un ANOVA obteniendo los resultados ilustrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de varianza ANOVA con significancia $\alpha = 0.05$ para las propiedades organolépticas de las muestras

	Global	Apariencia	Textura	Color	Sabor
Barrita	6.9±1.9 ^a	6.5±1.9 ^a	7±2 ^a	6.4±2.2 ^a	7.2±2.1 ^a
Bolita	6.5±2 ^a	6.1±2.4 ^a	6.5±1.8 ^a	6.1±2.1 ^a	6.8±2.3 ^a

Los resultados representan la media de la calificación de cada atributo \pm el error estándar. Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas (ANOVA $p < 0.05$). Con estos resultados, se puede concluir con una confianza del 95% que los consumidores no encuentran diferencias significativas entre la aceptación global, la apariencia, la textura, el color y el sabor entre las dos presentaciones. De esta forma, se puede decir que el tipo de presentación del snack (barrita o bolita) no influye de manera significativa sobre la aceptabilidad (global, apariencia, textura, color y sabor) de la misma.

Por último, finalizando el análisis sensorial, los consumidores escogieron qué presentación preferían y escribieron el porqué de su elección. De los 71 catadores, el 58% escogió la barrita y, el 42% la bolita. Adicionalmente, gracias a la pregunta abierta quedó en evidencia que, entre la barrita y la bolita, más personas escogieron la primera, debido a que tenía una mejor apariencia y textura. Por esta razón, a pesar de que el análisis de varianza indicó que no hubo diferencias significativas entre la apariencia y la textura de las muestras, la opinión de los consumidores proporcionó la información necesaria para afirmar que estos atributos sí son importantes a la hora de la selección de la muestra.

Así mismo, se corroboraron los resultados obtenidos en las escalas JAR, pues tanto para la barrita como para la bolita, la mayoría consideró la textura crujiente demasiado baja. De igual forma, Mostacilla y Ordóñez [19], en un estudio en el que evaluaron los parámetros de textura en un snack a base de cereales, encontraron que cuando hay un ablandamiento y disminución en la crujencia del snack, se ven afectadas significativamente sus características sensoriales. Del mismo modo, Ramírez et.al [20], realizaron un estudio en el que evaluaron las propiedades funcionales e hicieron un análisis sensorial de barritas tipo snack, en el que se evidenció que las características de dureza y textura crujiente son factores que afectan la aceptabilidad de los snacks por parte de los consumidores.

Finalmente, se concluye que el producto final a desarrollar es la barrita. Sin embargo, se debe buscar una manera de hacerla más crujiente con el fin de satisfacer las necesidades de los consumidores. Una opción para lograrlo podría ser adicionando un ingrediente crocante y/o crujiente como lo son las hojuelas de maíz y el arroz inflado. De la misma manera, se podría considerar agregarle un ingrediente más duro como las semillas de calabaza o las semillas de girasol.

3.3 Análisis de textura y humedad de la barrita

Con el fin de determinar la estabilidad de las barritas a través del tiempo, se realizaron ensayos de dureza durante 4 semanas. La Tabla 2 muestra el comportamiento promedio de las barritas en todas las semanas. Los resultados estadísticos mostraron que la dureza de la barrita no varió significativamente ($p > 0.05$) durante el periodo de tiempo evaluado. Lo anterior es un excelente resultado, pues se busca que las barritas mantengan sus propiedades iniciales el mayor tiempo posible.

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestran los resultados de la humedad de la barrita, para los cuales también se tomaron datos durante 4 semanas. Los resultados estadísticos mostraron que la humedad no cambió significativamente ($p=0.2 > 0.05$) durante el periodo de tiempo evaluado. Un estudio realizado por Gibbs [21] en donde se estudia el efecto del empaque en las propiedades de una barrita saludable de chocolate, se encuentra que la humedad de las barritas no cambió significativamente durante las primeras 4 semanas, independientemente del empaque utilizado. Así mismo, Gibbs resalta que la firmeza (una propiedad parecida a la dureza) no cambió durante 8 semanas para la mayoría de los empaques. Por lo tanto, se puede atribuir la dureza y humedad constantes al buen envasado de las barritas.

Tabla 2. Resultados de dureza y humedad para la barra de sauco a lo largo de 4 semanas

Semana	Dureza [N]	% Humedad
1	7.71 \pm 0.99 ^a	16.80 \pm 1.13 ^a
2	8.03 \pm 0.99 ^a	17.53 \pm 0.52 ^a
3	6.93 \pm 0.81 ^a	17.51 \pm 0.25 ^a
4	8.60 \pm 0.59 ^a	17.37 \pm 1.10 ^a

Ahora bien, para determinar si el producto formulado puede ser competitivo en el mercado, se realizó un ensayo de dureza a dos barritas de las marcas JBO y Taeq que ya se encuentran comercializadas en el

mercado colombiano, con el fin de realizar una comparación. Los resultados mostraron que las 3 barras presentaron un comportamiento similar (Saucó 7.70 ± 0.99 N, JBO 7.61 ± 0.65 N, Taeq 7.46 ± 0.70 N) entre las cuales no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$). Adicionalmente, se puede observar que se lograron obtener barras con parámetros de dureza parecidos a los de las comerciales. Ramirez et al [20] realizaron un estudio en el que evaluaron las propiedades funcionales e hicieron un análisis sensorial de barras tipo snack en el que obtuvieron una barra con 4.58 N de dureza promedio, esta también tuvo una buena aceptabilidad por parte del público y no tuvo penalizaciones en el análisis sensorial.

Esto quiere decir, que hasta cierto punto la dureza, que para alimentos es la fuerza necesaria para comprimir la comida entre los molares [22], es un parámetro que no es tan importante para el consumidor. A pesar de que la barra que formularon no fuera tan dura, la calificación en cuanto a la dureza y la textura crujiente fue ideal. Es así como comprobaron que el parámetro de textura que en general es más importante es la textura crujiente, pues los consumidores prefieren que el producto sea de esas características [22].

Por lo anterior, y el hecho de que la barra de sauco tuvo una penalización en cuanto a la textura crujiente en el análisis sensorial, se debería incrementar esta propiedad para obtener una mejor aceptabilidad por parte de los consumidores.

Los resultados representan la media de la calificación de cada atributo \pm el error estándar. Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas (ANOVA $p < 0.05$)

3.4 Cálculo teórico del contenido nutricional de la barra

Con el fin de calcular el contenido nutricional teórico de las barras desarrolladas, se hizo uso de las Tablas de Composición de Alimentos Colombianos TCAC del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar ICBF [23], de las Tablas de Composición de Alimentos de Centro América del Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá INCAP [24] y de la Organización Panamericana de la Salud OPS [24]. Adicionalmente, se hizo uso de las tablas de datos de la central de alimentos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos USDA [25] y, de las tablas de información nutricional de los empaques de ciertos ingredientes utilizados. Cabe resaltar, que estas tablas proporcionan la información del contenido nutricional que aporta 100g de cada alimento y, con base en esto se calculó la información necesaria para cada cantidad utilizada en la formulación.

Ahora bien, como se mencionó en la metodología, se debe tener en cuenta que la formulación del alimento constó de cuatro partes. Con esto en mente, se calculó inicialmente el contenido nutricional de las dos primeras partes para posteriormente, calcular el aporte de 100g de la mermelada formulada como se observa en la Tabla 3. Una vez se obtuvo la información nutricional de la mermelada y de la avena preparadas, se prosiguió a calcular el contenido nutricional de la formulación final de la barra (25g).

Tabla 3. Información nutricional de la mermelada y avena desarrollada

En 100 g	Energía (kcal)	Proteína (g)	Lípidos (g)	CHO (g)	Fibra dietaria (g)	Calcio (mg)	Hierro (mg)	Vitamina C (mg)	Vitamina A (µg)	Azúcares (g)
Mermelada	121.39	1.45	2.56	24.27	5.59	40.42	1.23	23.44	15.87	4.73
Avena	381.93	9.90	11.72	66.02	10.25	70.02	6.55	3.07	0.79	11.07

Finalmente, se realizó la etiqueta nutricional que llevaría el empaque del producto. Se deben tener en cuenta los valores diarios DV recomendados de la cantidad de nutrientes que debe consumir o, no exceder, una persona en un día. Adicionalmente, se debe tener en cuenta el porcentaje de valores diarios (%DV), que hace referencia a la cantidad de nutrientes que aporta una sola porción a la dieta diaria de un individuo.

Para esto, se utilizaron los valores diarios y porcentajes de valores diarios para las etiquetas de información nutricional de la Administración de Medicamentos y Alimentos FDA [26]. Con esta información, se calcularon los porcentajes de valores diarios y se obtuvo la etiqueta de información nutricional para el producto desarrollado que se muestra en la Figura 3.

Barrita de Sauco	JBO	Teaq
INFORMACIÓN NUTRICIONAL	INFORMACIÓN NUTRICIONAL	INFORMACIÓN NUTRICIONAL
Tamaño por Porción: 1 unidad (25 g) Porciones por empaque 6	Tamaño por Porción: 1 unidad (23 g) Porciones por empaque 6	Tamaño por Porción: 1 unidad (20 g) Porciones por empaque 6
Cantidad por porción	Cantidad por porción	Cantidad por porción
Calorías 94	Calorías 90 Calorías de Grasa 15	Calorías 90 Calorías de Grasa 35
%Valor Diario*	%Valor Diario*	%Valor Diario*
Grasa Total 3 g 5%	Grasa Total 1.5 g 2%	Grasa Total 4 g 6%
Grasa Saturada 1.3 g 7%	Grasa Saturada 1.5 g 8%	Grasa Saturada 2 g 10%
Grasa Monoinsaturada 0.2 g	Grasa Monoinsaturada 0 g	Grasa Monoinsaturada 0 g
Grasa Polinsaturada 0.3 g	Grasa Polinsaturada 0 g	Grasa Polinsaturada 0 g
Grasa Trans 0 g	Grasa Trans 0 g	Grasa Trans 0 g
Colesterol 0 mg 0%	Colesterol 0 mg 0%	Colesterol 0 mg 0%
Sodio 1.5 mg 0.1%	Sodio 35 mg 1%	Sodio 25 mg 1%
Carbohidratos Totales 17 g 6%	Carbohidratos Totales 18 g 6%	Carbohidratos Totales 12 g 4%
Fibra Dietaria 3 g 12%	Fibra Dietaria 1 g 4%	Fibra Dietaria 2 g 8%
Azúcares 4 g	Azúcares 7 g	Azúcares 4 g
Proteína 2 g 4%	Proteína 1 g 2%	Proteína 2 g 4%
Vitamina A 0.3% Vitamina C 7%	Vitamina A 10% Vitamina C 2%	Vitamina A 0% Vitamina C 0%
Calcio 2% Hierro 7%	Calcio 15% Hierro 8%	Calcio 0% Hierro 0%
<small>*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías. Sus valores diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas.</small>	<small>*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías. Sus valores diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas.</small>	<small>*Los porcentajes de Valores Diarios están basados en una dieta de 2000 calorías. Sus valores diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades calóricas.</small>

Figura 3. Etiquetas nutricionales de: Izquierda la barrita formulada, Centro la barrita control marca JBO, Derecha la barrita control marca Teaq

Ahora bien, con el fin de poder hacer las declaraciones nutricionales de la barrita de sauco, se utilizaron las directrices del Codex sobre Declaraciones de Propiedades [27]. Con esto en mente, se puede decir que nuestro producto tiene un muy bajo contenido en sodio debido a que el Codex indica que esta propiedad se declara siempre y cuando se cumple la condición de que haya 0.04g por 100g de alimento y, 100g de barrita contienen 0.006g de sodio. En cuanto a las vitaminas y minerales, se puede decir que la barrita aporta un contenido básico de Vitamina C y Hierro puesto que se debe cumplir la condición de 5% de los valores de referencia de nutrientes VRN por 100kcal y, como se observa en la Figura 9, en 94kcal el producto aporta un 7% de VRN en ambos casos.

Por otro lado, se puede decir que la barrita tiene un alto contenido en fibra dietética ya que se debe cumplir la condición de 3g por 100kcal y, el producto aporta 3g en 94kcal. Esta declaración es bastante favorable debido a que la fibra dietética tiene numerosos beneficios para la salud ya que ayuda a tener un mejor control de los niveles de glucosa en la sangre y de colesterol, así como ayuda a la protección contra enfermedades cardio vasculares [28]. Además, debido a que esta fibra es resistente a la digestión humana, contribuye a la regulación de las funciones intestinales y a la protección contra el cáncer de colon [28].

Por otro lado, podemos afirmar que cada barrita contiene aproximadamente 8g de sauco que equivalen al 32% de esta, lo cual es favorable para el consumidor pues es un ingrediente rico en antioxidantes que ayuda a prevenir varias enfermedades y a promover la buena salud. Adicionalmente, es evidente la presencia de antocianinas en el producto final, debido a que son las responsables del color rojizo. Estos antioxidantes, aportados por el sauco, son suma importancia debido a que ayudan a prevenir la oxidación celular. La revista Food Chemistry, publicó una investigación, realizada por Olejnik et al., en la que se estudió el efecto del sauco contra el estrés oxidativo en las células del colon y obtuvieron que, después del proceso digestivo, los compuestos fenólicos tenían una pérdida significativa en su biodisponibilidad [29].

Sin embargo, afirman, que en dosis no menores a 1 mg/ml, la cantidad de compuestos bioactivos que se encuentran en el sauco digeridos, es suficiente para tener un efecto positivo tanto en las células de la mucosa del colon como en la reducción de especies reactivas oxidantes, protección contra el daño oxidativo del ADN y la inhibición de especies mutagénicas causadas por agentes oxidantes [29]. Así mismo, se encontró, que la mayor cantidad de antocianinas que logran superar las barreras de la digestión y actuar en las células del colon son las que tienen estructuras de mono-glicósido, las cuales representan el 88.2% de las antocianinas antes de la digestión y un 60.8% después de la digestión. Las antocianinas con estructuras diglucósidos, que representan el otro 11.8%, son degradadas al entrar en contacto con las enzimas digestivas [29]. A pesar de esto, los efectos del sauco fueron notorios en las células del colon. Lo anterior, nos da un indicio de que la barrita formulada puede tener numerosos efectos favorables para la salud. Por esta razón, se propone evaluar la digestibilidad de la barrita con el fin de determinar la fracción de nutrientes absorbidos que son empleados en el metabolismo.

Por último, se puede declarar que la barra desarrollada es libre de grasas trans, libre de gluten y no contiene nueces lo que puede contribuir a que los consumidores la prefieran frente a otras barras. Esto debido a que se convierte en un producto que pueden consumir los celíacos y consumidores alérgicos a las nueces y sus derivados. En cuanto a las grasas trans, en la actualidad, la Organización Mundial de la Salud OMS y la Organización Panamericana de la Salud OPS han creado cada vez más conciencia entre los consumidores para eliminarlas del suministro de alimentos con el fin de prevenir enfermedades no transmisibles, como cardiopatías coronarias [30].

3.5 Comparación de la información nutricional con las barras control

Con el fin de determinar si la barra desarrollada es competitiva con las del mercado, se comparó la información nutricional con la de las dos barras control marca JBO y Taeq respectivamente. Como se puede observar en la Figura 3, ambas aportan 90 kcal por porción mientras que la barra desarrollada aporta 94 kcal. Adicionalmente, se observa que los 3g de grasa de la barra desarrollada se encuentra entre los valores de las dos control. No obstante, la barra desarrollada tiene menos grasas saturadas que la JBO y la Taeq. La cantidad de carbohidratos se encuentra igualmente entre las dos control sin embargo, la barra de sauco es la única que puede declarar que tiene un alto contenido en fibra dietaria, así como también es la única con un muy bajo contenido en sodio pues tiene un 96% y 94% menos que las control respectivamente.

En cuanto a las vitaminas y minerales, la JBO es la que aporta una mayor cantidad pero la barra de sauco aporta más que la Taeq. Por último, en cuanto a la proteína, la barra desarrollada tiene la misma cantidad que la Taeq. Cabe resaltar, que el 32% de la barra producida es sauco mientras que la Taeq tiene únicamente 10% de arándanos y 5% de fresa por lo que se puede decir que la barra desarrollada en la presente investigación aporta más antioxidantes que la control. Con esta información, se concluye que la barra a base de sauco sí puede competir con las barras de cereal del mercado pues a comparación de las dos barras control, la barra de sauco tiene más beneficios nutricionales.

3.6 Estabilidad de la mascarilla

Para determinar si la mascarilla formulada puede ser competitiva en el mercado colombiano, se seleccionó una mascarilla control Essential mask de la marca tez boutique comercial para comparar con la que fue elaborada en la presente investigación. Esta es una marca colombiana y en su formulación, utiliza algunos ingredientes que también se usan en la formulación de la mascarilla de sauco, como: caolin, alcohol cetearílico, agua y estearato de glicerilo. El Turbiscan Stability Index TSI es el parámetro utilizado para caracterizar la estabilidad física de las mascarillas. Las dispersiones son termodinámicamente inestables y con el tiempo, para reducir la energía, una separación de fases ocurrirá. Esta separación puede ocurrir en poco tiempo o hasta en varios años, el turbiscan permite detectar esa desestabilización hasta 200 veces más rápido [31].

La escala mostrada en la Figura 4, permite clasificar la dispersión de acuerdo con un valor de TSI en un respectivo tiempo. Según esta escala, A+ sería una muestra que no muestra ninguna desestabilización y D sería una muestra con una desestabilización bastante visible, ya sea por separación de fase, cambio de color, cremado o precipitación [31]. En la Figura 5, se muestran los valores promedio del TSI contra el tiempo en minutos para las 2 mascarillas evaluadas por duplicado. Se puede observar que la mascarilla comercial es más estable que la formulada, no obstante, ambas son bastante estables pues los valores promedio de TSI (Control 0.312 ± 0.12 , Sauco 0.56 ± 0.133) a los 30 minutos es menor a 1 por lo que se encuentran entre el rango de A+ y A. Estadísticamente, las dos mascarillas son igual de estables, por esta razón, se concluye que la mascarilla realizada tuvo una formulación acertada pues es parecida a una mascarilla comercial en cuanto a estabilidad.

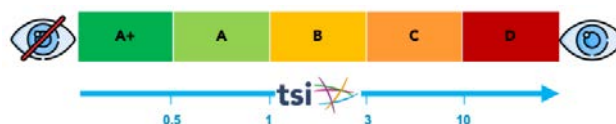


Figura 4. Escala de estabilidad según el TSI [31]

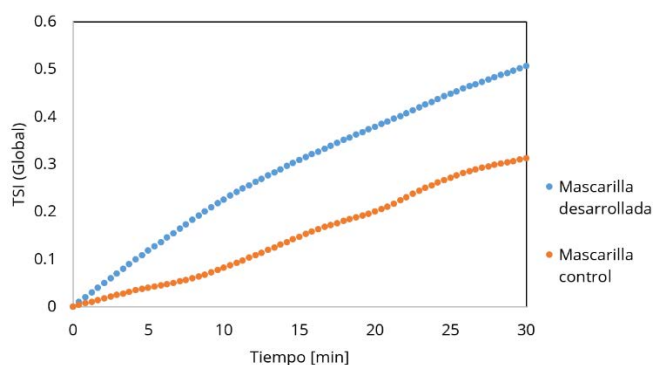


Figura 5. TSI global vs tiempo para las mascarillas

3.7 Análisis de textura de la mascarilla

Para el análisis de textura de la mascarilla formulada y la de control, se utilizó un ensayo de back extrusión con un disco de 35 mm de diámetro, pues es el que recomienda el software del texturómetro para hacer el ensayo en cremas que son más viscosas y espesas que otros productos. Este ensayo consta de 2 partes, la primera, es la *forward extrusion* en donde la máquina comprime con el disco la muestra hasta alcanzar una fuerza máxima de extrusión que es equivalente a la firmeza de la muestra. Para cremas, es un parámetro que evalúa la fuerza requerida para estrujar la crema entre el pulgar y el índice [32]. En la gráfica que arroja el texturómetro, como se observa en la Figura 6, el área de la parte positiva es la consistencia de la muestra, entre más alto sea este valor, más espesa y consistente es esta.

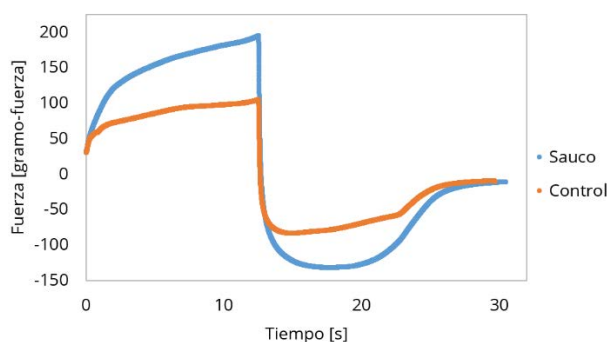


Figura 6. Resultados del ensayo Back Extrusion

Para la textura de una crema este atributo evalúa la dificultad de remover de un contenedor [32]. La segunda parte, consiste en el *back extrusion* en donde el disco regresa a su posición inicial. Esta parte indica la cohesividad y el índice de viscosidad. La fuerza negativa máxima es el indicador de la cohesividad, entre mayor sea la magnitud de este valor, más pegajosa es la muestra. Para la textura de una crema este atributo es el indicador de la facilidad de mover el producto del punto de aplicación al resto de la cara. Adicionalmente, el área de la parte negativa de la gráfica es el índice de viscosidad que se interpreta como la energía requerida para separar la muestra del disco. Este es un indicativo de las fuerzas cohesivas de las moléculas de la muestra de manera que entre más grande sea este valor, más difícil será que se separe la muestra del disco [33]. Este ensayo se realizó por duplicado para cada una de las mascarillas, el comportamiento promedio de la prueba para cada una de estas se muestra en la Figura 6.

Para determinar si estos parámetros son significativamente diferentes, se realizó un ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 como se observa en la Tabla 4. Con estos resultados, se concluye con una confianza del 95% que la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad entre las dos mascarillas son significativamente. Ahora bien, debido a que los parámetros de la mascarilla control son menores, esto significa que en general tiene una mayor facilidad para aplicarse sobre la piel y manipularse con los dedos que la mascarilla de sauco. Con esto en mente, se propone realizar un análisis sensorial para determinar qué tan importantes son estos parámetros para el producto, y ver cuál es la textura preferida por el público y, de acuerdo con esos resultados se podría tomar la decisión de hacer un diseño de experimentos cambiando la composición de los aditivos responsables de esa textura como el caolín y la harina de avena para que los parámetros se asemejen más a la mascarilla control.

Tabla 4. Parámetros calculados de la prueba Back Extrusion y análisis de varianza

Muestra	Firmeza [g]	Consistencia [g·s]	Cohesividad [g]	Índice de Viscosidad [g·s]
Sauco	195.15±4.66 ^a	1924.45±71.79 ^a	-132.13±2.83 ^a	-1371.47±0.36 ^a
Control	105.26±8.45 ^b	1084.27±29.23 ^b	-83.86±0.36 ^b	-825.295±11.08 ^b

Los resultados representan la media de los parámetros calculados por duplicado \pm el error estándar. Letras diferentes en la misma columna expresan diferencias significativas (ANOVA $p < 0.05$).

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el sauco es una planta muy versátil que se puede emplear para el desarrollo de nuevos alimentos funcionales, así como también para el desarrollo de productos de cuidado personal. Por un lado, se logró elaborar una mermelada de sauco baja en azúcar y rica en antioxidantes y, con esta, desarrollar una barrita de cereal con múltiples beneficios para la salud. Con esto en mente, se cumplió exitosamente con el objetivo de desarrollar un alimento funcional a base de sauco, pues además de haber tenido una buena aceptabilidad entre los consumidores, se puede especular que tiene un efecto benéfico y nutricional debido a los ingredientes utilizados para la formulación.

Por otro lado, se logró elaborar una mascarilla de sauco que puede ser competitiva en el mercado colombiano, pues además de tener un valor agregado (alto contenido en antioxidantes naturales), tiene características de textura favorables y, una estabilidad estadísticamente igual que una del mercado lo que la hace una sustancia A+ sin ninguna desestabilización. Sin embargo, se propone hacer una caracterización del fruto y la hoja de esta planta específicamente proveniente de Bogotá con el fin de conocer con mayor exactitud las cantidades de los compuestos fenólicos del sauco bogotano y, con base en esto poder cuantificar su biodisponibilidad con el fin de poder formular otros productos derivados de esta planta. Así mismo, se propone evaluar la digestibilidad de la barrita con el fin de determinar la fracción de nutrientes absorbidos que son empleados en el metabolismo.

Adicionalmente, se comprobó que la barrita desarrollada también puede ser competitiva en el mercado colombiano, pues además de tener una buena aceptabilidad entre los consumidores, su aporte nutricional puede ser superior a las que ya se encuentran en el mercado. Además, en cuanto a características organolépticas como la dureza, se comprobó que es igual a las del mercado. No obstante, quedó en evidencia que la textura crujiente en estos productos tipo snack es de suma importancia para la aceptabilidad de estos por parte de los consumidores, pues a pesar de que la dureza de la barrita de sauco haya tenido una puntuación ideal en el análisis sensorial, su textura crujiente tuvo penalización por lo que debe ser aumentada para mejorar su competitividad en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] P. T. Verde García y E. P. Rengifo Alcántara, "Transformación integral e industrialización del sauco (*Sambucus peruviana*) para el desarrollo microregional sostenible," Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2006.
- [2] B. Grajales Atheortua, M. Botero Galvis y J. Ramírez Quirama, "Características, manejo, usos y beneficios del saúco (*Sambucus nigra* L.) con énfasis en su implementación en sistemas silvopastoriles del Trópico Alto," *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, vol. 6, n° 1, pp. 155-168, 2015.
- [3] E. García Martínez, I. Fernández Segovia y A. Fuentes López, "Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu," Universidad Politecnica de Valencia, España.
- [4] L. F. Márquez Villacorta, F. E. Torres Infante y C. C. Pretell Vásquez, "Antocianinas totales, fenoles totales y actividad antioxidante en pulpas de frutas," *Pueblo Continente*, vol. 18, n° 2, pp. 209-214, 2007.
- [5] S. G. Ruiz Reyes, E. Vanegas Casanova, D. Ruidías Romero, L. Horna Acevedo y C. W. López Cenizario, "Capacidad antioxidante in vitro de los flavonoides totales obtenidos de las hojas de *Sambucus peruviana* H.B.K (Saucu) proveniente de la ciudad de Huamachuco," *Pharmacencia*, vol. 1, n° 2, pp. 57-64, 2013.
- [6] E. Flores, "Extracción de Antioxidantes de las Bayas del Sauco (*Sambucus nigra* L. subsp. *Peruviana*) con Ultrasonido, Microondas, Enzimas y Maceración para la obtención de Zumos Funcionales," *Información Tecnológica*, vol. 28, n° 1, pp. 121-132, 2017.
- [7] M. Cortés R, A. Chiralt B y L. Punte D, "Alimentos Funcionales una Historia con Mucho Presente y Futuro," *VITAE*, vol. 2, n° 1, pp. 5-14, 2005.

- [8] M. G. Britez y M. C. Romero, "Conocimiento y consumo de alimentos funcionales en la comunidad académica de la Universidad Nacional del Chaco Austral," *Ciencia, Docencia y Tecnología*, vol. 30 59, pp. 285-296, 2019.
- [9] D. Arias Lamos, L. N. Montaña Díaz, M. A. Velasco Sánchez y J. Martínez Girón, "Alimentos funcionales: avances de aplicación en agroindustria," *Tecnura*, vol. 22, n° 57, pp. 55-68, 2018.
- [10] M. Lutz, "Biodisponibilidad de compuestos bioactivos en alimentos," *Perspectivas en Nutrición Humana*, vol. 15, n° 2, pp. 217-226, 2013.
- [11] B. Holst y G. Williamson, "Nutrients and phytochemicals: from bioavailability to bioefficacy beyond antioxidants," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 19, pp. 73-82, 2008.
- [12] O. C. Laffita y A. A. Castillo, "Caracterización fármaco-toxicológica de la planta medicinal *Sambucus nigra* subsp. *Canadensis* (L. R. Bolli)," *Revista Cubana de Farmacia*, vol. 45, n° 4, pp. 586-596, 2011.
- [13] Sidor y A. Gramza-Michalowska, "Advanced research on the antioxidant and health Benefit of elderberry (*Sambucus nigra*) in food- a review," *Journal of functional foods*, vol. 18, pp. 941-958, 2015.
- [14] S. Fernandez, E. Garcia y A. Fuentes, "Aplicación de las escalas de punto ideal o Just-About-Right (JAR) en análisis sensorial de alimentos," Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2018.
- [15] MakingCosmetics, 2020, Recuperado: <https://www.makingcosmetics.com/formulas/formula-1841-Watermelon-Exfoliating-Mask.pdf>
- [16] R. Tundis, C. Ursino, M. Bonesi, M. R. Loizzo, V. Sicari, T. Pellicano, I. L. Manfredi, A. Figoli y A. Cassano, "Flower and Leaf Extracts of *Sambucus nigra* L.: Application of Membrane Processes to Obtain Fractions with Antioxidant and Antityrosinase Properties," *Membranes (Basel)*, vol. 9, n° 10, p. 127, 2019.
- [17] T. Sams, *Healing Herbs a Beginner's guide to identifying, foraging, and using medical plants*, Fair Winds Press, 2015.
- [18] Stable Micro Systems, 2020. Recuperado: <https://www.stablemicrosystems.com/MeasureCohesiveness.html>
- [19] S. A. M. Perdomo y A. L. O. Ordoñez, "Evaluación de los parámetros de textura en un snack a partir de una mezcla de cereales desarrollado en la empresa Segalco S.A.S," Universidad del Cauca, Colombia, 2019.
- [20] Ramírez-Jiménez, M. Gaytán-Martínez, E. Morales-Sánchez y G. Loarca-Piña, "Functional properties and sensory value of snack bar added with common bean flour as a source of bioactive compounds," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 89, pp. 674-680, 2018.
- [21] G. Gibbs, "Accelerated Shelf Life of a Health Bar Contained in Different Bio-Based Packaging Materials," TigerPrints, Clemson, South Carolina, 2015.
- [22] S. Szczesniak, "Texture is a sensory property," *Food Quality and Preference*, vol. 13, pp. 215-225, 2002.
- [23] Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), "Tabla de composición de alimentos colombianos," 2018.
- [24] Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP); Organización Panamericana de la Salud (OPS), "Tabla de Composición de Alimentos de Centroamérica," 2012.
- [25] U.S Department of Agriculture (USDA), "FoodData Central," 2020.
- [26] U.S Food and Drug Administration (FDA), "Daily Value and Percent Daily Value: Changes on the New Nutrition and Supplement Facts Levels," 2020.
- [27] FAO/OMS, Comisión de Codex Alimentarius, "directrices para el uso de declaraciones nutricionales (22° periodo de sesiones)," 1997.
- [28] L. Fuentes-Berrio, D. Acevedo-Correa y V. M. Gelvez-Ordóñez, "Alimentos Funcionales: Impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 13, n° 2, pp. 140-149, 2015.
- [29] Olejnik, M. Olkowicz, K. Kowalska, J. Rychlik, R. Dembczynski, K. Myszk, W. Juzwa, W. Bialas y M. P. Moyer, "Gastrointestinal digested *Sambucus nigra* L. fruit extract protects in vitro cultured human colon cells against oxidative stress," *Food Chemistry*, vol. 197, pp. 648-657, 2016.
- [30] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Conjunto de medidas para eliminar los ácidos grasos trans de producción industrial, Guía práctica para concienciar al público acerca de las grasas trans," Ginebra, 2020.
- [31] Formulaction, 2020. Recuperado: <https://www.formulaction.com/en/knowledge-center/turbiscan-stability-index>
- [32] N. O. Schwartz, "Adaptation of the sensory texture profile method to skin care products," *Journal of texture studies*, vol. 6, pp. 33-42, 1975.
- [33] AMETEK Brookfield, 2019. Recuperado: <https://www.brookfieldengineering.com/learning-center/application-notes/texture-applications/personal-care-products/moisturizing-cream-consistency>

Caracterización físico-química y obtención de emulsiones a partir del aceite de semilla de *sacha inchi*

Aureliano Rodríguez Cortina¹

María Hernández Carrión²

Universidad de Los Andes

Colombia

En este estudio se llevó a cabo la caracterización físico-química del aceite de semilla de Sacha Inchi y se estudiaron las propiedades de emulsiones elaboradas a partir de este aceite. En la caracterización del aceite se estudiaron propiedades tales como la densidad aparente, contenido en humedad, índice de refracción, índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo, índice de peróxidos y productos de oxidación secundaria, siguiendo los protocolos consignados en procedimientos estandarizados. Asimismo, se elaboraron emulsiones de aceite de Sacha Inchi haciendo uso de homogeneización de alta velocidad. Se planteó un diseño experimental donde se estudió el efecto de la concentración de aceite de semilla de Sacha Inchi (5% y 10%, p/p), de la relación maltodextrina: caseinato sódico (80:20, 85:15 y 90:10, p/p) y la velocidad de homogeneización (10.000 y 18.000 rpm), sobre las propiedades físico-químicas de las emulsiones. Los resultados obtenidos en la caracterización del aceite de semilla de Sacha Inchi están dentro del rango de aceptación establecidos por normas internacionales, y son comparables a estudios previos de caracterización de este aceite. Asimismo, con los resultados de la caracterización de las emulsiones se pudo establecer un criterio para escoger la formulación que favorece una mayor estabilidad de la emulsión. Se demostró que la mejor formulación es aquella donde la concentración de aceite es del 5%p/p, así mismo la relación de material de pared que se recomienda es de 80:20 y, por último, una velocidad de homogenización de 18.000 rpm.

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería Química.

Contacto: a.rodriquezc23@uniandes.edu.co

² Profesora Asistente.

Contacto: m.hernandez1@uniandes.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente Colombia es uno de los países con mayor biodiversidad en el mundo, con un gran potencial para la obtención de productos con alto valor agregado. El aprovechamiento de dicha biodiversidad requiere de un esfuerzo multidisciplinar que logre ir avanzando en la definición de usos potenciales y en la sostenibilidad de los recursos que ofrece el suelo de este país. En particular tiene pendiente el desarrollo de un conjunto de conocimientos básicos sobre cultivos nativos y tradicionales, lo cual no permite promover un uso óptimo y eficiente de los mismos; mucho menos pretender ubicarlos en grandes mercados internacionales que son exigentes en niveles de producción y calidad. En este sentido, el Sacha Inchi es un producto con expectativas de demanda en mercados nacionales e internacionales por las cualidades nutritivas y bioactivas de su aceite.

Unas de las demandas definidas en el Portal Siembra del Ministerio de Agricultura de Colombia para la cadena de Sacha Inchi consiste en estandarizar, validar, optimizar y aplicar procesos de transformación incluyendo el desarrollo de otros productos con valor agregado. Es por este motivo que se investigó sobre aplicaciones que permitan la incorporación de este aceite en diferentes matrices alimentarias, manteniendo sus propiedades bioactivas durante el procesamiento para el desarrollo de nuevos alimentos funcionales. Por otro lado, tanto en Perú como en Colombia se ha promovido el cultivo de Sacha Inchi en programas de sustitución de cultivos ilícitos, motivo por el cual se considera como una buena opción que permitiría mejorar la situación social y económica de la población afectada por este flagelo [1]. Así, se lograrían buscar alternativas que permitan encontrar ingredientes o insumos para la industria alimentaria de fácil acceso y económicos.

El Sacha Inchi (*Plukenetia volúbilis* L.) conocido también como *Inca Inchi* o *maní del Inca* es una especie nativa de la Amazonía peruana con importantes compuestos beneficiosos para la salud sensibles a la temperatura [2]. Recientemente se ha considerado como una especie prometedora debido a que se adapta fácilmente al terreno de cultivo y su semilla contiene un aceite rico en ácidos grasos omega 3, 6 y 9 y vitaminas A y E [2]. Estos compuestos son considerados de gran importancia para la prevención de enfermedades cardiovasculares, hipertensión arterial, cáncer, diabetes, enfermedades inflamatorias de la piel, entre otros [3]. Los ácidos grasos insaturados presentes en este aceite son ácidos carboxílicos de cadena larga, con uno o varios dobles enlaces entre los átomos de carbono y son fundamentales para el correcto funcionamiento de nuestro cuerpo [4]. Muchos ácidos grasos, particularmente los ácidos grasos poliinsaturados, son difíciles de sintetizar y se pueden obtener por la extracción de algunas grasas naturales o aceites; como el aceite de linaza; aceites de animales marinos: salmón, atún y sardina [5, 6]. Es por esta razón que existe un gran potencial para el uso del aceite de Sacha Inchi especialmente en la industria alimentaria y farmacéutica.

Esta composición especial de ácidos grasos hace que este aceite sea muy susceptible a la oxidación, por factores como el aire, luz, humedad, calor o por su propia naturaleza química [7]. Con el objetivo de proteger los compuestos funcionales presentes en el aceite de semilla de Sacha Inchi de las condiciones ambientales y/o posterior procesamiento y manipulación a nivel industrial, se planteó su encapsulación. Para lograr esta encapsulación se propuso en primer lugar obtener una emulsión la cual consiste en una fase dispersa de naturaleza lipídica en una fase continua de naturaleza acuosa [8]. Entre las numerosas ventajas que presenta la encapsulación en la industria alimentaria se puede destacar: la protección de ingredientes o componentes alimentarios sensibles al ambiente y a las condiciones de procesamiento, extender su vida útil y la liberación controlada de los ingredientes encapsulados. Esta liberación controlada permitiría un aumento de la biodisponibilidad de los ingredientes alimentarios y una absorción óptima de los nutrientes por parte del organismo [9].

Los materiales más comunes para encapsular los compuestos bioactivos para aplicaciones alimentarias son los polímeros de carbohidratos (almidón y derivados de almidón, celulosa y derivados de celulosa, extractos de plantas de polisacáridos, extractos marinos de polisacáridos y polisacáridos microbianos y animales) y proteínas (proteínas de la leche y gelatina) [10] [11]. Los materiales de pared efectivos se caracterizan por sus buenas propiedades de estabilización de emulsión, baja viscosidad a altas concentraciones y redispersión efectiva para liberar el material del núcleo en la rehidratación [12]. Diversos estudios han

encontrado que el uso de maltodextrina (MD) conduce a un aumento de la capacidad emulsionante del material de pared y además como posee un bajo grado de polimerización contribuye a generar una aglomeración de partículas que reducen la permeabilidad del oxígeno en la cápsula, lo que permite una gran retención de aceite [13, 14]. Por otro lado, el caseinato sódico es una proteína resistente a la desnaturalización cuando se somete a altas temperaturas [13]. Adicionalmente, por sus propiedades anfífilas como material de pared contribuye a disminuir la aglomeración. El caseinato presenta un punto isoeléctrico (pH 5.98) que favorece la liberación controlada del principio activo contenido, dado que incrementa la estabilidad de la cápsula a pH ácidos como el que se encuentra en el fluido gástrico [15, 16]. De ahí que, las cápsulas logren liberar altas cantidades de aceite en el intestino delgado.

Aunque diversos autores han estudiado el efecto de diferentes ingredientes presentes en la formulación de emulsiones sobre la estabilidad de éstas, así como el efecto de las condiciones de operación [17, 18] no se han reportado estudios sobre encapsulación de aceite de semilla de Sacha Inchi en emulsiones. Todo lo anterior se convierte en un reto para estudiar al Sacha inchi, no sólo como material oleaginoso sino también por las funcionalidades biológicas que podrían derivar de su aceite.

Este desafío ha sido aceptado en algunos países latinoamericanos, especialmente Perú, sin embargo, en Colombia es muy poco lo que hasta ahora se ha hecho. Es por esto, que este trabajo tiene como objetivo estudiar los índices de calidad del aceite de semilla de Sacha Inchi para establecer su potencial agroindustrial y estudiar las propiedades físico-químicas de emulsiones de aceite de semilla de sachá inchi elaboradas haciendo uso de homogeneización a alta velocidad.

2. MÉTODO

2.1 Muestra

EL aceite de semilla de Sacha Inchi ASI utilizado en este estudio fue de la marca Sachacol. La maltodextrina y caseinato sódico que se emplearon en diferentes proporciones como materiales de pared para las emulsiones fueron de la marca Química Center S.A.S y los surfactantes Tween 20 y Span 80 de Croda©.

Las sustancias químicas utilizadas para la caracterización del aceite como el reactivo de Wijs, eter dietílico, cloroformo, ácido acético glacial, ácido clorhídrico, ciclohexano fueron de la marca comercial Panreac AppliChem, el hidróxido de sodio de la marca Merck, el hidróxido de potasio de la marca Honeywell, el almidón soluble de la marca Fisher Scientific Company, la fenoltaleína de la marca J.T. Baker, el yoduro de potasio de la marca Sigma-Aldrich y el tiosulfato de sodio de la marca Analytic.

2.2 Caracterización del aceite de semilla Sacha Inchi

2.2.1 Características físico-químicas

La densidad aparente se determinó haciendo uso de uso del densímetro Easy 40. El contenido de humedad se determinó mediante el método ISO:662. Esta medición se realizó para 3 muestras de 10 g de aceite de semilla de Sacha Inchi. Se utilizó un horno de convención forzada (Binder FD 115, Alemania) y se comprobó el resultado obtenido con la termobalanza (Precisa Master series 330 M, Suiza). El índice de refracción (IR) a 20°C se determinó haciendo uso de un refractómetro digital (METLER TOLEDO). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

2.2.2 Índices de calidad

El índice de acidez (mg KOH/g aceite) y acidez se determinó mediante el método UNE-EN ISO 660. El índice de saponificación (mg KOH/g aceite) se determinó mediante el método UNE-EN ISO 3657. El índice de yodo (g I₂/100g aceite) se determinó mediante el método UNE-EN ISO 3961. El índice de peróxidos (meq O₂ activo/kg aceite) se determinó mediante el método UNE-EN ISO 3960. Los hidroperóxidos y los productos de oxidación secundaria (k₂₃₂, k₂₇₀) se detectaron por métodos espectrofotométricos (GENESYS 10S UV-Vis) siguiendo el método UNE 55047. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

2.3 Elaboración de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi

Para la elaboración de las emulsiones se emplearon como ingredientes aceite de semilla de Sacha Inchi, maltodextrina y caseinato sódico como materiales de pared, Tween 20 y Span 80 como surfactantes y agua destilada. Para la elaboración de las emulsiones se hizo uso de homogeneización de alta velocidad (Dispermat D-51580, VMA-GETZMANN GMBH). Se estudió el efecto de la concentración de aceite de semilla de Sacha Inchi (5% y 10%, p/p), de la relación maltodextrina: caseinato sódico (90:10, 80:20 y 85:15 p/p) y la velocidad (10.000 y 18.000 rpm) sobre las propiedades físico-químicas de las emulsiones.

Las emulsiones fueron del tipo O/W (de sus siglas en inglés aceite/agua) donde se ajustó una relación de material de pared y de aceite de Sacha Inchi 2:1. Las cantidades de Tween y Span 80 se fijaron en 1% y 0,5%, p/p, respectivamente de acuerdo a la metodología descrita por Amaya et al [19] y se ajustó con agua destilada hasta completar el 100%, p/p de la emulsión. En la tabla 2 se presenta el diseño experimental utilizado, así como las concentraciones de aceite y material de pared empleadas para elaborar las emulsiones. Para cada formulación se prepararon 500 g de emulsión.

El proceso de elaboración de las emulsiones se llevó a cabo en dos etapas, una prehomogenización y una homogenización. En la primera etapa, se disolvieron por aparte los materiales de pared seleccionados en agua destilada a agitación constante en una plancha de calentamiento a 25 °C por 10 minutos. En la segunda etapa se agregó el tensoactivo Tween 20 a la mezcla de agua y material de pared y con ayuda del Dispermat (D-51580, VMA-GETZMANN GMBH) se homogeneizó a 5000 rpm por 2 minutos. Luego se añadió el aceite de semilla de Sacha Inchi a la solución, el cual se mezcló previamente con el tensoactivo Span 80. La homogenización se ajustó para unas emulsiones a una velocidad de 10.000 y para otras a 18.000 rpm durante 10 minutos.

2.4 Caracterización de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi

2.4.1 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de las emulsiones se determinó mediante el uso de un analizador de tamaño de partículas Mastersizer 3000 (Malvern) compuesto de un banco óptico y una unidad de dispersión por vía húmeda (Hydro EV) que permitió realizar el análisis mediante la dilución de la muestra. Esta determinación se hizo por duplicado.

2.4.2 pH y conductividad

Se determinó el pH y la conductividad de las emulsiones mediante el uso de un multiparámetro SevenMulti (Mettler Toledo). Esta determinación se hizo por duplicado.

2.4.3 Textura

Se estudió la textura de las emulsiones en términos de firmeza, consistencia y cohesividad mediante un texturometro TA HD plus C (Stable Micro Systems) empleando la prueba Back Extrusion utilizando una geometría RIG 40 mm DISC, una celda de carga de 5kgf, una velocidad de test de 2,0 mm/s y una distancia de penetración de 1.5 cm. Las mediciones se hicieron por duplicado.

2.4.4 Reología

El comportamiento al flujo y propiedades viscoelásticas de las emulsiones se estudiaron mediante el uso de un reómetro rotacional ARG2 (TA Instruments) utilizando una geometría de cilindro concéntrico cónico (997616) a temperatura ambiente (20°C) y un gap de 1mm. El comportamiento al flujo se estudió empleando una velocidad de cizalla entre 1 y 100 s^{-1} . Se reportaron los valores de viscosidad a una velocidad de cizalla de 50 s^{-1} . Las curvas obtenidas se ajustaron a la ley de la potencia de Otswald de Waele utilizando la ecuación (1) para la obtención del índice de flujo (n) e índice de consistencia (k).

$$\mu = k\gamma^{n-1} \quad (1)$$

Donde:

μ : es la viscosidad

γ : es la velocidad de cizalla

k : es el índice de consistencia

n : el índice de flujo.

Asimismo, se realizó una prueba oscilatoria para la determinación del módulo de almacenamiento o componente elástico (G') y el módulo de pérdidas o componente viscoso (G'') en función del porcentaje de deformación y frecuencia angular. Para ello, se realizó un barrido de deformación (entre 1 y 100% strain) con el objetivo de identificar la región viscoelástica lineal (RVL) para posteriormente llevar a cabo un barrido de frecuencia en la RVL determinada a partir del barrido de deformación. Esta determinación se hizo por duplicado.

2.4.5 Tensión superficial y ángulo de contacto

La tensión superficial (TS) y el ángulo de contacto (AC) de las emulsiones se determinaron mediante un tensiómetro óptico (Attension) con el método de pendant drop y sessile drop, respectivamente. Esta determinación se hizo por duplicado.

2.5 Análisis estadístico

Se realizó estadística descriptiva calculando la media y la desviación estándar para cada variable de respuesta en estudio. Los datos para la caracterización físico-química de las emulsiones fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa estadístico Minitab® (versión 18.1) con un nivel de significancia del 5% haciendo uso del test de comparación de medias de Tukey.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del aceite de semilla de Sacha Inchi

La calidad de los aceites está determinada por diferentes parámetros físicos y químicos. Estos parámetros se ven influenciados principalmente por el origen del aceite, las condiciones geográficas, climáticas y las condiciones de procesamiento y almacenamiento [20]. En la tabla 1 se presenta los parámetros físicoquímicos del ASI. Los resultados obtenidos se compararon con valores reportados en la literatura [21, 22] y con la ficha técnica proporcionada por el proveedor del aceite utilizado en la presente investigación, encontrando que los resultados fueron similares a los reportados.

Tabla 1. Características físicoquímicas del aceite de semilla de Sacha Inchi

Característica	Aceite de semilla de Sacha Inchi
Densidad	0,926 (<0,01) g/cm^3
Contenido de humedad	0,198 (0,014)%
Índice de refracción	1,478 (<0,01) (nD)
Índice de acidez	1,393 (0,05) mg KOH/g aceite
Acidez (% ácido oleico)	0,696 (0,029)%
Índice de Saponificación	191,456 (0,063) mg KOH/g de aceite
Índice de yodo	189,081 (0,04) $g I_2/100 g$ de aceite
Índice de peróxidos	2,630 (0,321) meq O_2/kg de aceite
Hidroperóxidos k232	2,476 (0,068)
Hidroperóxidos k270	0,223 (0,007)

Los valores en paréntesis corresponden a las desviaciones estándar

La densidad aparente del aceite encontrada a 25 °C fue de 0,926 (<0,01) g/cm^3 que es levemente mayor a las densidades reportadas en la norma para aceites vegetales especificados CODEX STAN 210-1999 para los distintos aceites vegetales de amplia aceptación comercial (aceite de oliva, girasol, palma, coco, etc.). Esto

se debe a que la densidad aumenta a medida que aumenta el grado de insaturación, no obstante, el valor obtenido se comparó con el declarado en la ficha técnica por el proveedor de $0,9278 \text{ g/cm}^3$ y no se encontraron diferencias significativas.

El valor del contenido de humedad encontrado $0,198 (0,014) \%$ en el ASI es bajo lo que indica que su contenido en agua también lo es. Este contenido bajo en humedad lo confirma el resultado obtenido en la termobalanza de $0,18\%$. A pesar de que el valor obtenido no está dentro del rango declarado por el proveedor de $0,04\% - 0,14\%$, el contenido de humedad no supera la cantidad máxima de $0,2\%$ establecida en el CODEX STAN 19-1981.

El índice de refracción n_D determinado a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ fue de $1,478 (< 0,01)$ que es similar a los reportados por normas internacionales como la norma técnica peruana (NTP) 151.400 (2009) que establece un IR a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ entre $1,475 - 1,481$. Este dato también se ajusta a un estudio del perfil de los ácidos grasos del ASI realizado por Castaño et al. [12] quienes determinaron un IR para ASI de $1,479 (<0,01)$ y al valor declarado por el proveedor en la ficha técnica de $1,481$. El IR en aceites y grasas se va incrementado conforme aumenta el grado de insaturación y el porcentaje de ácidos grasos insaturados [23]. Por lo tanto el ASI tiene un IR alto ya que es altamente insaturado, pues es rico en ácidos grasos como el Linoleico (w-6) y el Linolénico (w-6).

La acidez o contenido de ácidos grasos libres determinado en el ASI fue de $0,696 (0,029)$ expresada como% de ácido oleico. Este parámetro permite identificar el contenido de ácidos grasos libres AGL presentes en una muestra. Es importante mencionar que el índice de acidez puede variar de forma significativa dependiendo del tratamiento dado a las semillas y la temperatura a la que son sometidas durante el proceso de extracción. Los valores obtenidos en el laboratorio se encuentran dentro del rango de aceptación establecido por normas internacionales como la NTP 151.400 (2009), en donde valores menores a 1 clasifican a los aceites como extra vírgenes, valores característicos de los aceites prensados en frío como el aceite empleado en este estudio. Además, es importante resaltar que cuando un aceite posee un alto índice de acidez apunta al uso de materia prima de baja calidad y mal manejo o almacenamiento, por lo que no se recomienda su consumo.

$191,456 (0,06) \text{ mg KOH/g}$ de aceite fue el valor determinado para el índice de saponificación del ASI. Este índice permite obtener una estimación del contenido de triglicéridos presentes en una muestra de aceite. Este valor corresponde a la cantidad (mg) de KOH requerida para saponificar 1 gramo de aceite. Este parámetro también se utiliza como control de calidad en los procesos de hidrogenación [24]. El valor obtenido en el laboratorio coincide con los declarados en la literatura [21, 22] que varían en el rango de $191- 199 \text{ mg KOH/g}$.

Con respecto al índice de yodo se encontraron valores de $189,081 (0,04) \text{ g } I_2/100 \text{ g de aceite}$ de muestra que coinciden con los reportados en la literatura, y los declarados por el proveedor de $189,42 \text{ g } I_2/100 \text{ g}$ en la ficha técnica. Además, este valor está dentro de los parámetros establecidos por la norma NTP 151.400 de $183 - 199 \text{ g } I_2/100 \text{ g de aceite}$. Este parámetro es una propiedad química relacionada con el grado de insaturación, con el índice de refracción y con la densidad: a mayor índice de yodo se tendrá mayor índice de refracción y mayor densidad [25]. Al comparar este valor con el índice de yodo de otros aceites vegetales de aceptación comercial se observa que el ASI tiene niveles de insaturación más altos, lo que es un indicativo de que su estabilidad oxidativa es menor.

El índice de peróxidos encontrado para el ASI fue de $2,630 (0,321) \text{ meq } O_2/ \text{ kg}$ de aceite que es comparable a los obtenidos por Castaño et al [21] y Maurer et al [26]. El índice de peróxidos es una medida del estado de oxidación de un aceite, siendo el límite máximo de hasta 15 miliequivalentes de oxígeno/kg el establecido por el CODEX STAN 19-1981 para aceites vírgenes y grasas y aceites prensados en frío. El índice de peróxidos es de gran utilidad en la caracterización de aceites vegetales y grasas ya que la presencia de peróxidos puede afectar negativamente las propiedades organolépticas del compuesto produciendo rancidez.

El k_{232} , es una medida espectrofotométrica realizada a una longitud de onda de 232 nm , y junto con el índice de peróxidos se utiliza como medida para describir la oxidación primaria del aceite. A esa longitud de onda absorben los dienos conjugados los cuales se forman debido a un cambio en la configuración de

los dobles enlaces que se producen durante la formación de radicales peroxidados e hidroperoxidados [27]. Valores bajos de los distintos parámetros espectrofotométricos corresponden a aceites de buena calidad [28]. Para los hidroperóxidos y los productos de oxidación secundaria k232 y k270, no hay normas internacionales que establezcan los parámetros de calidad para este aceite, sin embargo se utilizó como referencia los valores reportados en el reglamento (CE) No 1989/2003, donde los valores permitidos para el aceite de oliva virgen extra son $k232 \leq 2,50$ y $k270 \leq 0,22$ y virgen $k232 \leq 2,60$ y $k270 \leq 0,25$. Según estos parámetros establecidos, el aceite sometido a estudio fue clasificado como virgen extra, es decir, como aceite de alta calidad ya que los valores encontrados para el k232 fueron de 2,476 (0,068) y para k270 de 0,223 (0,007).

3.2 Caracterización de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi

3.2.1 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es definido como el diámetro de la gota de la fase interna, la cual, es de vital importancia para una emulsión ya que influye en la textura y estabilidad de esta, asociándose un tamaño de partícula uniforme y pequeño con una emulsión con buena estabilidad [29].

En la Tabla 2 se muestran los diferentes tamaños medios de partícula expresados en volumen D (4,3) de las diferentes emulsiones evaluadas. Se encontraron tamaños de partícula entre 0,76-1,34 μm . Los tamaños medios muestran que las emulsiones elaboradas con una concentración mayor de aceite (10%, p/p) presentaron un tamaño mayor de partícula que las que fueron elaboradas con una menor concentración de aceite (5%, p/p).

Con base en los resultados obtenidos en el ANOVA se concluye que todos los factores y sus interacciones tuvieron efecto significativo sobre el tamaño de partícula, donde el factor que mayor influencia tuvo fue la velocidad. Los valores de D (4,3) muestran que, al aumentar la velocidad del tratamiento de homogeneización, el tamaño de partícula disminuyó significativamente, obteniendo los menores tamaños de partícula para las emulsiones preparadas utilizando una velocidad de 18.000 rpm. Esto coincide con lo reportado por Ricaurte et al [30] donde el tamaño de las partículas de aceite se vio afectado por la velocidad de homogeneización del tratamiento. A mayor velocidad, se aplican fuerzas disruptivas muy intensas capaces de romper la fase oleosa de la fase acuosa, dando lugar a la formación de partículas de aceite muy finas con tamaños más homogéneos y más uniformes.

Asimismo, se encontró que, a medida que aumentó la concentración de aceite, el tamaño de partícula se incrementó, lo que puede estar asociado a que, a mayor concentración de aceite, mayor viscosidad, lo que contribuye a que la velocidad del proceso se reduzca y, por lo tanto, la recoalescencia entre las partículas de aceite aumente. Por otro lado, al comparar los valores de las corridas donde el porcentaje en peso del caseinato sódico fue mayor también se encontró que el tamaño de la partícula fue más pequeño. Amaya et al [19] investigaron la encapsulación de aceite de semilla de chía variando diferentes proporciones de material de pared (maltodextrina y caseinato sódico), encontrando que aquellas formulaciones donde la cantidad de caseinato era mayor, se reducía el tamaño de partícula lo que indica que la proteína limita el tamaño de las partículas de aceite.

3.2.2. pH y conductividad

El pH de las emulsiones es necesario tenerlo en cuenta para impedir que las emulsiones lleguen al punto de mínima solubilidad. Este hecho ocasiona que se presente una precipitación de las proteínas, lo que impediría continuar con los procedimientos de secado a los que pueden ser sometidas las emulsiones. Para que una emulsión sea estable es necesario que el valor del pH de esta sea mayor al punto isoeléctrico de la proteína (caseinato sódico), esto es, 5,98 [31].

En la Tabla 2 se presentan los valores de pH de las emulsiones. Se encontraron valores de pH que variaron en un rango de 6,43 a 6,64. Con base en estos resultados se pudo establecer con el análisis estadístico

ANOVA que los factores con mayor influencia fueron los de la relación material de pared y la concentración de aceite. Las emulsiones con mayor concentración de caseinato sódico (15 y 20%) en la relación de material de pared y mayor concentración de aceite (10%, p/p) reportaron valores más altos de pH. En diferentes estudios se encontró que para pH cercanos o por debajo del punto isoeléctrico, se promueven cambios en las interacciones electrostáticas e hidrofóbicas de las proteínas, lo que puede conducir a la formación de aglomerados insolubles y, por lo tanto, a una desestabilización de las emulsiones [32].

Por otro lado, dado que el pH de las emulsiones fue mayor al punto isoeléctrico del caseinato sódico mencionado se puede decir que las emulsiones fueron estables.

En la tabla 2 se muestran los valores de conductividad para cada una de las emulsiones evaluadas. Los valores encontrados para conductividad variaron entre 668 y 877 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Esta propiedad representa la capacidad que tiene determinada materia para conducir corriente eléctrica y depende de los enlaces presentes en el material, la estructura atómica y la temperatura [30].

En los resultados obtenidos en el ANOVA todos los factores y sus interacciones tuvieron efecto sobre la conductividad, pero el factor que mayor influencia tuvo sobre la conductividad fue el de la concentración de aceite, lo que coincide con lo reportado en literatura, donde se establece que la conductividad de una emulsión aumenta cuando el contenido de agua de la emulsión es mayor al contenido de aceite [33]. En ese sentido, es lógico que se reporten valores más altos para aquellas emulsiones con menor concentración de aceite (5% p/p).

Para una misma columna, letras diferentes indican la presencia de diferencias estadísticamente significativas de acuerdo al test de Tukey ($p < 0.05$). Los valores en paréntesis son las desviaciones estándar.

Por otro lado, el aumento observado en la conductividad también podría estar relacionado con el aumento en la proporción de caseinato sódico debido a la capacidad que tiene esta proteína de evitar la aglomeración, debido a las cargas diferenciales a lo largo de su estructura molecular provocadas por la cadena polipeptídica κ que contiene [34]. Asimismo, las propiedades anfífilas que tienen las proteínas permiten la ionización de la capa superficial de las partículas generando un aumento de la repulsión de las partículas de aceite [35].

3.2.2 Textura de las emulsiones

Los valores para la firmeza, consistencia y cohesividad de las emulsiones (Tabla 2) variaron en un rango de 10,03 a 10,85 g, 116,95 a 218 g·sec y 7,06 a 9,93 g, respectivamente. Al evaluar estas tres variables en el ANOVA se encontró que todos los factores e interacciones fueron significativos. Sin embargo, el factor que mayor influencia tuvo fue el de la concentración de aceite, reportando los valores más altos de firmeza, consistencia y cohesividad para las emulsiones preparadas con 10% p/p de aceite.

Estos resultados coinciden con lo reportado en literatura donde se establece que aquellas emulsiones con mayor proporción de fase dispersa en su composición (mayor agregación de partículas de aceite) presentan una mayor viscosidad y, por tanto, mayores valores de estas propiedades de textura [33].

3.2.3 Comportamiento al flujo

Las propiedades reológicas de los alimentos se fundamentan en las respuestas de flujo y deformación cuando estos se someten a tensiones normales y tangenciales. Los estudios sobre estas propiedades son útiles e importantes para las aplicaciones, procesamiento, control de calidad y evaluación sensorial de los alimentos [36]. Estas propiedades dependen en gran parte de las fases de la emulsión (continua y dispersa), pero principalmente de la fase dispersa.

Esto no sólo cambia la viscosidad de la emulsión respecto a la viscosidad de las fases, sino también hace que el comportamiento de la emulsión difiera del caso más simple: el fluido newtoniano [37].

Tabla 2. Diseño experimental para la preparación de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi y propiedades físico-químicas evaluadas: Tamaño de partícula, pH, conductividad, firmeza, consistencia, cohesividad, viscosidad, tensión superficial TS y ángulo de contacto AC

Corrida	Concentración ASI (%p/p)	Maltodextrina caseinato sódico (%p/p)	Velocidad (rpm)	Tamaño de partícula μm	pH	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Firmeza g	Consistencia g-sec	Cohesividad g	Viscosidad a 50 s^{-1} Pa-s	TS (mN/m)	AC ($^{\circ}$)
1	5	85:15	18.000	0,84 ^{ef} (0,031)	6,61 ^b (0,002)	831 ^b (0,354)	10,86 ^d (0,014)	122,06 ^{ah} (0,933)	7,64 ^{f/g} (0,014)	0,008 ^h (0,001)	37,71 ^c (0,084)	30,45 ^f (0,035)
2	10	85:15	18.000	0,86 ^e (0,016)	6,62 ^{ab} (0,005)	711 ^g (3,536)	11,30 ^d (0,021)	133,54 ^e (1,668)	9,24 ^{de} (0,035)	0,055 ^h (0,015)	38,05 ^{bc} (0,021)	42,02 ^c (0,049)
3	5	80:20	10.000	1,23 ^{bc} (0,028)	6,64 ^{ab} (0,005)	870 ^a (4,243)	12,00 ^{bc} (0,021)	141,71 ^d (0,063)	9,47 ^c (0,028)	0,008 ^h (0,010)	35,22 ^d (0,063)	36,07 ^f (0,184)
4	10	90:10	18.000	0,87 ^e (0,017)	6,53 ^c (0,013)	702 ^g (4,950)	11,06 ^{ef} (0,007)	130,10 ^{ef} (0,707)	9,03 ^{ef} (0,014)	0,037 ^c (0,036)	39,80 ^a (0,084)	43,72 ^b (0,012)
5	5	85:15	10.000	1,29 ^{ab} (0,012)	6,62 ^{ab} (0,002)	805 ^c (2,228)	10,99 ^{f/g} (0,042)	122,75 ^{f/g} (1,393)	7,35 ^g (0,070)	0,007 ^g (0,001)	38,05 ^{bc} (0,098)	32,26 ^h (0,757)
6	5	90:10	10.000	1,15 ^c (0,031)	6,63 ^{ab} (0,009)	786 ^d (0,000)	10,15 ^h (0,021)	120,76 ^{gh} (1,393)	7,26 ^h (0,035)	0,007 ^h (0,050)	39,99 ^a (0,056)	38,65 ^d (0,205)
7	5	90:10	18.000	1,04 ^d (0,001)	6,43 ^d (0,012)	794 ^{cd} (0,354)	10,03 ^h (0,042)	116,95 ^h (2,333)	7,06 ^h (0,021)	0,008 ^h (0,001)	39,74 ^a (0,233)	38,17 ^d (0,035)
8	5	80:20	18.000	0,76 ^f (0,003)	6,64 ^{ab} (0,004)	877 ^a (3,182)	11,84 ^c (0,042)	171,80 ^c (1,463)	9,59 ^{bc} (0,014)	0,009 ^h (0,031)	33,68 ^e (0,021)	35,21 ^g (0,042)
9	10	85:15	10.000	1,17 ^c (0,055)	6,43 ^d (0,011)	752 ^c (0,354)	12,03 ^b (0,099)	181,55 ^b (1,767)	9,76 ^b (0,014)	0,033 ^d (0,001)	38,42 ^b (0,035)	36,78 ^e (0,156)
10	10	90:10	10.000	1,34 ^a (0,007)	6,53 ^c (0,002)	668 ^b (4,596)	11,19 ^{de} (0,028)	141,00 ^d (1,979)	9,36 ^d (0,004)	0,032 ^d (0,007)	40,01 ^a (0,028)	38,68 ^d (0,191)
11	10	80:20	18.000	0,83 ^{ef} (0,004)	6,64 ^{ab} (0,011)	751 ^e (3,182)	11,94 ^{bc} (0,066)	174,89 ^{bc} (3,486)	9,66 ^{bc} (0,014)	0,057 ^{ab} (0,008)	33,80 ^e (0,127)	36,05 ^f (0,099)
12	10	80:20	10.000	0,87 ^e (0,004)	6,64 ^a (0,011)	734 ^f (6,364)	12,85 ^a (0,014)	218,00 ^a (1,697)	9,93 ^a (0,044)	0,060 ^a (0,001)	34,97 ^d (0,134)	44,70 ^a (0,177)

En la Figura 1 se muestra el comportamiento al flujo de las diferentes emulsiones evaluadas. A partir de esta figura se puede afirmar que las emulsiones se alejan del comportamiento newtoniano, presentando un comportamiento pseudoplástico, característico de aquellos fluidos que disminuyen su viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla aplicada [36]. La viscosidad a una velocidad de cizalla de 50 s^{-1} , varió dentro del rango de valores entre 0,007 y 0,060 Pa·s. Se encontró que aquellas emulsiones que presentaron mayor viscosidad fueron aquellas elaboradas con una mayor concentración de aceite (10% p/p) y menor velocidad de homogeneización (10.000 rpm).

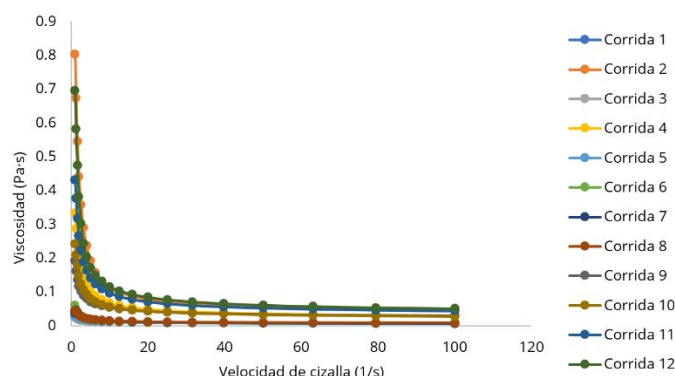


Figura 1. Comportamiento al flujo de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi

Al realizar el análisis estadístico ANOVA, todos los factores e interacciones resultaron significativos, pero el que mayor influencia tuvo fue el de la concentración de aceite, lo que reafirma que los valores más altos de viscosidad son aquellos de las emulsiones elaboradas con una concentración del 10% p/p. Esto coincide con lo reportado con McClements [33] que encontró que a mayor agregación de gotas de aceite existe un aumento en la viscosidad de la emulsión. Asimismo, a velocidades más bajas de homogeneización las fuerzas disruptivas para deformar las gotas de aceite son menores, lo que puede explicar también que los tamaños de partícula más grandes se encontraron en las emulsiones más viscosas [38]. Por otro lado, también se evidenció que el aumentar la cantidad de caseinato (15 y 20%) en la relación material de pared, aumentó la viscosidad. Esto puede deberse a que a mayores concentraciones de proteína la capacidad emulsificante también aumenta [39].

Los datos obtenidos de viscosidad para las diferentes emulsiones evaluadas se modelaron a la ley de la potencia de Ostwald de Waele utilizando la ecuación (1). En la tabla 3 se muestran los valores de n , k y R^2 hallados para cada emulsión analizada.

Tabla 3. Índice de flujo (n), índice de consistencia (k) y R^2 para las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi

Concentración ASI (%p/p)	Maltodextrina caseinato sódico (%p/p)	Velocidad (rpm)	n	$k (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	R^2
5	85:15	18.000	0,651	0,221	0,971
10	85:15	18.000	0,414	0,757	0,971
5	80:20	10.000	0,758	0,180	0,980
10	90:10	18.000	0,472	0,563	0,968
5	85:15	10.000	0,673	0,201	0,966
5	90:10	10.000	0,574	0,248	0,969
5	90:10	18.000	0,548	0,249	0,940
5	80:20	18.000	0,612	0,242	0,962
10	85:15	10.000	0,610	0,437	0,958
10	90:10	10.000	0,527	0,490	0,965
10	80:20	18.000	0,498	0,636	0,970
10	80:20	10.000	0,434	0,749	0,956

Los valores de R^2 de los ajustes indican que la calidad del ajuste es adecuada al comportamiento de los datos obtenidos. Con los valores del índice de flujo ($n < 1$) se reafirma el comportamiento pseudoplástico de las emulsiones [40]. Por otro lado, el índice de consistencia permite conocer cuáles de las emulsiones fueron más viscosas, ya que entre más alto sea este índice, la viscosidad será mayor. En ese sentido, se puede reafirmar que aquellas emulsiones con mayor concentración de aceite (10%, p/p), mayor cantidad de caseinato (15 y 20%) de la relación material de pared y menor velocidad de homogeneización (10.000

rpm) fueron las que mayor viscosidad presentaron. Este aumento en la viscosidad se podría atribuir a que existe una mayor fracción de partículas de aceite suspendidas, lo que facilita que haya una mayor interacción entre ellas y, a su vez, estas no se rompen fácilmente a velocidades bajas [41].

El módulo elástico G' y el módulo viscoso G'' se utilizaron para evaluar el comportamiento viscoelástico de las emulsiones. La Figura 2 presenta el módulo elástico y el módulo viscoso a 20 ° C en función de la frecuencia (barrido de frecuencia) para emulsiones con una concentración del 5%, p/p (Figura 2A) y 10%, p/p (Figura 2B) de aceite, respectivamente. En la figura 2A se puede apreciar que en las emulsiones elaboradas con una concentración de aceite del 5%, p/p siempre predominó el carácter viscoso sobre el elástico ($G' < G''$). Por otro lado, en las emulsiones elaboradas con una mayor concentración de aceite (10% p/p, Figura 2B) inicialmente predominó el carácter elástico ($G' > G''$) para frecuencias bajas (1 a 20 rad/s), luego pasó a una zona de transición de flujo donde finalmente predominó el carácter viscoso ($G' < G''$). Se ha demostrado que, en las emulsiones no floculadas o débilmente floculadas, el módulo de pérdidas (G'') presenta valores por encima de los de almacenamiento (G'). Este comportamiento viscoso puede deberse a que la separación entre gotas es mayor y, por lo tanto, las interacciones repulsivas entre éstas son relativamente débiles [42].

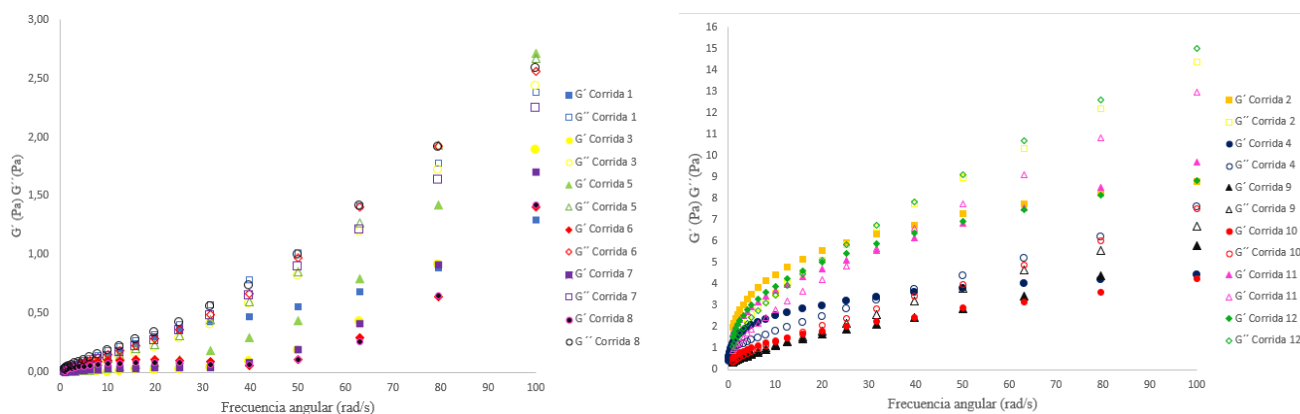


Figura 2. Propiedades viscoelásticas de las emulsiones de aceite de semilla de Sacha Inchi al 5% p/p (A) y al 10% p/p (B)

3.2.4 Tensión superficial y ángulo de contacto

La tensión superficial TS para las emulsiones (Tabla 2) varió en un rango de valores de 33,68 a 40,01 (mN/m). Al realizar el análisis estadístico ANOVA de las emulsiones se encontró que la concentración de aceite y la relación maltodextrina: caseinato sódico fueron los factores que mayor influencia tuvieron sobre la tensión superficial. Se observó que al aumentar la concentración de caseinato sódico (15 y 20%) de la relación de material de pared se disminuyó la tensión superficial en la interfase, lo que puede deberse a la acción que tiene la proteína de disminuir la energía libre, disminuyendo el área interfacial y a su vez generando más estabilidad termodinámica al sistema [43].

En estudios previos se encontró una reducción de la tensión sobre la interfase aire-agua al aumentar las concentraciones de proteína, identificando que al emplear la proteína al 0.1 g/L se alcanzaron valores de tensión de alrededor de 54.2 mN/m, mientras que cuando se incrementó la concentración a 3 g/L, los valores de tensión se redujeron alrededor de 42.2 mN/m [44]. Esto coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde las emulsiones elaboradas con una concentración de caseinato del 10% reportaron valores entre 37,71 a 40,01 mN/m; mientras que al trabajar con concentraciones de caseinato sódico del 15 y el 20% de la relación de material de pared se reportaron valores entre 33,68 a 37, 14 mN/m.

El ángulo de contacto (θ) es comúnmente usado para caracterizar superficies y determinar el grado de adherencia entre una superficie sólida y un líquido [45]. En este sentido, con ángulos de contacto menores a 90° las partículas se mojan preferentemente por el agua, estabilizan emulsiones O/W y ocasionan que el líquido se extienda (partículas hidrófilas). Por el contrario, con ángulos de contacto mayores a 90° la partícula es mojada preferentemente por el aceite y la emulsión predominante será W/O lo que ocasiona que se forme una gota compacta por la poca afinidad del líquido con el sólido (partículas hidrófobas) [46].

Los valores para el ángulo de contacto de las emulsiones evaluadas variaron en un rango de 30,45 a 44,70° lo que indica que las emulsiones que predominaron fueron del tipo O/W. Estos valores reportados en la tabla 2 para el ángulo de contacto permiten hacer una estimación de cuan estables pueden ser las emulsiones ya que se ha establecido que cuando las partículas son muy hidrófilas (bajos θ) o muy hidrófobas (altos θ), tienden a estar dispersas tanto en la fase acuosa como en la del aceite y, por lo tanto, dan lugar a emulsiones inestables [47]. Los ángulos obtenidos en este estudio (valores de 30,45 a 44,70°) no son lo suficientemente bajos ni lo suficientemente altos para afirmar que puedan dar lugar a emulsiones inestables.

Teniendo en cuenta los resultados del ANOVA, todos los factores y sus interacciones tuvieron efecto sobre el ángulo de contacto, pero el factor con mayor influencia fue la concentración de aceite. Se encontró que al aumentar la concentración de aceite (10% p/p), el ángulo de contacto también aumentó. En estudios previos se ha reportado que a mayor concentración de aceite se forma una gota más compacta lo que ocasiona que el ángulo de contacto entre la gota y la superficie sólida sea mayor debido a la poca afinidad de las fases en la emulsión [47].

4. CONCLUSIONES

Las determinaciones analíticas realizadas en este trabajo mostraron al ASI como un aceite comparable a otros de gran aceptación comercial tanto por sus propiedades fisicoquímicas como funcionales. Los valores obtenidos en las pruebas estuvieron dentro del rango de aceptación establecido por normas internacionales, así como también fueron comparables a estudios previos de caracterización de este aceite. Por este motivo su consumo es recomendable ya que contribuye a la disminución de los niveles de colesterol por la gran cantidad de ácidos grasos poliinsaturados.

A pesar de que las investigaciones del ASI en países latinoamericanos como Perú han avanzado, en Colombia es muy poco lo que se ha hecho. Por lo tanto, es necesario seguir desarrollando en el país trabajos de investigación que conlleven al aprovechamiento de este aceite para la obtención de productos de alto valor agregado, dado el interés del consumidor de mantener una buena salud a través de la alimentación.

Al analizar las propiedades de las emulsiones elaboradas por homogenización a alta velocidad, se pudo establecer un criterio para recomendar una formulación que favorezca su estabilidad. Los resultados obtenidos demostraron que la mejor formulación fue aquella en donde la concentración de aceite fue menor (5% p/p), así mismo la relación de material de pared que se recomienda es de 80:20 y por último una velocidad de homogenización de 18.000 rpm.

Las emulsiones que contienen ASI mostraron un alto potencial, lo que las hace interesantes para ser aplicadas en alimentos con el fin de enriquecerlos con los ácidos grasos que contienen que son esenciales para el metabolismo y contribuyen a la prevención de enfermedades. Es posible afirmar que este aceite se convertirá en una interesante materia prima para el desarrollo de nuevos productos en los próximos años. En el caso específico de Colombia, este aceite también puede ser una excelente alternativa a los cultivos ilícitos y, por lo tanto, contribuir a reducir los problemas socioeconómicos del país.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de los Andes por la financiación de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Ramírez, Sacha Inchi e Higuierilla seducen como nueva alternativa de cultivos", La República. 2014, Recuperado: <https://www.larepublica.co/archivo/sacha-inchi-e-higuierilla-seducen-como-nueva-alternativa-de-cultivos-2100141>
- [2] S. Wang, F. Zhu, & Y. Kakuda, "Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses". *Food Chemistry*, 2018. vol 265. pp. 316-328.
- [3] Galli, C, and F Marangoni. "N-3 fatty acids in the Mediterranean diet." *Prostaglandins, leukotrienes, and essential fatty acids* vol. 75,3, 2006, pp. 129-33.

- [4] M. Coronado, et al. "Los ácidos grasos omega-3 y omega-6: Nutrición, bioquímica y salud". *REB*. vol 72,3. 2006, pp. 72-79.
- [5] M. Mark. "Can antioxidants vitamins materially reduce oxidative damage in humans?". *Free Radic Biol Med*. ((1999). vol 26(7/8). pp 1034-1053.
- [6] M, Bouziane P. J. "Changes in fatty acid composition of total serum and lipoproteins particles, in growing rats given protein-deficients diet with eitherhydrogenated coconut or salmon oils as fat sources". *Brit. J. Nut.* (1994). vol 71. pp 375- 387.
- [7] J. Frank J. Geil, R. Freaso. "Automatic Determination of Oxidation Stability of Oil and Fatty Products". *Food Technol.* 1982; vol 36. pp 71-76.
- [8] H. Silva, M. Cerqueira, and A. Vicente, "Nanoemulsions for food applications: development and characterization". *Food and Bioprocess Technology*, 2012. vol 5(3), pp. 854-867.
- [9] S. Jafari, "An overview of nanoencapsulation techniques and their classification, in Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries", Academic Press 2017. pp. 1-34.
- [10] C. Wandrey, A. Bartkowiak, & S. Harding, "Materials for encapsulation". N. Zuidam & V. Nedović (Eds.), "Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing" New York: Springer. 2010.
- [11] H. Sahin, & M. Afşin, "Physical properties and fatty acid composition of pomegranate seed oil microcapsules prepared by using starch derivatives/whey protein blends". *European Journal of Lipid Science and Technology*, (2014). vol 116(7), pp. 847–856.
- [12] M. Jimenez, H. García, & C. Beristain, "Spray-drying microencapsulation and oxidative stability of conjugated linoleic acid". *European Food Research and Technology*, (2004). vol 219(6), pp. 588–592.
- [13] C. Copado, B. Diehl, V. Ixtaina, & M. Tomás, "Application of Maillard reaction products on chia seed oil microcapsules with different core/wall ratios," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 86, pp. 408–417, 2017.
- [14] K. Pycia, L. Juszczak, D. Gałkowska, M. Witczak, and G. Jaworska, "Maltodextrins from chemically modified starches. Selected physicochemical properties", *Carbohydr. Polym.* 2016, vol. 146, pp. 301–309.
- [15] N. Potes, A. Lim, and Y. Roos, "Engineering Foods for Bioactives Stability and Delivery". New York: Springer. 2017.
- [16] C. Genot, T. Kabri, and A. Meynier, "Stabilization of omega-3 oils and enriched foods using emulsifiers in Food Enrichment with Omega-3 Fatty Acids3", *Elsevier*, 2013, vol 153 pp. 150–193.
- [17] S. Sadeghpour, and B. Dabir, "Three-factor response surface optimization of nano-emulsion formation using a microfluidizer". *J. Food Sci Technol*, 2015. vol 52(5), p. 2558-2571.
- [18] L. Bai, et al, "Fabrication of oil-in-water nanoemulsions by dual-channel microfluidization using natural emulsifiers: Saponins, phospholipids, proteins, and polysaccharides". *Food Hydrocoll.*, 2016. vol 61, pp. 703-711.
- [19] J. Amaya, et al. "Formulation of a responsive in vitro digestion wall material, sensory and market analyses for chia seed oil capsules". *Journal of Food Engineering*. (2021). Vol. 296, 110460.
- [20] F. Shahidi, Y. Zhong, "Lipid oxidation: measurement methods. Bailey's industrial oil and fat products," Six Volume Set. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. pp. 357–385 (2005).
- [21] D. Castaño, et al, "acid composition of inca peanut (*Plukenetia volúbilis* linneo) and its relationship with vegetal bioactivity". *Rev Chil Nutr*, 2012, vol. 39, pp. 45-52.
- [22] L. Paucar, et al, "study of physical-chemical features of sachá inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.), olive oil (*Olea europaea*) and fish oil". *Scientia Agropecuaria*, 2015 vol.6 (4).
- [23] R. Mailer, J. Ayton, K. Graham, "The influence of growing region, cultivar and harvest timing on the diversity of Australian olive oil". *J. Am. Oil Chem.* vol. 87, pp 877–884.
- [24] A. Willnecker, A. Pramparo, "Estudio de la hidrogenación del aceite de jojoba". *Grasas y aceites*. 2009; vol. 60, pp 48-54.
- [25] F. Benatmane, et al. "Effect of a linseed diet on lipogenesis, fatty acid composition and stearoyl-CoA-desaturase in rabbits." *Animal: an international journal of animal bioscience* vol. 5,12 (2011), pp.1993-2000.
- [26] N. Maurer, B. Hatta-Sakoda, G. Pascual-Chagman, and L. E. Rodriguez. "Characterization and authentication of a novel vegetable source of omega-3 fatty acids, sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil," *Food Chem*. 2012, vol. 134, pp. 1173–1180.
- [27] A. Viñas, "Caracterización y clasificación quimiométrica de aceites vírgenes comercializados en supermercados de Lima Metropolitana". M. S. tesis, Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú 2020.
- [28] I. Paz, & M. Molero, "Aplicación de la espectrofotometría uv-visible al estudio de la estabilidad térmica de aceites vegetales comestibles". *Grasas y Aceites*, 2000, vol 51, pp 424-428.
- [29] S. Schultz, G. Wagner, K. Urban & J. Ulrich. "High-pressure homogenization as a process for emulsion formation". *Chemical Engineering Technology*. (2004). vol. 27, pp. 361–368.
- [30] L. Ricaurte, et al. "Physical, thermal and thermodynamical study of high oleic palm oil nanoemulsions". *Food Chemistry* (2018). vol 256, pp. 62–70.
- [31] C. Huck, J. Rincón, J. Montes y R. Candal, "Gelificación de Emulsiones de Caseinato de Sodio como Alternativa a las Grasas Trans", *Ciencia e Investigación*, (2016). vol. 64.
- [32] L. Maldonado et al. "Influencia del pH en la estabilidad de emulsiones elaboradas con proteínas de salvado de arroz". Laboratorio tecnológico del Uruguay. *INNOTEC* (2011). vol. 6. Pp. 28-31

- [33] D. McClements, "Food Emulsion Principle, Practices, and Techniques". Nirmala, R., Park, H. M., Navamathavan, R., Kang, H. S., El-Newehy, M. H., & Kim, H. Y. (2011). Lecithin blended polyamide-6 high aspect ratio nanofiber scaffolds via electrospinning for human osteoblast cell culture. *Materials Science and Engineering C*, vol 31(2), pp 486-493.
- [34] F. Figueiredo et al. "Structural and emulsifying properties of sodium caseinate and lactoferrin influenced by ultrasound process" (2017). *Food Hydrocolloids*, vol 63, pp 178-188.
- [35] D. McClements, "Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques", third ed. CRC press, Estados Unidos (2015).
- [36] M. Rao, "Flow and functional models for rheological properties of fluid foods". In *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods* (pp. 27-61). Springer, Boston, MA.
- [37] J. Israelachvili, "The science and applications of emulsions an overview". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (1994). Vol. 91, pp. 1-8.
- [38] C. Qian, & D. McClements, "Formation of nanoemulsions stabilized by model food-grade emulsifiers using high-pressure homogenization: Factors affecting particle size". *Food Hydrocolloids*, (2011). Vol 25(5), pp 1000-1008.
- [39] M. Li, Y. Ma, & J. Cui, "Whey-protein-stabilized nanoemulsions as a potential delivery system for water-insoluble curcumin". *LWT - Food Science and Technology*, (2014). Vol 59(1), pp 49-58.
- [40] C. Fierro, "Reología y fluidos no newtonianos" (2019). Recuperado: <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/reologia>
- [41] A. Gomes, A. Costa, F. de Assis, R. da Cunha, "Role of the phases composition on the incorporation of gallic acid in O/W and W/O emulsions." *J. Food Eng.* 2016. Vol. 168, pp. 205-214.
- [42] C. Bower, et al., "The rheological and microstructural characterisation of the non linear flow behaviour of concentrated oil in water", *Rheol Acta*, (1999), vol. 38, pp. 145-150.
- [43] O. Pérez, K. Martínez, C. Sánchez, J. Patino, "Strategy for Foaming Improvement of Whey Protein Concentrates by Addition of Hydroxypropylmethylcellulose and Heating: Relation with Interfacial Properties". *Nutr Food Technol Open Access* (2017), vol. 3(2).
- [44] I. Schmidt, B. Novales, F. Boué, & M. Axelos, "Foaming properties of protein/pectin electrostatic complexes and foam structure at nanoscale". *Journal of colloid and interface science*, (2010). vol 345(2), pp. 316-324.
- [45] T. Zhao, & L. Jiang. "Contact angle measurement of natural materials". *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (2018). Vol. 161, pp. 324-330.
- [46] D. Myers. "Colloids and Colloidal Stability. Surfaces", *Interfaces, and Colloids p* ", (2002). pp. 214-252.
- [47] I. Aranberri, "Estabilidad de las emulsiones de Pickering utilizadas en la elaboración de productos agroquímicos". *Real sociedad española de química. Emulsiones*. (2009). pp. 13-20.

Efecto de los iones en solución sobre la viscosidad de soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizadas de bajo peso molecular

Tulio Andrés Prada Sánchez¹

Adán Yovani León Bermúdez²

Samuel Fernando Muñoz Navarro³

Rodrigo Gonzalo Torres Sáez⁴

¹⁻³ *Universidad Industrial de Santander*

⁴ *Ecopetrol S.A.*

Colombia

La poliacrilamida parcialmente hidrolizada es el polímero más usado como fluido de desplazamiento en operaciones de recobro mejorado. Su estructura contiene grupos carboxílicos que se repelen entre sí debido a sus cargas negativas, las cuales incrementan el radio hidrodinámico de la molécula, un efecto que genera incremento en la viscosidad de la solución. La preparación de estos fluidos requiere aguas de baja salinidad debido al efecto adverso que tienen los iones en solución sobre la conformación estructural de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada. Se ha identificado que tanto los iones monovalentes como los divalentes interactúan con los grupos carboxílicos, generando un efecto pantalla y reduciendo su repulsión, lo cual causa una disminución en el radio hidrodinámico de la molécula y en la viscosidad de la solución. En el presente trabajo se estudió el efecto de los iones en solución sobre la viscosidad de soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizada de bajo peso molecular mediante un diseño experimental 2^{k+1} , tomando como referencia las composiciones de aguas de producción de campos petroleros colombianos. Se observó que el principal efecto sobre la viscosidad lo tiene el calcio- Además, que a medida que el calcio en solución aumenta, la cantidad de sodio tiene un menor efecto sobre la viscosidad de la solución de polímero.

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos.

Cotacto: tulio2188196@correo.uis.edu.co

² Doctor en Química.

Cotacto: adanleon@uis.edu.co

³ Magíster en Ingeniería de Petróleos.

Cotacto: samuel@uis.edu.co

⁴ Doctor en Bioquímica.

Cotacto: rodrigo.torres@ecopetrol.com.co

1. INTRODUCCIÓN

Las soluciones de polímero se utilizan en las operaciones de recobro mejorado como fluidos de desplazamiento. El objetivo de estos fluidos es barrer el aceite remanente de las formaciones de petróleo y lograr la máxima recuperación posible. Para este propósito se han utilizado diferentes tipos de polímero entre los que se destaca la poliacrilamida parcialmente hidrolizada HPAM, que es el polímero más ampliamente utilizado debido a sus características reológicas y su capacidad de viscosificación del agua.

Uno de los principales problemas que afronta la aplicación de este tipo de fluido es la salinidad del agua, ya que, al ser un fluido electrolítico, las cargas de las sales en solución pueden afectar la conformación estructural de la molécula de poliacrilamida, afectando la viscosidad de la solución.

En Colombia, la aplicación de polímeros para recobro mejorado se ha realizado en diferentes campos de crudo medio, y se utiliza agua fresca como fluido de preparación para evitar el efecto de los iones en el fluido de desplazamiento. Sin embargo, cuando estos fluidos ingresan a la formación, es inevitable que contacten con el agua de formación y generen efectos de degradación química de la viscosidad.

En el presente trabajo se muestra el efecto de la salinidad en la forma de sodio y calcio sobre la viscosidad de las soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizada de bajo peso molecular, el cual es un polímero aplicado habitualmente como fluido de desplazamiento en operaciones piloto.

2. MARCO CONCEPTUAL

Las soluciones de poliacrilamida parcialmente hidrolizada son conocidas por su sensibilidad a la degradación por cizallamiento [1]. La viscosidad aparente de estas soluciones tiende a adoptar un comportamiento reo-adelgazante con el incremento de la velocidad de corte como resultado del cambio en la conformación estructural de la molécula de polímero cuando las moléculas se desenrollan y se alinean entre ellas en la dirección del esfuerzo aplicado [2, 3].

La viscosidad de las soluciones de polímero puede ser afectada por diferentes factores durante la etapa de bombeo y circulación en la formación, entre ellas se encuentran la temperatura, el oxígeno disuelto, el hierro, la salinidad y en particular la concentración de iones divalentes [4].

El efecto de los iones monovalentes y divalentes sobre la viscosidad de soluciones de poliacrilamida ha sido estudiado por algunos autores de manera separada [5–7], considerando por un lado el efecto de los iones monovalentes y por el otro el de los divalentes y un experimento de punto medio, en concentraciones que se encuentran por fuera de los límites de concentración de las aguas de formación y de preparación de los campos en Colombia.

La molécula de poliacrilamida tiene en su conformación estructural grupos carboxílicos del ácido acrílico, estos grupos le confieren el carácter electrolítico y son generados por un proceso de hidrólisis. Cuando la molécula ingresa al agua los grupos negativos ejercen un efecto de repulsión entre sí, que hace que la molécula adquiera un radio hidrodinámico mayor al que puede tener la poliacrilamida convencional. Cuando un ión, como el sodio o el calcio, ingresa al sistema, estos afectan la viscosidad de la solución de polímero debido a sus interacciones con la molécula de poliacrilamida, ya que generan una disminución del efecto de repulsión mencionado, debido a la atracción entre el catión y el grupo negativo, lo que conduce a una disminución del radio hidrodinámico de la molécula y por ende de la viscosidad de la solución.

Es de esperar que el efecto de los iones divalentes sea mayor debido a su mayor fuerza iónica, sin embargo, no está claro el efecto conjunto que puedan tener y como esto afecta la viscosidad de la solución del fluido polimérico. Se ha identificado que existen zonas de compatibilidad de la molécula con los iones en solución, sobre todo los divalentes, y se ha observado que la cantidad de calcio en solución incide notablemente en la solubilidad del polímero [6]. Sin embargo, los estudios han sido muy gruesos en sus rangos de estudio y no permiten identificar zonas de compatibilidad con respecto a las aguas de formación de campos colombianos.

3. MÉTODO

En el presente estudio se presenta en detalle el desarrollo experimental realizado con el fin de evaluar el efecto de la salinidad en forma de iones monovalentes y divalentes sobre el comportamiento reológico de soluciones de poliacrilamida de bajo peso molecular. Este resultado permitió establecer los rangos composicionales de sodio y calcio, donde el sistema HPAM/Na⁺/Ca⁺⁺ es estable y no genera precipitación del polímero. Inicialmente se tomó como referencia una revisión de las composiciones de sodio y calcio en las aguas de producción de los principales campos de Colombia donde se realiza inyección de agua, se están realizando pilotos de inyección de agua o polímero y donde existe el potencial de aplicación de la técnica. Con estos datos se estableció un rango máximo y mínimo tanto de sodio como de calcio.

Se elaboró un diseño experimental 2k+1, donde se tomaron en cuenta tres factores de dos niveles y un nivel intermedio para establecer posibles desviaciones de la linealidad. Los experimentos fueron realizados en el Centro de Innovación y Tecnología del Instituto Colombiano del Petróleo, en el laboratorio de Optimización de Producción y Recobro Mejorado, área experimental de Química de Producción. En la Figura 1 se representan de manera general las diferentes etapas de proyecto.

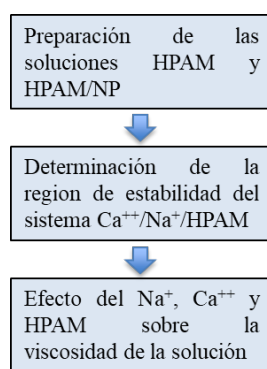


Figura 1. Diagrama general de las etapas experimentales del proyecto

3.1 Materiales

Para el presente estudio se utilizó un polímero comercial de poliacrilamida parcialmente hidrolizada de bajo peso molecular, utilizado en proyectos piloto de inyección de polímeros en un campo colombiano. Se realizó su caracterización con base en las metodologías existentes en los procedimientos del Instituto Colombiano del Petróleo. Los resultados de la caracterización se encuentran en la Tabla 1. Las sales utilizadas fueron NaCl y CaCl₂ dihidratada de la marca Merck.

Tabla 1. Caracterización de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada

Polímero	Hidrólisis [%]	Humedad [%]	Peso Molecular [MDa]
HPAM	29	10.2	4-6

3.2 Composición de las aguas de producción

El agua de formación presente en los yacimientos de petróleo contiene diferentes sales disueltas como producto del agua original in situ o la migración de cuerpos de agua en los periodos geológicos. Entre los elementos más comunes que se encuentran disueltos están el sodio y el calcio. Estos se encuentran en diferentes composiciones y valores relativos dependiendo del origen del agua y de los procesos que han acontecido en las diferentes etapas del desarrollo del yacimiento. Las aguas que con mayor frecuencia se encuentran en los yacimientos son de alta salinidad, producto del origen marino de los fluidos; pero también se encuentran yacimientos de aguas carbonatadas o diluidas que provienen de ambientes no marinos, o que son producto de la dilución con cuerpos de agua subterránea de carácter dulce [8].

La composición de las aguas de formación es clave para el proceso de recobro mejorado, ya que la salinidad, y específicamente algunos iones en solución, pueden afectar su eficiencia [9, 10]. Asimismo, en el caso de las aguas de producción, estas poseen cantidades variables de iones en solución que pueden afectar

el desempeño de las soluciones de polímero usadas como fluidos de desplazamiento en tecnologías de recobro terciario.

En las aguas de producción en Colombia, las cantidades de iones en solución varían de acuerdo a los diferentes ambientes donde se generaron dichos yacimientos, pero también se ven fuertemente influenciados por las diluciones que ocurren cuando en el yacimiento existen procesos de recuperación secundaria con agua, así como por acuíferos activos.

En la Figura 2 se puede apreciar la distribución de las concentraciones de sodio y calcio en aguas de producción de diferentes campos en Colombia donde existen actualmente proyectos de recuperación mejorada con agua o agua mejorada en diferentes etapas del proceso de apropiación de tecnología. Los datos se pueden agrupar en dos conjuntos. El primero (azul) tiene asociado un bajo contenido de calcio y el segundo (rojo) una concentración elevada. Se puede observar que en los rangos comprendidos entre 4000-14000 ppm de sodio y 1000-3500 ppm de calcio, no se encontraron muestras representativas, sin embargo, se debe tener en cuenta que en algunos casos se requieren mezclas entre el agua de producción y agua fresca por cuestiones de volumen, lo cual puede correr los puntos de mayor salinidad hacia puntos intermedios. Asimismo, los perfiles de salinidad en algunos campos con influencia de acuíferos o de inyección de agua, pueden abarcar todo el rango de concentraciones tanto de sodio como de calcio en los límites descritos.

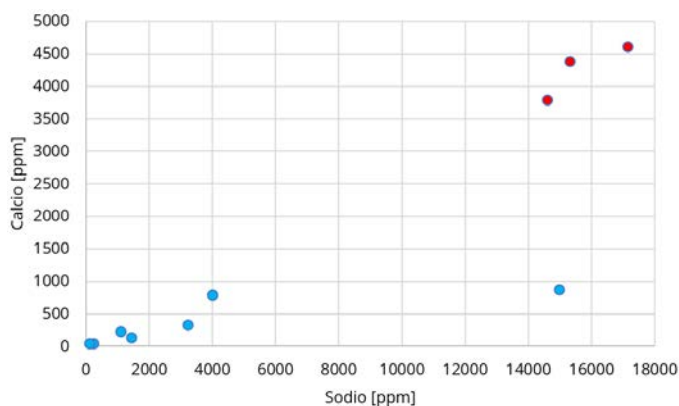


Figura 2. Distribución de sodio y calcio en aguas de producción de campos de Colombia

3.3 Soluciones de polímero

La preparación de las soluciones de polímero se realizó con base en la práctica recomendada número 63 del Instituto Americano del Petróleo. El documento sugiere que inicialmente se prepare una solución de 5000 ppm de concentración de polímero y posteriormente se realice la dilución a la concentración deseada. Debido a que las concentraciones finales del polímero tienen valores del mismo orden de magnitud, se prepararon directamente sin partir de una solución madre a 1500 ppm considerando que esta concentración ha sido utilizada en aplicaciones de campo y estudios previos [11].

Para la preparación de las soluciones de polímero se consideraron dos escenarios: el primero de ellos es la utilización de aguas de producción como fluido base de preparación. Este escenario es muy importante debido a la necesidad que tiene actualmente la industria petrolera, y en particular Ecopetrol SA en su gestión integral de agua, de reutilizar las aguas de producción para mitigar el impacto medio ambiental generado por vertimientos en cuerpos de agua superficial, así como la captación de agua fresca tanto superficial como subterránea [12]. El segundo escenario, contempla la preparación de las soluciones de polímero en agua fresca y el posterior contacto con las sales disueltas en el agua de formación.

3.4 Salmuera como fluido de preparación

Se consideró como fluido base de preparación las salmueras constituidas por cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de calcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en concentraciones definidas por cada diseño experimental. Las concentraciones de los solutos y solventes se tomaron en ppm (mg/Kg de sln) para una solución total en

todos los casos, de 400 g: Se pesó la cantidad requerida de agua destilada, las sales de cloruro de sodio y de calcio, así como el polímero. Se agregó el cloruro de sodio y calcio al agua destilada, mientras se agitó vigorosamente el sistema a 360 RPM con el fin de generar un vórtice aproximadamente del 75% de la altura total de la solución. Se esperó 5 minutos para asegurar la completa solubilidad de las sales e inmediatamente después, se agregó el polímero según indica la practica recomendada API RP63, en la parte alta del vórtice generado, de manera constante y en un tiempo no mayor a 30 s. Luego de agregar el polímero, se ajustó la velocidad de agitación a 80 RPM y se mantuvo la agitación por 24h.

3.5 Agua destilada como fluido de preparación

Con el uso de agua destilada como fluido de preparación, se quiere considerar un segundo escenario donde, hipotéticamente, la preparación de la solución polimérica se realice con fuentes de agua de muy baja salinidad, como pueden ser aguas subterráneas o superficiales. La preparación a nivel de laboratorio consistió en la adición del polímero al agua destilada, bajo agitación constante a 360 RPM y adicionando sobre la parte superior del vórtice generado, el cual debe tener una altura aproximada de 75% del total de la solución. Terminada la adición, se disminuyó la velocidad de agitación a 80 RPM y se mantuvo constante durante 24h. Transcurrido ese tiempo, se agregaron las sales de manera simultánea y se mantuvo en agitación durante 1 h más.

3.6 Determinación de los rangos de estabilidad de la solución de polímero

La viscosidad de las soluciones de poliácridamida parcialmente hidrolizada varia con la concentración de los iones en solución, la interacción de estos iones modifica la conformación de la molécula de polímero y pueden incluso llegar a precipitarlo [4]. Por lo tanto, antes de cualquier aplicación de la tecnología de inyección de polímeros, es necesario establecer si los ambientes salinos a los que será sometido el fluido, generan su floculación o precipitación. Para el presente estudio se tuvo en cuenta la concentración de iones en las aguas de producción de diferentes campos colombianos. En la Figura 3 se encuentran los rangos experimentales utilizados y los puntos que representan los experimentos realizados. Cada uno de ellos se realizó con los dos tipos de preparación mencionados anteriormente.

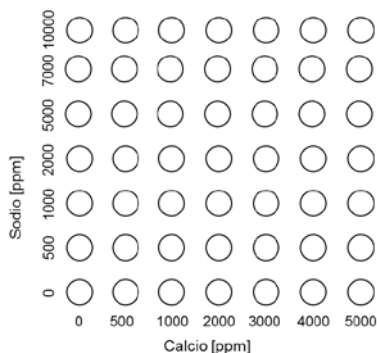


Figura 3. Puntos experimentales para establecer las regiones de estabilidad

Para determinar la estabilidad de las soluciones de polímero se midió la turbidez de las soluciones preparadas y se realizó inspección visual. Teniendo en cuenta que la turbidez es una medida del grado de transparencia que pierde un líquido debido a la presencia de partículas sólidas en suspensión, es posible asociar esta propiedad a la solubilidad del polímero en solución, así, a medida que el polímero fue perdiendo solubilidad y se generaron los primeros sólidos, la solución aumentó su turbidez. La inspección visual permitió adicionalmente establecer la presencia de sólidos decantados y confirmar los escenarios críticos de precipitación. Con estos datos se generaron mapas tridimensionales de turbidez que, correlacionados con registros fotográficos, permitieron establecer las zonas de estabilidad de la solución.

3.7 Efecto del sodio, el calcio y el polímero sobre la viscosidad de la solución

Con el objetivo de establecer el efecto de las sales en solución y el polímero sobre la viscosidad de las soluciones, se realizó un diseño experimental $2k+1$, de tres variables y dos niveles con un punto central. Los

niveles de polímero se escogieron con base en concentraciones típicas evaluadas en proyectos piloto, y referencias de evaluaciones anteriores sobre soluciones poliméricas en campos colombianos [13, 14]. Los niveles de calcio y sodio se establecieron teniendo en cuenta que en cada nivel la fuerza iónica con respecto al calcio y al sodio fueran iguales, de tal modo que la diferencia en el efecto generado sobre la viscosidad de la solución no esté influenciada por su fuerza iónica. Se consideró también la estabilidad de las soluciones en los diferentes niveles evaluados. El nivel inferior seleccionado respecto al calcio fue 100 ppm, y su fuerza iónica se calculó con base en la ecuación (1). Como esta fuerza iónica debe ser la misma del cloruro de sodio, a partir de esta fuerza iónica se calculó la concentración de cloruro de sodio equivalente. Los valores obtenidos para cada uno de los niveles se pueden observar en la Tabla 2.

$$I = \frac{1}{2} \sum_i C_i Z_i^2 \quad (1)$$

Donde:

C_i: concentración molar de los iones en solución

Z_i: carga de cada ión

Tabla 2. Cálculo de las concentraciones de sodio y calcio en el diseño de experimental

Nivel	Ca ⁺⁺ [ppm]	CaCl ₂ [ppm]	$I = \frac{1}{2} \sum_i C_i Z_i^2$	NaCl [ppm]	Na ⁺ [ppm]
Bajo (-)	100	277	0.0075	438	172
Intermedio (0)	300	831	0.0225	1313	516
Alto (+)	500	1387	0.0374	2188	861

El nivel máximo seleccionado fue 500 ppm teniendo en cuenta que es un valor cercano a la máxima cantidad de calcio que puede estar en solución sin la presencia de sodio sin afectar la estabilidad del polímero. En la Tabla 3 se encuentra el diseño experimental elaborado para el análisis del efecto de la concentración de las sales y el polímero sobre la viscosidad de la solución. Los ensayos se realizaron por duplicado.

Tabla 3. Diseño experimental para determinar el efecto de las sales y el polímero en la viscosidad de la solución

Corrida	Ca	Na	HPAM
1	-	+	-
2	-	-	-
3	-	+	+
4	+	-	+
5	0	0	0
6	+	+	-
7	-	-	+
8	+	+	+
9	+	-	-

A partir de los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico a través del análisis de varianza ANOVA, el diagrama estandarizado de Pareto, diagramas de efectos principales y de interacción.

4. RESULTADOS

4.1 Estabilidad de la solución de polímero

En la Figura 4 se encuentra el diagrama de compatibilidad de la solución de polímero utilizando salmuera y agua destilada como fluido de preparación, allí se encuentran algunos de los puntos experimentales, y que fueron utilizados para establecer los límites de las regiones de estabilidad.

En la Figura 5 se puede observar la distribución de turbidez en un gráfico 3D, donde se puede notar como la turbidez del sistema va aumentando en la dirección de alta concentración de calcio y baja concentración de sodio.

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestran los gráficos de turbidez de las soluciones de polímero en función de la concentración de sodio y calcio utilizando agua destilada como fluido de preparación. La

turbidez en este caso sirve como una medida indirecta de la solubilidad de la poliacrilamida ya que, a medida que el polímero va perdiendo solubilidad y se van generando los primeros flóculos, la turbidez aumenta hasta que se alcanza la precipitación. A medida que aumenta la concentración de calcio y disminuye el sodio, la solución aumenta su turbidez, debido a la disminución de la solubilidad del polímero.

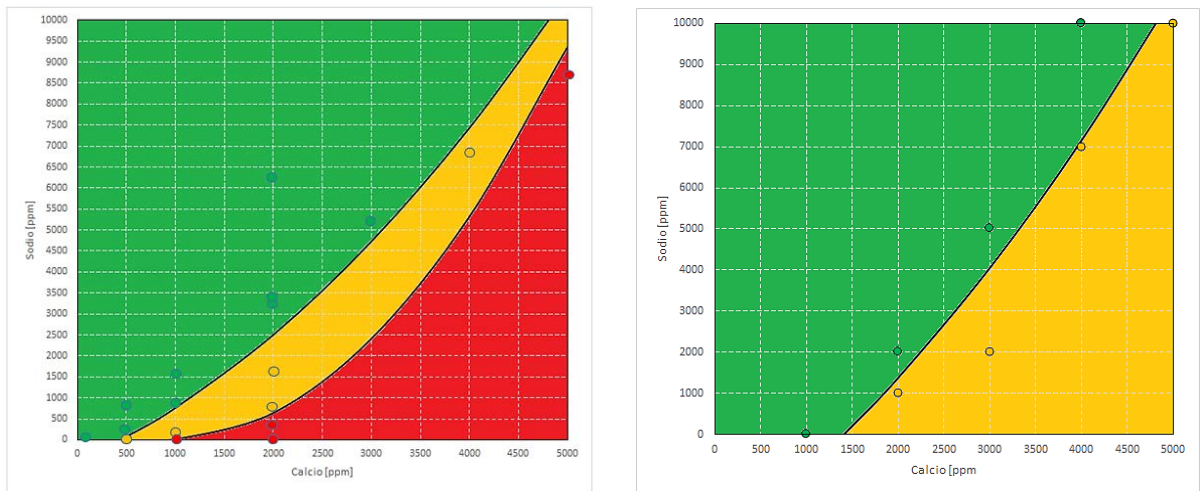


Figura 4. Zonas de compatibilidad con salmuera como fluido de preparación: Solubilidad total (verde), zona turbia (amarillo), zona de precipitación (rojo)

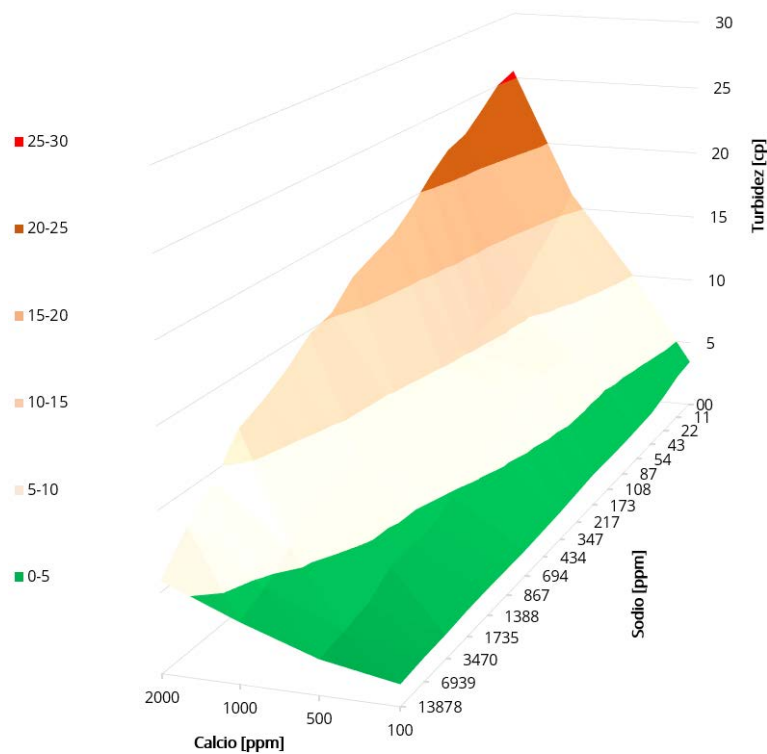


Figura 5. Turbidez de las soluciones de polímero en función de la concentración de sodio y calcio utilizando salmuera como fluido de preparación

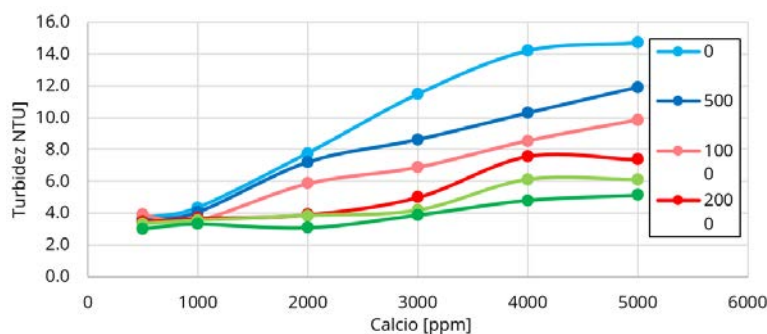


Figura 6. Variación de la turbidez en función del calcio en solución

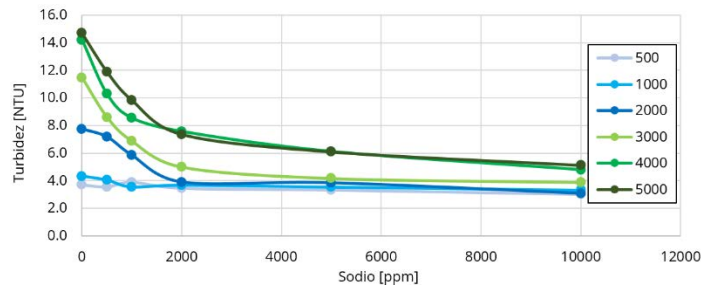


Figura 7. Variación de la turbidez en función del sodio en solución

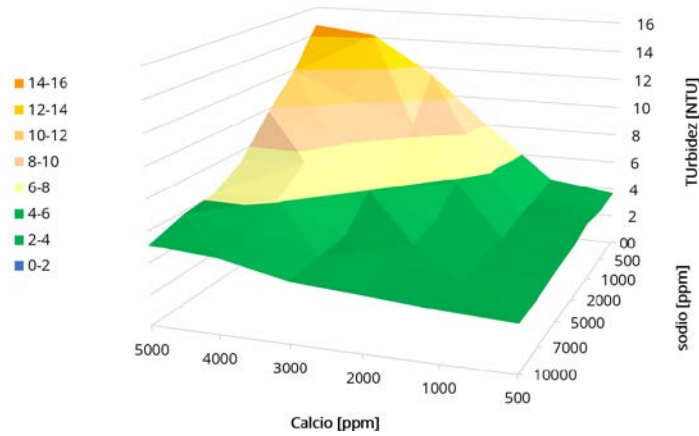


Figura 8. Turbidez de las soluciones de polímero en función de la concentración de sodio y calcio utilizando agua destilada como fluido de preparación

4.2 Viscosidad de la solución de polímero

En la Figura 9 se encuentra un gráfico de viscosidad en función de los iones de sodio y calcio en solución, obtenido a partir de mediciones a 7.3 s^{-1} y geometría de cilindros concéntricos. Para ello se consideraron las soluciones del diseño experimental planteado.

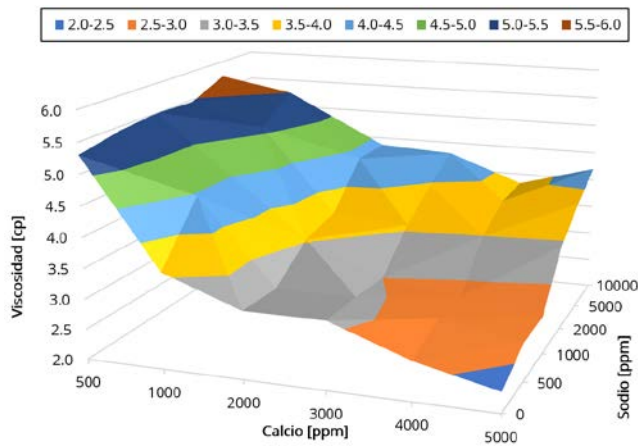


Figura 9. Mapa de viscosidad

En la Figura 10 se puede apreciar el diagrama de Pareto, el cual permite establecer la significancia de las variables evaluadas sobre la respuesta de viscosidad.

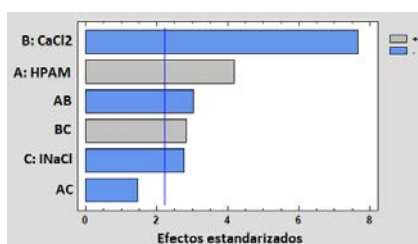


Figura 10. Diagrama estandarizado de Pareto para la viscosidad

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto a la estabilidad del polímero se pueden observar tres zonas fácilmente identificables y diferenciadas. La primera corresponde a la zona denominada de estabilidad, en la cual la solución de polímero es completamente soluble y su turbidez es baja (<5 NTU), este valor de turbidez corresponde a uno de los criterios de calidad para inyección de fluidos [15]. La segunda región corresponde a la zona alta turbidez, donde la solución de polímero comienza a tomar un aspecto opaco y su turbidez supera el límite establecido como criterio de calidad. Esta zona se caracteriza por la formación de los primeros flóculos de polímero debido a su interacción con el calcio y la turbidez comienza a aumentar de manera significativa. La tercera zona corresponde a la región de precipitación del polímero, donde se observan los primeros sólidos decantados; se caracteriza además por tener alta turbidez.

Cuando la concentración de calcio es menor a 500 ppm, el polímero es soluble sin importar la cantidad de NaCl en solución. En el rango entre 500 ppm y 1000 ppm de calcio, se genera la zona de alta turbidez cuando en la solución hay una baja cantidad de sodio. Es posible que esto se deba a un proceso similar al de la solvatación. Cuando el polímero se encuentra en solución con una determinada cantidad de calcio, se generarán interacciones electrostáticas entre el calcio y los grupos carboxílicos. Sin embargo, si ingresa sodio al sistema, éste también interaccionará con los grupos carboxílicos, reduciendo el efecto del calcio; por esto, a medida que aumenta la concentración de sodio en la solución, el polímero se hace más soluble y disminuye notoriamente la turbidez de la solución. Cuando la concentración de calcio es superior a los 1000 ppm, el polímero se vuelve insoluble, sin embargo, la presencia de sodio en solución puede generar una redisolución del polímero [6].

A concentración de 5000 ppm de calcio, el polímero precipita, formando un sólido blanco que se decanta en el fondo del recipiente y por lo tanto se este punto se ubica en la zona de incompatibilidad o de precipitación. La solución de 4000 ppm de calcio (centro), que contiene 6800 ppm de sodio se encuentra en la zona de alta turbidez, donde el polímero comienza a saturar la solución y formar los primeros flóculos que permanecen en suspensión. Finalmente, la solución que contiene 3000 ppm de calcio y 5200 ppm de sodio, que se puede observar a la derecha, fue perfectamente soluble, con una turbidez muy baja y prácticamente translúcida. La turbidez en esta región se encuentra alrededor de 3-4 NTU. Se puede notar como la turbidez del sistema va aumentando en la dirección de alta concentración de calcio y baja concentración de sodio.

Por otro lado, cuando se utiliza agua destilada como fluido de preparación, los diagramas sufren un cambio notorio, solamente se presentan dos fases, una de solubilidad completa donde la solución es translúcida y otra donde la solución toma un aspecto opaco debido al aumento en la turbidez. En este caso no se observaron sólidos decantados en el fondo de los recipientes. Es posible que a concentraciones superiores a los 5000 ppm de calcio existan regiones insolubles, sin embargo, no hacen parte del interés del presente estudio.

Es evidente que existe una diferencia en la utilización de salmuera o agua destilada como fluido de preparación y consiste en una menor estabilidad de la solución con el uso de la salmuera. Esto se debe a las interacciones electrostáticas entre las sales en solución y el polímero. Cuando se utiliza agua destilada como fluido de preparación, las moléculas de poliacrilamida interaccionan entre sí debido a la repulsión de los grupos carboxílicos generando un estiramiento y un mayor radio hidrodinámico, lo que genera un mayor impedimento en la movilidad de las moléculas, lo que se traduce a su vez en un incremento de la viscosidad [4]. Como esta red molecular está formada previamente al ingreso de las sales en la solución, la cantidad de interacciones efectivas entre la molécula de polímero y la sal son menores a las que se generarían si previamente el medio acuoso contiene las sales en solución y aun no se ha formado la red molecular del polímero. Por lo tanto, al haber menos interacciones, el polímero puede mantenerse en solución.

La turbidez sirve como una medida indirecta de la solubilidad de la poliacrilamida ya que, a medida que el polímero va perdiendo solubilidad y se van generando los primeros flóculos, la turbidez aumenta hasta que se alcanza la precipitación. A medida que aumenta la concentración de calcio y disminuye el sodio, la solución aumenta su turbidez, debido a la disminución de la solubilidad del polímero. En ausencia de sodio

y a una concentración definida de calcio, la turbidez de la solución adquiere la máxima turbidez. A bajas concentraciones de sodio, menores a 2000 ppm, la turbidez sufre una disminución notoria con el incremento del sodio.

Luego de los 2000 ppm, las variaciones en la turbidez son bajas y se hace casi constante. Si ahora se tiene en cuenta la variación de la turbidez en función de la concentración de calcio, con la concentración de sodio como parámetro, se puede notar que, a valores menores a 1000 ppm de calcio, la turbidez no varía significativamente, mientras que, a valores superiores, la turbidez aumenta con la concentración de calcio en solución.

Por lo general, el estudio del efecto de los iones en solución sobre las soluciones de poliacrilamida se realiza de manera individual, estudiando cada efecto combinado con otras variables tales como la hidrólisis, la temperatura o el pH. Sin embargo, no suele realizarse un estudio estadístico que muestre el peso de cada variable sobre la viscosidad de la solución de polímero. Los resultados de viscosidad permiten inferir que de manera general existe una disminución de la viscosidad con la concentración de calcio en todo el rango de concentraciones evaluado, tanto de sodio como de calcio. Sin embargo, es posible ver que el efecto de la concentración de sodio depende de la cantidad de calcio en solución.

Para establecer el efecto del sodio y el calcio, así como la concentración de polímero, en la viscosidad de la solución, se realizó un diseño experimental 2^{k+1} con la fuerza iónica de sodio y calcio, además de la concentración de polímero como variables independientes y la viscosidad como variable respuesta. Los resultados obtenidos al realizar este experimento se encuentran en la Tabla 4. Los símbolos (-), (+) y (0) hacen referencia a los niveles alto, bajo e intermedio del diseño experimental. El experimento fue realizado por duplicado y se calcularon el promedio y la desviación estándar de la medición.

Tabla 4. Experimento de viscosidad de la solución de polímero diseño 2^{3+1}

Estándar	Corrida	HPAM	I _{CaCl2}	I _{NaCl}	Viscosidad [cp]		\bar{y}	s^2
1	2	-	-	+	14.47	14.27	14.37	0.14
2	1	-	-	-	21.23	21.67	21.45	0.31
3	6	+	-	+	25.70	25.83	27.77	0.09
4	7	+	+	-	8.17	8.83	8.50	0.47
5	9	0	0	0	28.00	28.93	28.47	0.66
6	4	-	+	+	5.77	5.47	5.62	0.21
7	5	+	-	-	48.17	48.70	48.44	0.38
8	8	+	+	+	8.60	8.90	8.75	0.21
9	3	-	+	-	5.40	5.70	5.55	0.21

El experimento realizado se llevó a cabo tomando en cuenta la fuerza iónica de las sales de sodio y de calcio y no su concentración, con el objetivo de igualar su fuerza eléctrica respecto a la molécula de poliacrilamida y ver realmente el efecto del ion.

En la Tabla 5 se encuentra el análisis de variabilidad en viscosidad en piezas separadas para cada uno de los efectos, donde se prueba la significancia estadística para cada uno de los efectos comparados con la media cuadrática y partiendo de la hipótesis inicial que indica que las varianzas de los diferentes efectos son iguales.

Tabla 5. Análisis estadístico ANOVA de los parámetros HPAM, CaCl₂ y NaCl

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	F-factor	P-Valor
A: HPAM	492,84	1	492,84	17,38	0,0019
B: I _{CaCl2}	1664,64	1	1664,64	58,71	0,0000
C: I _{NaCl}	216,09	1	216,09	7,62	0,0201
AB	260,822	1	260,822	9,20	0,0126
AC	60,0625	1	60,0625	2,12	0,1762
BC	226,503	1	226,503	7,99	0,0180
Bloque	0,405	1	0,405	0,01	0,9072
Error total	283,523	10	28,3523		
Total (corr.)	3204,89	17			

Se puede apreciar claramente que hay 5 efectos que tienen valores P menores a 0.05, lo que indica que tienen diferencias significativas al 95% del nivel de confianza. Estos efectos son el calcio como cloruro de calcio, la poliacrilamida, el sodio y los efectos combinados de poliacrilamida-calcio y calcio-sodio.

Al analizar el diagrama de efectos estandarizados de Pareto, se puede ver que el efecto principal sobre la viscosidad de la solución lo posee el calcio, que aparece en su forma de sal de cloruro como un efecto negativo sobre la viscosidad. El segundo efecto se atribuye al polímero que, al contrario del calcio, presenta una afectación positiva a la viscosidad de la solución. El tercer efecto corresponde a la interacción calcio polímero, la cual es negativa.

El cuarto y quinto efecto corresponden a la interacción calcio-sodio y sodio solo, respectivamente. En el primer caso el efecto es positivo debido al aumento en viscosidad que se presenta en algunos niveles de calcio con la presencia del sodio. En el segundo caso el efecto es negativo debido al apantallamiento que genera el sodio sobre los grupos carboxílicos cuando se encuentra solo en solución con el polímero.

6. CONCLUSIONES

Los polímeros de HPAM en presencia de NaCl y CaCl₂ presentan una tendencia a la precipitación a medida que la concentración de calcio aumenta en el medio; sin embargo, la presencia de NaCl en solución genera un aumento en la solubilidad del polímero generando un comportamiento de fases con zonas de solubilidad e incompatibilidad.

La solubilidad del polímero HPAM depende en gran medida de la cantidad de cloruro de calcio en solución, obteniéndose un límite de saturación de 500 ppm de Ca sin la presencia de NaCl.

La variación de la viscosidad en soluciones poliméricas de HPAM en presencia de NaCl y CaCl₂, se ve fuertemente influenciada por la concentración de cloruro de calcio. El cloruro de sodio presenta un efecto menor, sobre todo cuando la concentración de calcio supera los 500 ppm.

REFERENCIAS

- [1] R. S. Seright, T. Fan, K. Wavrik, and R. De Carvalho Balaban, "New insights into polymer rheology in porous media," *SPEJ.*, vol. 16, no. 1, pp. 35-42, 2011.
- [2] S. H. Park, S. T. Lim, T. K. Shin, H. J. Choi, and M. S. Jhon, "Viscoelasticity of biodegradable polymer blends of poly(3-hydroxybutyrate) and poly(ethylene oxide)," *Polymer (Guildf.)*, vol. 42, no. 13, pp. 5737-5742, 2001.
- [3] M. J. Ballard, R. Buscall, and F. A. Waite, "The theory of shear-thickening polymer solutions," *Polymer (Guildf.)*, vol. 29, no. 7, pp. 1287-1293, 1988.
- [4] J. J. Sheng, *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery Theory and Practice*. 2011.
- [5] G. Muller, J. P. Laine, J. C. Fenyo, and L. De Chimie, "High-Molecular-Weight Hydrolyzed Polyacrylamides. I. Characterization. Effect of Salts on the Conformational Properties," *J. Polym. Sci.*, vol. 17, pp. 659-672, 1979.
- [6] A. Zaitoun and B. Potie, "Limiting Conditions for the Use of Hydrolyzed Polyacrylamides in Brines Containing Divalent Ions," *Int. Symp. Oilf. Geotherm. Chem. held Denver, USA*, pp. 143-148, 1983, doi: 10.2118/11785-MS.
- [7] Y. Wang *et al.*, "Stability and rheological properties of HPAM/nanosilica suspensions: Impact of salinity," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 587, no. September 2019, p. 124320, 2020.
- [8] A. G. Collins, *Geochemistry of oilfield waters*, vol. \$40. 1975.
- [9] Z. AlYousef, S. Ayirala, M. Almubarak, and D. Cha, "The impact of tailored water chemistry aqueous ions on foam stability and mobility control," *Soc. Pet. Eng. - Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. 2020, ADIP 2020*, 2020.
- [10] E. Norrud Pollen and C. Fredrik Berg, "Experimental investigation of osmosis as a mechanism for low-salinity EOR," *Soc. Pet. Eng. - Abu Dhabi Int. Pet. Exhib. Conf. 2018, ADIPEC 2018*, 2019.
- [11] D. B. Levitt and G. a Pope, "Selection and Screening of Polymers for Enhanced-Oil Recovery," *Soc. Pet. Eng.*, no. April, p. pp.1-18. SPE-113845, 2008.
- [12] Ecopetrol, "Reporte integrado de gestión sostenible 2020," Bogotá, p. 629, 2020.
- [13] M. P. Espinosa, "Evaluación del efecto de salinidad en soluciones de poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas a través de pruebas de laboratorio y técnicas analíticas," Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [14] J. J. Herrera, "Evaluación del efecto de las propiedades viscoelásticas de soluciones poliméricas en el incremento del recobro de crudo pesado de un campo colombiano," Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [15] A. G. Ostroff, *Introduction to Oilfield Water Technology*. Prentice-Hall, 1965.

Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido en pastas de cemento portland con adición de mucílago de cacao *Theobroma cacao L* como aditivo orgánico

Brayan León García-Suárez¹
Mónica Andrea Bedoya-Gutiérrez²
Oscar Aurelio Mendoza-Reales³
Jorge Iván Tobón⁴

^{1,4} *Universidad Nacional de Colombia*

² *Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia*
Colombia

³ *Universidade Federal do Rio de Janeiro*
Brasil

Los aditivos químicos se aplican con frecuencia en la industria de la construcción con el propósito de mejorar propiedades en el concreto. Estos productos se añaden en el momento del amasado o inmediatamente después, con el objetivo de modificar las propiedades y las características de la mezcla en estado fresco o endurecido; además, son sustancias de origen sintético y su consecución y fabricación es contaminante. Sin embargo, en diversos estudios se afirma que, algunos jugos y extractos de plantas y residuos de origen orgánico o sintético, con contenido de compuestos derivados de azúcares, son una ruta alternativa como aditivos dispersantes de cemento, debido que son residuos abundantes con bajos costos de obtención. El mucílago de cacao MC es un subproducto proveniente de la industria del cacao. Por tonelada se producen 150 litros de MC que se vierten inadecuadamente, generando contaminación de fuentes fluviales, suelos y cultivos. Esta investigación está enfocada en analizar la incidencia del MC *Theobroma cacao L* como aditivo orgánico. Inicialmente, se pasteurizó el residuo con el objetivo de eliminar el microorganismo más termoestable y conservar el líquido a una temperatura controlada, para posteriormente evaluar la consistencia normal y tiempos de fraguado en pastas, fluidez y densidad plástica en morteros. La adición de MC se realiza con respecto al peso del cemento en porcentajes de 0%, 0.5%, 2.0%, 5.0% y 10%, adicionalmente, se realiza la prueba de Índice de Espuma con el objetivo de analizar la estabilidad de burbujas en el tiempo. Los resultados iniciales de caracterización indican que, tras un mes de almacenamiento, el MC pasteurizado presenta un pH ácido y consistente. La adición de MC en morteros aumenta la fluidez y la densidad plástica. Con respecto a los tiempos de fraguado, en bajos porcentajes (0.5 - 2.0%) el MC retarda el endurecimiento, mientras que en mayor porcentaje (5.0% - 10.0%) acelera tanto los tiempos iniciales como finales del fraguado; además, se identifica que el MC no genera incorporación de aire. Hasta el momento es posible concluir que el MC pasteurizado modifica las propiedades en estado plástico de pastas y morteros debido a su contenido de azúcares (13,7 °Brix a temperatura ambiente). El MC en porcentajes de 0.5% - 2.0% presenta características de un aditivo plastificante o retardante de fraguado y en porcentajes de 5.0% - 10.0% muestra características de un aditivo plastificante o acelerador de fraguado.

¹ Contacto: bgarciasu@unal.edu.co

² Contacto: monica.bedoya@colmayor.edu.com

³ Contacto: oscar@coc.ufrj.br

⁴ Contacto: jitobon@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los aditivos químicos se aplican con frecuencia en la industria de la construcción con el propósito de mejorar propiedades en el concreto. Uno de los aditivos más utilizados son los retardantes los cuales se aplican para aumentar el tiempo de trabajabilidad del concreto. Esta tipología de aditivos se divide en dos categorías: compuestos inorgánicos los cuales incluyen sales, fosfatos, óxidos y sulfatos y los compuestos orgánicos incluyen azúcares, polisacáridos, gluconato de sodio, lignosulfonatos, ácidos policarboxílicos, entre otros [1].

Relacionando lo anterior, Cheung et al. [2] plantean que la mayor parte del concreto fabricado en países desarrollados también utiliza al menos un agente dispersante de cemento, comúnmente llamado aditivo reductor de agua o plastificante, además, las composiciones de aditivos reductores de agua también pueden incluir materiales que impactan directamente en las tasas de hidratación más allá de los efectos de dispersión. Tales aditivos contienen frecuentemente alguna combinación de componentes retardantes y acelerantes del fraguado. Esto se debe a que muchos materiales dispersantes, que cumplen con las restricciones económicas requeridas, también retrasan un poco la hidratación.

Adicionalmente, Vásquez et al. [3] caracterizan la generación de grandes cantidades de residuos orgánicos, como son los de naturaleza lignocelulósica, debido a que, en algunos casos, estos desechos tienen una disposición inadecuada ya que contaminan el suelo, vías fluviales y, además, es una amenaza para los cultivos por alto riesgo de infestación por plagas.

El mucílago de cacao tiene una composición de azúcares tal y como lo mencionan Vásquez et al. [3], además, destacan las posibilidades que se deben de desarrollar en cuanto a innovación, procesos de transformación y recuperación este tipo de subproductos.

De acuerdo con lo anterior, autores como Khazma et al. [4] han enfocado sus estudios en adición de sacarosa en matrices cementantes, caracterizando alteraciones en cuanto al desarrollo de productos como ettringita, retraso en hidratación del C_3S como producto principal del Clinker y componente principal del cemento Portland, el cual es el responsable de la resistencia a corto plazo en compuesto a base de este conglomerante.

Relacionando lo anterior, este estudio preliminar tiene como propósito caracterizar la influencia del mucílago de cacao *Theobroma cacao L* como aditivo orgánico en las propiedades en estado fresco y endurecido en pastas (Consistencia normal del cemento y tiempos de fraguado) y en morteros (Fluidez y densidad) de cemento Portland.

2. MÉTODO

2.1 Procedimiento implementado para la pasteurización

Con relación a lo reportado por Bedrán y Becerra [5] se caracteriza que el mucílago es un producto orgánico de origen vegetal, de peso molecular elevado y estructura molecular completa desconocida, el cual está compuesto por polisacáridos celulósicos.

En este trabajo se establece un procedimiento de pasteurización el cual tiene como objetivo, eliminar los patógenos en los alimentos con el objetivo de alargar su vida útil. Por lo cual se construye el método (Figura 1) en el cual se siguen las recomendaciones descritas en las investigaciones [5-7], los cuales han desarrollado pasteurizaciones en variedades de mucílago de cacao; adicionalmente, en la Figura 2 se caracteriza el proceso cronológico de la etapa de pasteurización y se describen los hallazgos vistos.

Adicionalmente, se realiza la medición del pH por medio de Phmetro portátil pH 3310 (Figura 3). Las mediciones se realizan 4 días posteriores al almacenamiento y se obtiene los datos de 3.316 y 3.422 (pH ácido). Resultados son consistentes a lecturas realizadas después de un mes de almacenamiento. Los resultados son coherentes con los datos de los autores citados.

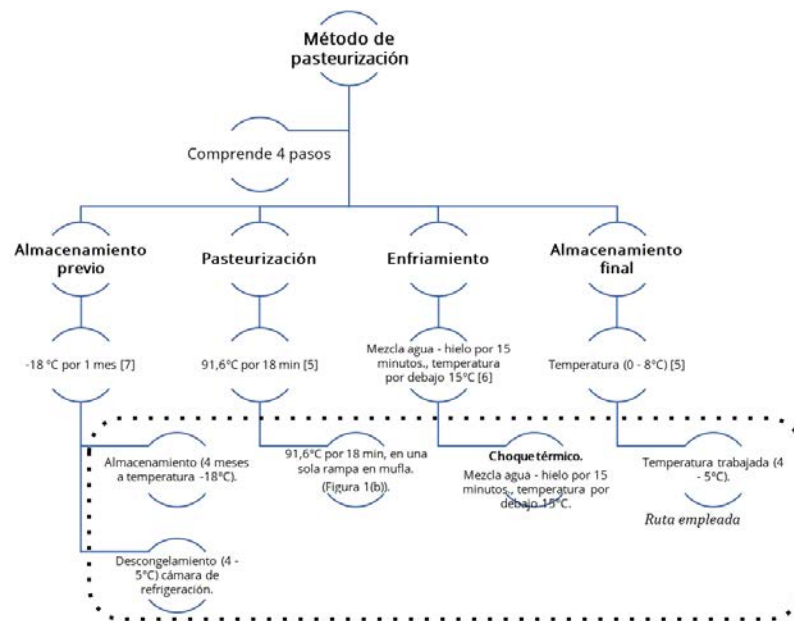


Figura 1. Método de pasteurización consolidado



CM sin pasteurizar



CM pasteurizado y almacenado



Medición de pH de CM pasteurizado. Valores: 3.316 - 3.422

Hallazgos: Se evidencia presencia de burbujas en la parte superior del CM pasteurizado, además, el pH encontrado es coherente con los investigadores: pH ácido y consistente en el tiempo.



CM 11 días de pasteurización



CM muestra extraída cámara refrigeración



CM disuelto en agua de amasado



Hallazgos: Visualmente a los 11 días de pasteurizado, el CM presenta un color uniforme. La temperatura empleada para la pasteurización es de 91.6° con el fin de destruir el organismo más termoestable, y así, conservar las características o componentes del mucílago en el tiempo. Cuando se extrae la dosificación determinada de CM, se observa alta presencia de flóculos, los cuales pueden afectar los resultados de los ensayos, sin embargo, se procura realizar una homogeneización del agua de amasado y del CM con el objetivo de lograr un líquido estable, en donde se lleva a punto esta mezcla, realizando una disolución y agitación entre 5 y 10 segundos.



Generación de sustancia no identificada en una de las muestras de CM pasteurizadas



Separación líquido pasteurizado y hongo generado por posible contaminación en el laboratorio

Hallazgos: En el proceso de pasteurizado del CM, el líquido es almacenado en dos recipientes de capacidad de 400 mL identificados como A y B. El CM A no presentó alteración perceptible en el mes que estuvo almacenado en la cámara de refrigeración y con este, se realizaron los ensayos de Tiempos de fraguado, Fluidéz y densidad. Se identifica que el hongo ocasionado por posible contaminación en laboratorio, ocupa aproximadamente el 10% de la capacidad del recipiente. El CM B no fue utilizado para las pruebas preliminares de la propuesta y fue descartado.

Figura 2. Proceso de pasteurización y hallazgos



Figura 3. Medición pH de CM pasteurizado

2.2 Materiales

Para las pastas y morteros preparados para la determinación de la consistencia y tiempos de fraguado, fluidez y densidad respectivamente, se usaron los materiales de la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales usados para ensayos.

Materiales	Características
Aditivo orgánico: Mucilago de cacao	Se recolecta en el municipio de Don Matías a una altitud de 2200 m.s.n.m de un cultivo de cacao nativo de Antioquia (Figura 1(a)), se realiza el proceso de separación de los granos y la pulpa, con el propósito de obtener el mucílago.
Conglomerante	El cemento usado es Cemento Uso General (UG).
Agregados finos	Arena de sílice.

3. RESULTADOS

3.2 Consistencia normal del cemento y Tiempos de fraguado

3.2.1 Consistencia normal del cemento

Se determina que la relación agua/cemento (a/c) adecuada para alcanzar la consistencia normal es de 0.29 con una penetración de 10 ± 1 mm (ASTM C187:2016). Para el procedimiento de mezclas mecánicas de pastas de cemento se siguieron las recomendaciones planteadas en la norma ASTM C305:2014, el conglomerante implementado es Cemento Uso General (UG). Adicionalmente, se trabaja con un diseño experimental preliminar de tipo exponencial (0.0%, 0.5%, 2.0%, 5.0%, 10.0%). La adición de CM se realiza con respecto al peso del OPC. Los datos de consistencia normal del cemento y sólidos totales del CM se muestran en la Tabla 2 y la Figura 4.

Tabla 2. Proporciones (% por peso) para consistencia estándar

Mezcla	OPC	Agua	Aditivo CM	Sólidos totales
Blanco	340	98.9	0.0	0.0
0.5%	340	98.3	1.7	0.3
2.0%	340	97.4	6.8	1.2
5.0%	340	95.5	17.0	3.1
10.0%	340	92,4	34.0	6.2

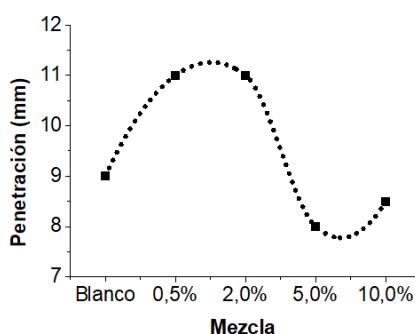


Figura 4. Curva consistencia normal del cemento

3.2.2 Tiempos de fraguado

Relacionando los resultados obtenidos en el ensayo se continúa realizando para determinar el fraguado de las pastas de cemento hidráulico siguiendo lo estipulado en la norma ASTM C191. De acuerdo con lo anterior, en la Figura 5 se muestran los tiempos de fraguado.

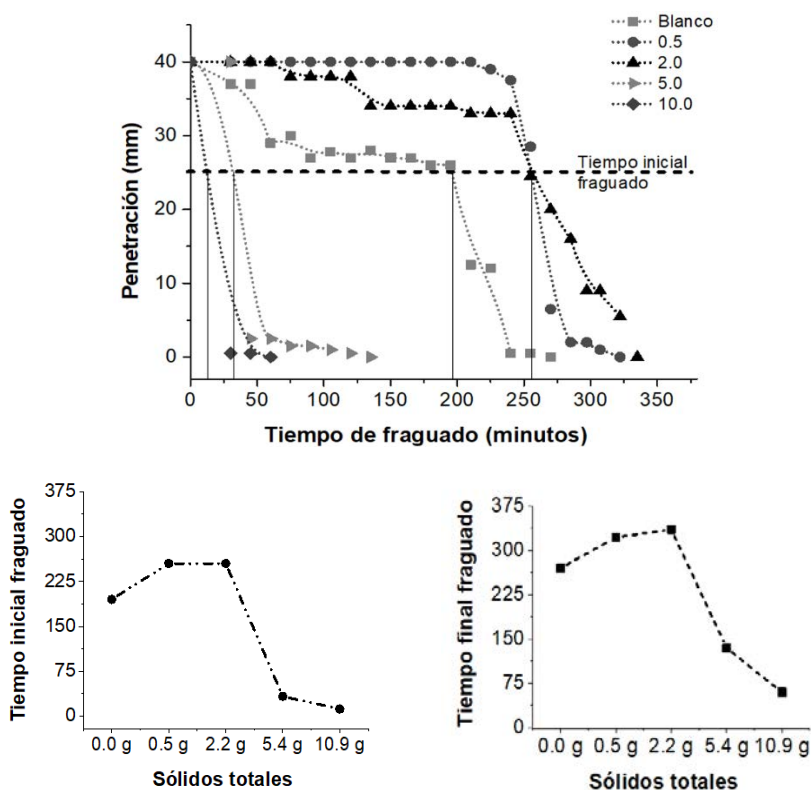


Figura 5. Penetración (mm) vs Tiempos de fraguado (minutos) y contenido de sólidos

3.3 Ensayo de fluidez y densidad plástica en morteros

Se establecen las proporciones (% por peso) para ensayo de fluidez y densidad. La dosificación se realiza de acuerdo con la norma ASTM C109/C109M: 2020b. La dosificación empleada es 1:2,75 y se determina la relación agua/cemento (a/c) de 0.54. El CM es calculado con respecto al peso del OPC, adicionalmente, se determinan la cantidad de sólidos totales. En la Tabla 3 se relacionan las proporciones implementadas en este estudio.

Tabla 3. Proporciones (% por peso) para ensayo de fluidez y densidad

Mezcla	OPC	Arena de Sílice	Agua	Aditivo CM	Sólidos totales
Blanco	600	1650	324.0	0.0	0.0
0.5%	600	1650	323.5	3.0	0.5
2.0%	600	1650	321.8	12.0	2.2
5.0%	600	1650	318.6	30.0	5.4
10.0%	600	1650	313.1	60.0	10.9

Las muestras se prepararon de acuerdo con la norma ASTM C305. El objetivo de los ensayos (fluidez y densidad) es observar que sucede al incrementar el ciclo de amasado y posteriormente, realizar la evaluación de la fluidez. Se consolidan los tiempos implementados de amasado en Tabla 4. En total se realizan 10 mezclas, 2 por cada dosificación.

Tabla 4. Tiempos definidos para ensayo de fluidez y densidad.

Mezcla	Step 1	Step 2	Step 3
Blanco, 0.5%, 2.0%, 5.0% 10.0%	4'30" 15'	Se extraen 350 ml de mortero para ensayo de fluidez	8'00" Se extraen 350 mL de mortero para ensayo de fluidez
Blanco, 0.5%, 2.0%, 5.0% 10.0%	4'30" 15'	para ensayo de fluidez	8'00"

Para realizar el ensayo de fluidez y densidad implementando el CM como aditivo orgánico, se realiza con el propósito de identificar la incidencia en las propiedades en estado plástico en morteros de cementos hidráulicos (Figura 6a) y densidad (Figura 6b). Se siguieron las recomendaciones establecidas en las normas ASTM C230/C230M:2021, ASTM C1437:2015. El ensayo fue llevado a cabo en mesa de flujo eléctrica.

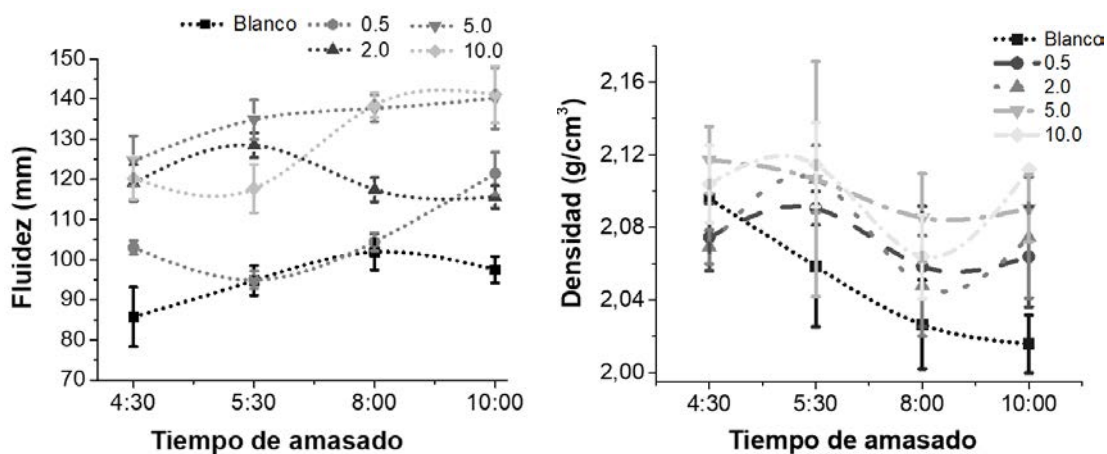


Figura 6. Consolidado. a: Curva Asentamiento vs tiempo de mezclado, b: Densidad vs tiempo de mezclado

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2 Consistencia normal y tiempos de fraguado

Se identifica que la pasta de cemento con adición de CM como aditivo orgánico modifica los tiempos iniciales y finales de fraguado con respecto a la muestra control. En bajas adiciones de mucílago de cacao CM (porcentajes del 0.5% y el 2.0%), se observa que el tiempo inicial de fraguado se prolonga en 30.8% en ambos porcentajes y en el tiempo final de fraguado se prolonga en 19.26% y 24.07%, respectivamente con respecto a la muestra control. En altos porcentajes de las adiciones de mucílago de cacao CM (5.0 y 10.0%), se observa que el tiempo inicial de fraguado se reduce en 83% y 93.85% y en el tiempo final de fraguado igualmente se reduce en un 50% y 77.78%, respectivamente en relación con la muestra control.

Los autores describen mecanismos predominantes de retardo de la hidratación del cemento que pueden explicar los fenómenos vistos en adiciones del 0.5% y 2.0% de CM como aditivo orgánico.

En los estudios desarrollados por Bishop y Barron [8] explican que cuando C3S se hidrata en presencia de sacarosa o lignosulfonato, la pasta resultante es mucho más acuosa que la pasta hidratada en ausencia de retardador, lo que indica que la hidratación se inhibe significativamente, adicionalmente explican que el retraso de la formación de C-S-H es ocasionado por fenómenos de alteración de esta fase por alteraciones por nucleación/adsorción superficial, lo cual es coherente con lo reportado por Lei et al. [1], los cuales atribuyen la acción retardadora de los azúcares a la adsorción, además, explican que hay alteración de las fases de hidratos, también en la disolución de iones, adicionalmente, alteran las fases del Clinker del cemento o productos de hidratación generados.

Por otra parte, Bishop y Barron [8] afirman que la adición de demasiada sacarosa retrasa de manera indefinida el fraguado del cemento. Tal fenómeno no se relaciona a los hallazgos encontrados en este estudio preliminar, debido a que, en porcentajes del 5.0% y 10% del mucílago de cacao pasteurizado, se encuentran reducciones importantes en los tiempos iniciales y finales de fraguado con respecto a la muestra control.

Este fenómeno es coherente con el reportado por Ahmad et al. [9] en el cual caracterizan que líquidos con compuestos a base de azúcar como es el caso de la sacarosa actúa como un retardador a baja adición y su acción retardante disminuye rápidamente y actúa como un acelerador cuando aumenta la cantidad, por lo cual, la adición de azúcar altera la tasa de hidratación del cemento y modifica la microestructura del calcio-silicato-hidrato (C-S-H).

4.3 Fluidez y densidad plástica en morteros

Se identifica que el CM modifica la fluidez de los morteros, aumentándola con respecto a la muestra control. por lo cual se puede afirmar, que el mucílago de cacao como aditivo orgánico tiene un efecto plastificante en las mezclas realizadas. Con respecto a la densidad en estado plástico, se identifica una tendencia de reducción de la densidad al incrementar el tiempo de amasado en la muestra control, sin embargo, la densidad de las demás mezclas realizadas, tienen un patrón de aumento de densidades.

Con respecto al ensayo de fluidez, la muestra control muestra una consistencia dura - seca, sin embargo, los morteros con adición de CM al 0.5% y 2.0% muestran una consistencia media-plástica y los morteros con adición de CM al 5.0% y 10.0% muestran una consistencia fluida-húmeda.

Este fenómeno es caracterizado en investigaciones en las cuales realizan evaluaciones en estado plástico con extractos de jugos y de plantas que contiene componentes de azúcares de origen orgánicos como el jugo melaza de remolacha [10] e inorgánicos como el gluconato sódico [11], entre otros.

En este orden de ideas, Huang et al. [10] señalan las posibilidades que han tenido los materiales a base de cemento para mejorar la trabajabilidad por medio de la implementación de diferentes plastificantes y retardantes, debido a que las funciones de estos es dispersar las partículas de cemento ejerciendo fuerzas repulsivas electrostáticas y estéricas para vencer la fuerza de Van der Waals entre las partículas, como resultado, el agua atrapada por las partículas de cemento puede liberarse, aumentando la trabajabilidad del concreto fresco.

Además, Cheung et al. [2] caracterizan que los efectos generados sobre la hidratación del cemento están relacionados a la absorción de azúcares en núcleos de Hidróxido de calcio y C-S-H lo cual produce afectación en la cinética de hidratación de dichos hidratos, además, se promueve la formación de más núcleos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H, posteriormente, continúa un periodo de crecimiento heterogéneo en el cual se producen áreas superficiales de mayor tamaño debido al mayor número de núcleos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y C-S-H, induciendo así el comportamiento de *acelerador retardado* del líquido.

Con respecto a los resultados obtenidos en el ensayo de densidad (Figura 3(b)), se evidencia que al aumentar el tiempo de amasado en la muestra control se disminuye la densidad. Estudios desarrollados por da Silva y Lordsleem [12] explican la incidencia del tiempo de amasado en las propiedades en estado plástico de morteros, encontrando que, a medida que aumenta el tiempo de mezclado, la densidad es menor, debido a que un mayor número de revoluciones por minuto combinado con un mayor tiempo de mezcla, genera más burbujas de aire, ya que al aumentar el tiempo de amasado, se identifica que el arrase de aire es mayor y por ende, aumenta la cantidad de burbujas en aire presentes en el mortero.

Relacionando los resultados obtenidos de la densidad de los morteros con adición de mucílago, se siguen las recomendaciones establecidas por Ghafari et al. [13], los cuales realizan evaluaciones de líquidos orgánicos versus un aditivo aireante sintético, con el objetivo de identificar la cantidad de espuma generada en el tiempo mediante el índice de espuma (Index Foam Test). Se sigue el método adaptado de [14].

Debido a lo anterior, no se observó formación de espuma, lo cual puede explicar el aumento de la densidad en todas las muestras con respecto a la muestra control, lo cual contrarresta la cantidad de burbujas de aire presente en el mortero sin adición de mucílago, lo cual indica preliminarmente, que el CM como aditivo orgánico no estabiliza las burbujas generadas en el amasado de los morteros.

5. CONCLUSIONES

En el desarrollo de los ensayos sobre la influencia del mucílago de cacao *Theobroma cacao* L como aditivo orgánico en las propiedades en estado fresco y endurecido en pastas de cemento Portland, realizando una evaluación preliminar en pastas y morteros, se concluyen los siguientes aspectos.

El CM pasteurizado y almacenado adecuadamente, conservó sus propiedades en el tiempo, además, el pH fue consistente en el tiempo.

Con respecto al ensayo de consistencia normal del cemento y tiempo de fraguado en pastas, la adición de CM en altos porcentaje ocasiona que el fraguado inicial y final se redujeran drásticamente. En bajos porcentajes de CM, el tiempo de fraguado inicial y final se prolongan con respecto a la muestra control, lo cual se puede relacionar a la alta presencia de grupos hidroxilo en la sacarosa que puede interferir con la reacción de hidratación del cemento y acelerar su hidratación o algunas interacciones entre la sacarosa y los óxidos metálicos del cemento, además, se identifica que la fluidez en morteros es afectada con la adición de CM. A mayor adición de mucílago pasteurizado se observa el incremento del % de fluidez.

Adicionalmente, la fluidez y la densidad son alteradas con respecto a los porcentajes de CM implementados. Con respecto a la densidad, en la muestra control se identifica que, a mayor tiempo de amasado, la densidad disminuye, sin embargo, las mezclas adicionadas con los diferentes porcentajes de CM muestran disminución de la densidad con respecto a la muestra control, debido a que el mucílago no genera incorporación de aire.

Hasta el momento es posible concluir que el CM pasteurizado en bajos porcentajes de adición presenta características de un aditivo plastificante o retardante y en altos porcentajes de adición presenta características de un aditivo plastificante o acelerante., sin embargo, se requieren de ensayos especializados para describir a mayor detalle los fenómenos ocasionados en pastas y morteros.

REFERENCIAS

- [1] L. Lei, R. Li, and A. Fuddin, "Influence of maltodextrin retarder on the hydration kinetics and mechanical properties of Portland cement," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 114, no. June, p. 103774, 2020.
- [2] J. Cheung, A. Jeknavorian, L. Roberts, and D. Silva, "Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1289–1309, 2011.
- [3] Z. S. Vásquez *et al.*, "Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review," *Waste Manag.*, vol. 90, pp. 72–83, 2019.
- [4] M. Khazma, N. El Hajj, A. Goullieux, R. M. Dheilly, and M. Queneudec, "Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 12, pp. 1901–1908, 2008.
- [5] C. Bedrán and G. Becerra, "Elaboración de jugo de mucílago de cacao pasteurizado," Escuela Superior Politécnica del Litoral., Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [6] A. Carrillo and A. León, "Desarrollo experimental del proceso para la obtención de una bebida fermentada a partir del mucílago de cacao," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [7] V. Endrayani, R. D. Ludescher, R. Di, and M. V. Karwe, "Total Phenolics and Antioxidant Capacity of Cocoa Pulp: Processing and Storage Study," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 41, no. 4, pp. 2–7, 201.
- [8] M. Bishop and A. R. Barron, "Cement hydration inhibition with sucrose, tartaric acid, and lignosulfonate: Analytical and spectroscopic study," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 21, pp. 7042–7049, 2006.
- [9] S. Ahmad, A. Lawan, and M. Al-Osta, "Effect of sugar dosage on setting time, microstructure and strength of Type I and Type V Portland cements," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, p. e00364, 2020.
- [10] G. Huang, D. Pudasainee, R. Gupta, and W. V. Liu, "Utilization and performance evaluation of molasses as a retarder and plasticizer for calcium sulfoaluminate cement-based mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 243, p. 118201, 2020.
- [11] X. Zhou, X. Zhou, X. Tang, and Y. Xu, "Process for calcium xylonate production as a concrete admixture derived from in-situ fermentation of wheat straw pre-hydrolysate," *Bioresour. Technol.*, vol. 261, pp. 288–293, 2018.
- [12] J. L. da Silva and A. C. Lordsleem, "Influence of mixer type and mixing time on the multipurpose mortars properties," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. November 2020, p. e00562, 2021.
- [13] E. Ghafari, S. Ghahari, D. Feys, K. Khayat, A. Baig, and R. Ferron, "Admixture compatibility with natural supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 112, no. May, p. 103683, 2020.
- [14] B. A. Silva, A. P. Ferreira Pinto, A. Gomes, and A. Candeias, "Suitability of different surfactants as air-entraining admixtures for lime mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 118986, 2020.

Estimación del consumo y costo energético del proceso de reducción de tamaño de una gilsonita para su uso en la modificación de asfaltos

Denier Yela Jaramillo¹

Francisco Daniel Granda A.²

Gloria Restrepo³

Universidad de Antioquia

Colombia

Los asfaltos naturales son materiales de interés por la posibilidad de uso en la modificación del bitumen usado en pavimentos flexibles. La gilsonita es un tipo de asfalto natural que, por su bajo costo y estructura química afín con ligantes bituminosos, puede ser empleada como modificante para mejorar las propiedades mecánicas y reológicas de asfaltos y así mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas. Para que una gilsonita pueda ser empleada para este propósito, debe tener un tamaño menor a malla 50 o 297 μm , lo cual implica un proceso de reducción de tamaño con consumos energéticos y costos asociados al proceso. Este estudio tiene como objetivo estimar los requerimientos energéticos necesarios para producir un polvo de gilsonita que sea apto para usar en asfaltos. La gilsonita empleada se caracterizó física y químicamente mediante análisis elemental, fraccionamiento Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos SARA y análisis granulométrico. Para el proceso de reducción de tamaño se utilizó un molino de bolas, se usaron cuatro tamaños de cuerpos moledores y se establecieron tres tiempos de residencia del material en el molino. La distribución de tamaño de partícula de las muestras para cada periodo de tiempo se determinó mediante difracción laser en un equipo analizador de tamaño Mastersizer 2000 E. Los resultados indican que la gilsonita está compuesta mayoritariamente por asfaltenos y que es un material duro y frágil; el proceso de reducción de tamaño presenta una relación de costo beneficio adecuada, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de la gilsonita y los requerimientos energéticos del proceso de acondicionamiento de tamaño.

¹ Ingeniero Químico, estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales, integrante del grupo de investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados.

Contacto: denier.yela@udea.edu.co

² Ingeniero Químico, integrante del grupo de investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados.

Contacto: francisco.granda@udea.edu.co

³ Profesora titular y directora del grupo de investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados.

Contacto: gloria.restrepo1@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El asfalto es ampliamente usado como material para pavimentación debido a sus propiedades adhesivas, viscoelásticas, de resistencia al agua y a la corrosión. Sin embargo, las mezclas asfálticas tradicionales están siendo sujetas a mayores requerimientos de desempeño por el aumento del tráfico y transporte de carga pesada [1, 2]. En este sentido, el uso de aditivos como agentes para la modificación de asfaltos destinados a pavimentos flexibles continúa generando un amplio interés en ingeniería y la comunidad académica, puesto que los modificantes mejoran el desempeño de las mezclas asfálticas frente a condiciones ambientales y requerimientos de carga específicas [3]. Entre los modificadores más utilizados se encuentran los de naturaleza polimérica como el estireno-butadieno-estireno SBS [4], caucho estireno-butadieno SBR [5], etileno vinil acetato EVA [6], poliestireno PS [7], polietileno de alta y baja densidad HDPE, LDPE [8] y caucho de llantas CR [9]. Por otra parte, también se encuentra modificantes como la gilsonita que es un asfalto de origen natural, la cual resulta atractiva por su naturaleza química compatible con los ligantes bituminosos [10].

Los asfaltos naturales son el producto de la penetración de aceite o petróleo en condiciones combinadas de calor, presión, oxidación y degradación biológica durante millones de años. Por esa razón, se pueden encontrar como depósitos de betún, *lagos de asfalto* o roca asfáltica, todos ellos en distintos grados de pureza [11]. Están compuestos por hidrocarburos de alto peso molecular en capas que se extienden desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros de espesor; son materiales rígidos con puntos de fusión desde 100°C hasta más de 300°C. Los asfaltos naturales exhiben altos puntos de ablandamiento (por encima de 90°C) y se conocen por tener la capacidad de endurecer asfaltos livianos provenientes de la refinación del crudo [12, 13].

La gilsonita, inicialmente conocida como *uintaita* es un asfalto natural de alta pureza y estabilidad que consiste de una compleja mezcla de compuestos orgánicos; en su estado másico presenta un color negro brillante que cambia a marrón cuando es pulverizada; es dura pero frágil y en su composición presenta bajos contenidos de azufre (0,27% p/p) y ceniza (0,68% p/p). Su contenido de carbono suele ser superior al 80%, posee una relación H/C baja y en su estructura hay presentes elementos de nitrógeno, oxígeno y azufre que existen como grupos funcionales [14-16]. En el mundo se estima que hay reservas de gilsonita de alrededor de 100 millones de toneladas, siendo Estados Unidos, Canadá, Irán, Irak, Rusia, Venezuela, China, Australia, México y Filipinas los países con mayores inventarios [10, 14, 17]. En Colombia las reservas de gilsonita son de aproximadamente 1,9 millones [18].

La gilsonita tiene uso en diferentes procesos industriales incluyendo la industria de construcción de carreteras con pavimentos flexibles [19]. Su principal uso se ha venido dando como agente modificador de asfaltos para mejorar el desempeño reológico y mecánico, y por consiguiente de las mezclas asfálticas [10]. El uso de gilsonita para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente se puede llevar a cabo mediante proceso en húmedo o en seco, siendo el proceso en húmedo la adición directa de gilsonita en asfalto a altas temperaturas ($\approx 160^\circ\text{C}$), mientras que el proceso en seco es la adición de gilsonita directamente a los agregados a $\approx 160^\circ\text{C}$ [12].

Varios investigadores realizaron la modificación de un asfalto con diferentes dosificaciones de gilsonita (4,5%, 5,5%, 6,5%, 7,5% y 8,5% en peso asfalto), determinando que la penetración del asfalto modificado disminuye a medida que se aumenta el contenido de gilsonita, es decir, hay una relación inversamente proporcional. Por otra parte, el punto de ablandamiento, punto de ignición y densidad del asfalto modificado aumentan con el contenido de gilsonita [20]. En otro estudio se obtuvieron resultados similares de asfaltos modificados con gilsonita y sometidos a envejecimiento RTFO y PAV [21].

En una investigación análoga se aprecia que el grado de desempeño a altas temperaturas del asfalto modificado aumenta; a la vez que, a bajas temperaturas se incrementa la tendencia al agrietamiento por fatiga [22]. Liu y Li [23] realizaron un análisis muy interesante respecto al desempeño a bajas temperaturas. La adición de gilsonita endurece el asfalto por lo que su uso implica aumentar el módulo de rigidez del mismo, en ese sentido y debido a su uso, para efectos de control de calidad de asfaltos modificados con gilsonita se han propuestos metodologías con técnicas instrumentales para la detección de ésta en la

mezcla final [24, 25]. El uso de gilsonita se ha extendido incluso en aplicaciones con residuos de hormigón como agregado grueso, obteniendo mejores valores de desempeño en las pruebas Marshall, resistencia al deslizamiento y módulo elástico [26]. En general, la gilsonita como modificante de asfalto mejora el desempeño en altas temperaturas aumentando la resistencia a la formación de surcos [19, 27].

El uso de gilsonita también se ha llevado a cabo en sinergia con otros aditivos especialmente poliméricos. El uso de SBR por ejemplo se hace con el objetivo de mejorar el desempeño del asfalto modificado con gilsonita a bajas temperaturas y la estabilidad de almacenamiento [28]. Yalçın y colaboradores [29] modificaron un asfalto con SBS y SBS + gilsonita americana AG para estimar la estabilidad de almacenamiento de los ligantes modificados según la norma EN 13399, determinando que la modificación con SBS + GA produce asfaltos más estables que con solo SBS.

En general, las investigaciones que analizan los efectos de la incorporación de gilsonita y SBS concluyen que la contribución de estos al ligante disminuyen la susceptibilidad a la temperatura y mejoran las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos [30, 31]. Una preocupación recurrente de usar SBS para mejorar el desempeño de asfaltos es el costo del aditivo; en ese orden de ideas, la gilsonita al tener menor precio que el SBS es una alternativa para disminuir los costos de producción: se necesita alrededor de 3 a 4% de gilsonita para reemplazar el 1% de SBS cuando los dos modificadores se mezclan en el mismo aglutinante [32]. Un aspecto similar en todas las modificaciones de asfalto con gilsonita o un aditivo polimérico + gilsonita es que dicho asfalto natural se adiciona en polvo, por lo que es claro que la gilsonita debe ser sometida a un proceso de molienda para reducir su tamaño. De acuerdo con la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) [33], la gilsonita usada para modificar ligantes bituminosos debe pasar la malla 50 (297 μm). Diversos estudios emplean polvo de gilsonita pasante malla 200 para modificar el asfalto [3, 23], o tamaños de partícula menor a la malla 40 [12].

Un número importante de contribuciones evidencian los beneficios del uso de gilsonita para modificar asfaltos; sin embargo, en la revisión del estado del arte es difícil encontrar análisis que se refieran al proceso de disminución de tamaño de la gilsonita; solo se refieren al uso del polvo de dicho material, pero no a la manera en que se llega a ese tamaño de partícula: cómo es el proceso, el tipo de molino, cuerpos moledores, tiempos, energías consumidas. En ese orden de ideas, el objetivo de este estudio es abordar y profundizar en el proceso de molienda de una gilsonita colombiana usando un molino de bolas, y estimar el consumo y el costo energético que conlleva la reducción de tamaño.

2. MÉTODO

Se determinaron algunas propiedades físicas de la gilsonita y su composición elemental, así como el análisis de la distribución granulométrica del material. Para el proceso de reducción de tamaño se estableció el tamaño y el número de cuerpos moledores, empleando un modelo matemático. Se determinaron tres tiempos de residencia para el proceso de reducción de tamaño de la gilsonita: 5, 10 y 15 minutos y en cada tiempo T_5 , T_{10} y T_{15} se toman muestras de polvo de gilsonita. Cada muestra se emulsionó en agua con un surfactante comercial y el análisis de distribución de tamaño de partícula se realizó por difracción laser en un equipo Mastersizer 2000 E. Finalmente, se calculó el consumo energético y el costo del proceso. En la Figura 1 se detalla gráficamente la metodología seguida.

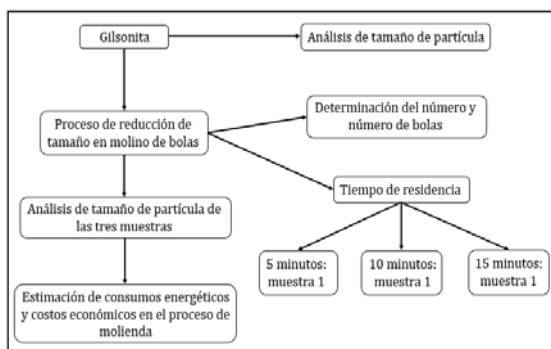


Figura 1. Marco metodológico

2.1 Materiales

La gilsonita usada proviene de una mina ubicada en el departamento de Santander, Colombia. El compuesto mayoritario es el carbono y además contiene pequeñas cantidades de azufre, hidrógeno y nitrógeno. En la Tabla 1 se muestran sus propiedades físicas y su composición elemental. En la Tabla 2 se indica el resultado del fraccionamiento SARA.

Tabla 1. Propiedades físicas y análisis elemental de la gilsonita colombiana.

Parámetro	Característica/magnitud	Unidad
Color en masa	Negro brillante	-
Color en polvo	Marrón	-
Penetración a 25 °C	0,00	0,10 mm
Punto de ablandamiento	214 ± 5	°C
Punto de ignición	260,00	°C
Gravedad específica a 25 °C	1,07	g/ml
Carbono (C)	72,20	%
Hidrógeno (H)	7,80	%
Nitrógeno (N)	8,40	%
Azufre (S)	0,64	%
Oxígeno (O)	6,37	%
Humedad	0,62	%
Cenizas	3,97	%

Tabla 2. Fraccionamiento SARA de la gilsonita

Componente	Fracción en masa (%)
Saturados	1,22
Aromáticos	13,05
Resinas	16,89
Asfaltenos	68,84

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de tamaño de partícula

La gilsonita objeto de estudio presenta un tamaño aproximado entre 20 y 125 mm; la determinación de su distribución granulométrica se realizó por medición directa de tres dimensiones representativas (Figura 2).



Figura 2. Determinación del diámetro promedio de las partículas de gilsonita

Debido a la fragilidad de la gilsonita, no es adecuado utilizar métodos de análisis granulométrico por tamizado, ya que un proceso de agitación o vibración generaría fractura del material.

La muestra original se llevó a un proceso de cuarteo para garantizar su homogeneización; se seleccionaron 26 partículas de gilsonita que fueron pesadas y a cada una se les determinó un diámetro promedio a partir de la medición de tres dimensiones (Tabla 3).

Para estandarizar la distribución por tamaño de partícula presentada en Tabla 3, se seleccionó una serie de tamices de acuerdo con la norma ASTM C136 [34] y se construyó la distribución granulométrica que se presenta en la Tabla 4, así como la curva granulométrica mostrada en la Figura 3.

Tabla 3. Distribución por tamaño de partícula: masa y diámetro promedio de partícula

Diámetro promedio (mm)	Masa (g)	Diámetro promedio (mm)	Masa (g)
112,91	500,17	48,21	41,19
104,08	560,45	46,17	40,34
99,28	440,82	44,80	40,72
79,38	240,34	44,64	40,94
75,20	360,61	43,84	40,22
69,57	200,29	43,54	40,84
69,10	280,97	41,45	20,55
68,73	240,63	38,94	40,45
68,59	160,78	31,05	10,56
55,25	80,39	29,66	10,56
53,55	80,25	29,64	10,11
49,49	40,51	26,82	5,87
48,85	60,41	21,61	5,45

Tabla 4. Distribución granulométrica de la muestra de gilsonita

Tamiz	Masa g	Pasante acumulado %	Diámetro (mm)	Tamices	Fracción retenida %
5"	0,00	100,00	125,00	+5	0
4"	1060,62	70,49	100,00	5 / 4	29,51
3 1/2"	440,82	58,23	90,00	4 / 3 1/2	12,26
3"	600,95	41,51	75,00	3 1/2 / 3	16,72
2 1/2"	882,67	16,95	63,00	3 / 2 1/2	24,56
2"	160,64	12,48	50,00	2 1/2 / 2	4,47
1 1/2"	406,17	1,18	37,50	2 / 1 1/2	11,3
1"	37,10	0,15	25,00	1 1/2 / 1	1,03
3/4"	5,45	0,00	19,00	1 / 3/4	0,15

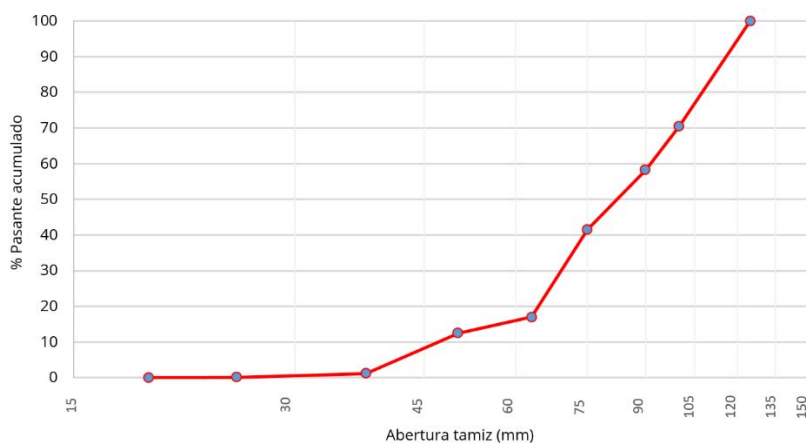


Figura 3. Curva granulométrica acumulado pasante de la muestra de gilsonita

Se estimaron los diámetros D_{10} , D_{30} y D_{60} y las relaciones de las ecuaciones (1) y (2) para obtener los parámetros característicos de la gilsonita: coeficientes de uniformidad C_u y de curvatura C_c . para determinar C_u y C_c (Tabla 5).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

Tabla 5. Resultados del coeficiente de uniformidad y curvatura de la gilsonita en masa

Parámetro	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c
Resultado	46,94	69,11	91,38	1,95	1,11

3.2 Proceso de reducción de tamaño

El proceso de reducción de tamaño se realizó en un molino de bolas, en el cual los medios de molienda en los procesos continuos de impacto y fricción logran la reducción de tamaño de un material. El molino de bolas consiste en una carcasa cilíndrica que gira lentamente alrededor de un eje horizontal. La carcasa está fabricada de acero y cubierta con un revestimiento de acero de alto contenido en carbono. Los medios de molienda lo constituyen bolas de acero las cuales se elevan dentro de la carcasa y caen sobre las partículas efectuándose la reducción por impacto; a medida que gira la carcasa las bolas grandes se desplazan hacia el punto de máximo diámetro y las pequeñas hacia el punto de descarga (Figura 4).



Figura 4. Cuerpos molidores y molino de bolas

3.2.1 Número y tamaño de bolas

En general se usan medios de molienda de un solo tamaño, pero en este estudio se emplearon diferentes tamaños de bolas favoreciendo la interacción entre ellas y el material, permitiendo generar mayor eficiencia en el proceso. Para establecer tamaño y el número de bolas de cada tamaño se siguió el siguiente procedimiento: cálculo del volumen del molino, determinación del tamaño de bolas, cálculo del volumen de bolas y cálculo de número de bolas de cada tamaño [35].

- *Volumen del molino.* Se empleó un molino de bolas cilíndrico con las dimensiones de la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones del molino de bolas

V molino: $4\pi r^2 h$		
Dimensión	Medida	Unidades
Diámetro	35,00	cm
Altura	48,00	cm
Volumen	46181,52	cm ³

- *Determinación del tamaño de bolas.* Se seleccionaron bolas de 4 tamaños B1, B2, B3 y B4 a las que se les midió el diámetro y se determinó un diámetro promedio X para cada tamaño, Tabla 7.

Tabla 7. Diámetros medidos y diámetro promedio de cuerpos molidores

	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)	X (cm)
B1	5,15	5,14	5,14	5,15	5,14
B2	4,20	4,20	4,22	4,20	4,20
B3	3,12	3,15	3,15	3,03	3,11
B4	1,92	1,93	1,91	1,91	1,91

El porcentaje relativo de cada bola dX_n en relación a un diámetro total Y, ecuación 3 y ecuación 4, se muestra en la Tabla 8.

$$\begin{aligned} \text{Diámetro total} &= Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n \\ Y &= 5,1 + 4,2 + 3,1 + 1,9 = 14,4 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Porcentaje relativo de la bola } n \text{ ésima} = dX_n = \frac{X_n}{Y} * 100 \quad (4)$$

Tabla 8. Porcentajes relativos de cada bola

dX1	35,80
dX2	29,24
dX3	21,64
dX4	13,32

- *Volumen de las bolas.* El volumen ocupado por las bolas en el molino debe ser entre el 20% al 40%; en este caso fue del 25% con un factor de empaquetamiento de 0.52 [35]. El volumen que ocupan las bolas en el molino se determina de acuerdo con la ecuación (5).

$$V_{\text{bolas en el molino}} = V_{\text{molino}} * 25\% * \text{factor de empaquetamiento ecuación (5)}$$

$$V_{\text{bolas en el molino}} = 46181,5 \text{ cm}^3 * 0,25 * 0,52 = 6003,6 \text{ cm}^3$$

- *Número de bolas de cada tamaño.* Para calcular el número de bolas de cada tamaño primero se estima el volumen de cada bola utilizando el diámetro promedio de la Tabla 7, después el volumen ocupado por cada tamaño de bola (ecuación (6)) y, finalmente, el número de bolas se determina con la razón entre el volumen de cada bola y el volumen ocupado por cada una de ellas (Tabla 9) [35].

$$V_{\text{ocupado por cada tamaño de bola}} = dX_n * \frac{V_{\text{bolas en el molino}}}{100} \text{ ecuación (6)}$$

Tabla 9. Cálculo del número de cuerpos molidores de cada tamaño

	Volumen	Volumen ocupado por tamaño de bola	Número de bolas
B1	71,25	2149,07	30,00
B2	38,83	1755,48	45,00
B3	15,74	1299,22	83,00
B4	3,67	799,82	218,00

3.3 Análisis de tamaño de partícula del material molido

Para realizar la caracterización de la distribución de tamaños se empleó un equipo analizador de tamaño de partícula Mastersizer 2000 E (Figura 5a). Se emulsionaron en 50 ml de agua y un surfactante comercial 0,5 g de las muestras G5, G10 y G15 correspondientes a los tiempos de molienda de 5, 10 y 15 minutos respectivamente, figura 5.b. Para el procesamiento interno de las funciones del equipo, se empleó un índice de refracción de 1,8 [36, 37].



Figura 5. a) Analizador de tamaño de partícula; b) muestras de gilsonita emulsionadas en agua

En las Figuras 6a, 6b y 6c se aprecian las curvas en porcentaje volumen del tamaño de partícula de las muestras G5, G10 y G15, respectivamente.

En la Figura 7 se muestran las curvas de la distribución acumulada de partículas de las muestras de gilsonita sometidas a proceso de molienda a los tiempos de residencia 5, 10 y 15 minutos.

En la tabla 11 se muestran algunos parámetros de la distribución del tamaño de las partículas D_{10} , D_{50} , y D_{90} , así como los tamaños menor y mayor en las muestras a diferentes tiempos de molienda: 0, 5, 10 y 15 minutos.

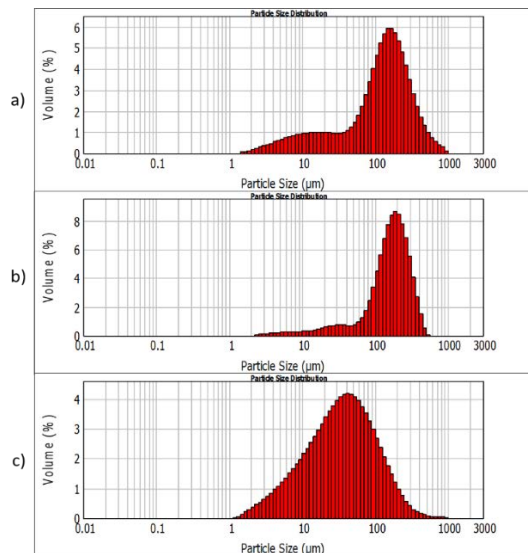


Figura 6. Distribución de los tamaños de partícula de las muestras sometidas al proceso de molienda: a) muestra G5, b) muestra G10, c) muestra G15

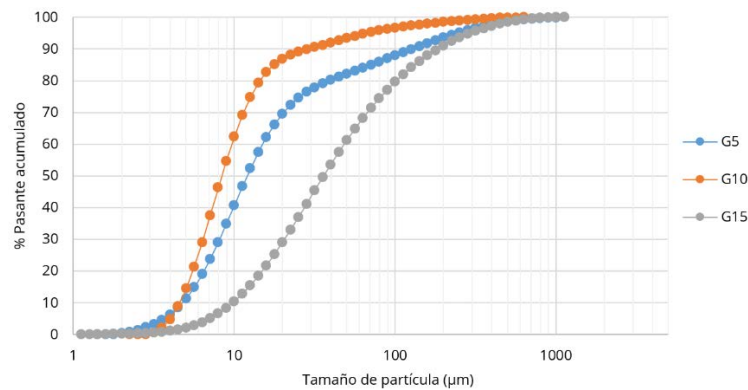


Figura 7. Curvas de distribución acumulada para las muestras a tres tiempos de residencia

Tabla 11. Parámetros de distribución de tamaño de partículas

Muestra	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	Tamaño mayor µm	Tamaño menor
G0	46 940	82 270	115 900	125 000	19 000
G5	5,02	12,042	127,53	1124,683	1,589
G10	4,58	8,379	28,96	632,456	2,518
G15	9,79	36,066	184,12	1124,683	1,262

3.4 Cálculo de consumo energético y económico

Para determinar el consumo y costo energético del proceso de molienda se emplea una relación básica que asocia la demanda energética y el tiempo de residencia de la muestra en el molino (ecuación (8)). La demanda del motor utilizado en este caso es de 0,75 kW. El valor de la energía eléctrica en la ciudad de Medellín, Colombia, para cuando fue realizado este estudio fue de COP 625,49/kWh (USD 0,17/kWh) [38]. El peso de la muestra de gilsonita fue de 3,58 kg. En la Tabla 12 se presentan estos resultados.

$$\text{Consumo energético}_i = \text{demanda del motor} * \text{Tresidencia}_i$$

$$(i): 5, 10 \text{ y } 15 \text{ minutos} \quad (8)$$

Tabla 12. Resultados del consumo energético y costos asociados

Muestra	Tresidencia h	Consumo energético kWh/kg	Costo/kg (cop)	Costo/kg (usd)
G5	0,08	$1,75 * 10^{-2}$	10,92	$2,8 * 10^{-3}$
G10	0,17	$3,49 * 10^{-2}$	21,84	$5,6 * 10^{-3}$
G15	0,25	$5,24 * 10^{-2}$	32,76	$8,4 * 10^{-3}$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La gilsonita es un compuesto de origen natural por lo que su estructura varía en función del lugar de procedencia. Los resultados del análisis elemental indican valores típicos de cada elemento en este tipo de materiales [16, 39]. La relación H/C es baja lo cual demuestra su alto grado de aromaticidad e insaturación [40]. El punto de ablandamiento es relativamente alto si se compara con los rangos típicos de asfaltos convencionales (50-60°C) y modificados, pero, para un material como la gilsonita es un valor característico. El fraccionamiento SARA comprueba el alto porcentaje de los asfaltenos en la gilsonita, a lo que se deben algunas propiedades físicas como la dureza y fragilidad de la misma. El punto de ignición revela que es seguro trabajar con gilsonita a las temperaturas convencionales en que se procesan los asfaltos, esto es, temperatura de mezclado y compactación ($160 \pm 10^\circ\text{C}$).

Aun cuando la gilsonita no es una grava ni su función es ser un material de aporte, los resultados del coeficiente de uniformidad C_u y coeficiente de curvatura C_c derivados del análisis granulométrico indican que según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos [41] la muestra original objeto de estudio se podría catalogar como una grava mal gradada GP. La curva granulométrica de la gilsonita es uniforme y abierta con tamaños aproximados entre 20 mm y 125 mm; con un diámetro promedio de 55,56 mm y un D_{50} de 82,27 mm, parámetros sugieren que existe una variabilidad en los tamaños de partículas. Esta estimación varía dependiendo del origen del material, dado que los depósitos de gilsonita pueden ser del grosor de unos centímetros hasta varios metros de espesor. Más allá de clasificarla de acuerdo con un sistema de clasificación en particular, es importante en el diseño y evaluación de un proceso de molienda conocer las propiedades del material y los parámetros de tamaño de los cuales se parte.

Las curvas del análisis de tamaño de partícula de las muestras a los distintos tiempos de residencia, así como los parámetros de tamaño, reflejan el comportamiento del material y su respuesta al proceso de reducción de tamaño con el tiempo. Después de unos pocos minutos de molienda, el tamaño de partícula decrece tan rápidamente que el valor del D_{90} desde los primeros 5 minutos ya está por debajo del tamaño deseado malla 50; esto es, ya el 90% del material tiene un tamaño inferior a $297 \mu\text{m}$. En la figura 5 se observa que la distribución granulométrica a 10 minutos es más estrecha, con una mayor concentración de valores y con menor dispersión en los tamaños.

De otra parte, a un tiempo de 15 minutos de molienda se evidencia un cambio en el modelo de distribución de tamaño, que se evidencia en los parámetros y la forma de la curva continua cerrada así como la mayor amplitud en el rango de tamaños [42]. A T_{15} todos los parámetros D_{10} , D_{50} y D_{90} aumentan, así como los valores del tamaño menor y mayor de la muestra. La reducción de tamaño aumenta la cohesión entre las partículas y, a su vez, las superficies irregulares y rugosas favorecen la unión entre partículas por fenómenos de adhesión. Las sucesivas fuerzas de impacto, las colisiones bola-polvo-bola, el aumento de temperatura y humedad favorecen la compactación del material para formar partículas más grandes. Este comportamiento sugiere que hay un límite de tiempo después del cual se generan interacciones moleculares que conducen a la aglomeración de partículas pequeñas, lo cual tiende a incrementar el tamaño promedio de las partículas.

Como se mencionó en la revisión del estado del arte, el uso de gilsonita en sinergia con polímeros tipo SBS tiene atractivo económico por su bajo precio. En Colombia el precio comercial de la gilsonita en mina es aproximadamente 550 COP/kg (USD 0,15/kg), por lo que resulta positivo el análisis de costo beneficio del proceso de molienda por kilogramo de gilsonita para fines de modificación de asfaltos; ello en relación a un tiempo de 10 min necesario para llevar el material al tamaño de partícula requerido pasante malla 50, dado que solo representa un aumento de 3,97% sobre el valor comercial de la gilsonita.

Cabe resaltar que en este estudio no se evaluó la eficiencia en el proceso de reducción de tamaño. Esto es, cuánto de la energía suministrada al molino se emplea realmente para la reducción de tamaño de la gilsonita. Parte de esta energía, el sistema la emplea en otros procesos mecánicos, térmicos, sonoros con lo cual es bien conocido que los procesos de reducción de tamaño son altamente ineficientes. No obstante, el análisis económico global realizado efectivamente indica el costo del proceso, el cual incluye ya todas estas consideraciones.

5. CONCLUSIONES

Aunque la distribución de tamaños de partícula de las muestras de gilsonita en T_5 y T_{10} varían especialmente en la zona izquierda de las curvas, dicho comportamiento no resulta relevante en el sentido que para el uso de polvo de gilsonita no se especifica una determinada distribución de tamaño, sino tamaños menores a la malla 50 o 297 μm .

En un molino de bolas con las dimensiones del usado en este trabajo y el tamaño y número de cuerpos moledores establecidos, 5 minutos de tiempo de residencia sería suficiente para lograr un polvo de gilsonita útil para modificar asfaltos. Sin embargo, los parámetros de tamaño encontrados indican que se obtiene un material más uniforme y con tamaño adecuado en un tiempo de 10 minutos. Sin consideraciones diferentes a las evaluadas en este estudio, T_{10} representa el mejor tiempo de procesamiento para obtener el tamaño requerido para la gilsonita en aplicaciones como ligante asfáltico.

El proceso de molienda para llevar el material gilsonita a un polvo de tamaño menor a una malla 50 solo implica un 3,97 % del valor por kilogramo de dicho material, teniendo en cuenta un tiempo de 10 minutos para este acondicionamiento.

Los cambios en algunas propiedades asociados al tamaño de las partículas de gilsonita, así como las fuerzas de fricción, impacto y aumento de temperatura en el interior del molino, generan la aglomeración de partículas pequeñas con el consecuente aumento del tamaño promedio de partícula. Se evidenció así que mayores tiempos de molienda no resultan en un proceso continuo de reducción de tamaño.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación Minciencias, a la Gobernación del Putumayo, a la Universidad de Antioquia y al grupo de Investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados por el apoyo para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] S. Kamiya, S. Tasaka, X. Zhang, D. Dong y N. Inagaki, «Compatibilizer Role of Styrene-butadiene-styrene Triblock Copolymer in Asphalt,» *Polymer Journal*, pp. 209-213, 2001.
- [2] B. Sengoz y G. Isikyakar, «Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen,» *Construction and Building Materials*, pp. 1897-1905, 2008.
- [3] Akbari, K. Naderi, M. Nakhaei y N. Mahmoodinia, «High temperature performance of gilsonite modified asphalt binder and asphalt concrete,» *Petroleum Science and Technology*, pp. 1783-1789, 2016.
- [4] J. Wang, Y. Qin, J. Xu, W. Zeng, Y. Zhang, W. Wang y P. Wang, «Crack resistance investigation of mixture with reclaimed SBS modified asphalt pavement using the SCB and DSCT tests,» *Construction and Building Mat.*, 2020.
- [5] A. Ameli, N. Norouzi, E. Hassanzadeh y R. Babagoli, «Influence of anti stripping agents on performance of binders and asphalt mixtures containing Crumb Rubber and Styrene-Butadiene-Rubber,» *Construction and Building Materials*, 2020.
- [6] L. Chávez, E. Alonso, A. Manzano, J. Pérez, M. Contreras y C. Signored, «Improving the compressive strengths of cold-mix asphalt using asphalt emulsion modified by polyvinyl acetate,» *Construction and Building Materials*, pp. 583-589, 2007.
- [7] R. Padhan, A. Sreeram y A. Gupta, «Evaluation of trans-polyoctenamer and crosslinking agents on the performance of waste polystyrene modified asphalt,» *Road Materials and Pavement Design*, 2018.
- [8] M. Vargas, M. Vargas, A. Sánchez y O. Manero, «Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling,» *Construction and Building Materials*, pp. 243-250, 2013.
- [9] S. Ren, X. Liu, M. Li, W. Fan, J. Xu y S. Erkens, «Experimental characterization of viscoelastic behaviors, microstructure and thermal stability of CR/SBS modified asphalt with TOR,» *Construction and Building Mat.*, 2020.
- [10] M. Ertuğrul, E. Yalçın, B. Vural, T. Alataş, J. Norambuena, A. Garcia y M. Yilmaz, «Effects of different bitumen modifiers on the rutting and cracking resistance of hot mix asphalts,» *International Journal of Pavement Engineering*, 2018.
- [11] Widyatmoko y E. Richard, «Characteristics of elastomeric and plastomeric binders in contact with natural asphalts,» *Construction and Building Materials*, pp. 239-249, 2008.
- [12] H. Rondón, J. Hernández y C. Urazán, «Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes,» *Journal of Materials and Civil Engineering*, 2015.

- [13] P. Saganome, «Los asfaltos naturales colombianos,» *Instituto Nacional de Vías*, 1999.
- [14] Z. Fang, Z. Guang, C. Zhi, Z. Qiu y S. Quan, «Molecular composition of vanadyl porphyrins in the gilsonite,» *Journal of fuel chemistry and technology*, 2020.
- [15] A. Bahrami, F. Kazemi y J. Abdolahi, «Investigating the first-Order Flotation Kinetics Models for Iranian Gilsonite,» *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 2020.
- [16] N. Nciri, S. Song, N. Kim y N. Cho, «Chemical Characterization of Gilsonite Bitumen,» *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2014.
- [17] F. Kazemi, A. Bahrami y J. Abdolahi, «Mineral processing plant site selection using integrated fuzzy cognitive map and fuzzy analytical hierarchy process approach: A case of gilsonite mines in Iran,» *Minerals Engineering*, 2020.
- [18] Grupo GCA, «Grupo GCA SAS,» 2020. Recuperado: <http://www.grupogca.co/>
- [19] M. Ameri, D. Mirzaiyan y A. Amini, «Rutting Resistance and Fatigue Behavior of Gilsonite-Modified Asphalt Binder,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018.
- [20] Y. Kusuma, H. Fikri y F. Sianturi, «An analysis of characteristics of Asphalt Pen 60/70 mixed with gilsonite additive,» *Applied Science and Engineering Conference*, 2020.
- [21] M. Słowik1 y M. Bilski, «An experimental study of the impact of aging on gilsonite and Trinidad Epuré modified asphalt binders properties,» *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2017.
- [22] J. Liu y P. Li, «Experimental Study on Gilsonite-modified Asphalt,» *Airfield and Highway Pavements*, 2008.
- [23] A. Themeli, E. Chailleux, C. Chazallon y N. Bueche, «Low Temperature Behavior of Asphaltite Modified Binders and Asphalt Concretes,» *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9, Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 76, 2020.
- [24] M. Makowska y T. Pellinen, «Qualitative Detection of the Presence of Gilsoite in the Bituminous Blends Based on Tin Layer Chromatography,» *RILEM Bookseries*, 2019.
- [25] M. Makowska y T. Pellinen, «Thin layer chromatography performed in stages to identify the presence of aromatic like fraction in chosen bitumen modifiers,» *Journal of traffic and transportation engineering*, 2020.
- [26] F. Sianturi y S. Sulaiman, «Performance analysis of a porous asphalt mixture with the use of concrete waste as a coarse aggregate and the addition of gilsonite materials,» *Applied Science and Engineering Conference*, 2020.
- [27] N. Tang, W. Huang, M. Zheng y J. Hu, «Investigation of Gilsonite-, polyphosphoric acid- and styrene-butadiene-styrene-modified asphalt binder using the multiple stress creep and recovery test,» *Road Materials and Pavement Design*, 2016.
- [28] S. Ren, M. Liang, W. Fan, Y. Zhang, C. Qian, Y. He y J. Shi, «Investigating the effects of SBR on the properties of gilsonite modified asphalt,» *Construction and Building Materials*, 2018.
- [29] E. Yalçın, E. Çeloğlu, M. Akpolat, Ö. Erdoğan, T. Alataş, B. Vural y M. Yılmaz, «Effect of Gilsonite use on Storage Stability of Styrene-butadiene-styrene Modified Bitumen,» *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2019.
- [30] M. Yılmaz y Ö. Erdoğan, «Evaluation of Gilsonite and Styrene-Butadiene-Styrene Composite Usage in Bitumen Modification on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017.
- [31] D. Marzaiyan, M. Ameri, A. Amini, M. Sabouri y A. Norouzi, «Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite- and SBS- modified asphalt binders,» *Construction and Building Materilas*, 2019.
- [32] Vural, M. Yılmaz y M. Guler, «Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder,» *Fuel*, 2011.
- [33] H. Jahanian, G. Shafabakhsh y H. Divandari, «Performance evaluation of Hot Mix Aspahl (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite,» *Construction and Building Materials*, pp. 156-164, 2017.
- [34] ASTM International, «ASTM C136/136M-19 Standar Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,» Recuperado: <https://www.astm.org/Standards/C136>
- [35] L. Barraza Currea y J. Menco Mendoza, *Beneficio de minerales*, Medellín: Copyclase, 2000.
- [36] M. Matoug y R. Gordon, «Crude Oil Asphaltenes Studied by Terahertz Spectroscopy,» *ACS Omega*, pp. 3406-3412, 2018.
- [37] S. Taylor, J. Czarnecki y J. Masliyah, «Refractive index measurements of diluted bitumen solutions,» *Fuel*, pp. 2013-2018, 2001.
- [38] Empresas Públicas de Medellín, «epm,» Recuperado: https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/hogares-y-personas/energia/tarifas
- [39] J. Vélez, S. Velásquez y D. Giraldo, «Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/ natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems,» *Polymer Testing*, pp. 1-9, 2016.
- [40] L. Navarro, M. Álvarez, J. Grosso y U. Navarro, «Separación y caracterización de resinas y asfaltenos provenientes del crudo castilla. Evaluación de su interacción molecular,» *Ciencia, Tecnología y Futuro*, pp. 53-67, 2004.
- [41] ASTM International, «ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),» Recuperado: <https://la.astm.org/>
- [42] G. Duque y E. Escobar, «Mecánica de los Suelos,» Manizales, 2002.

Determinación del riesgo disergonómico en actividades de apicultura: Un estudio de caso

Montserrat Villanueva Uribe¹

Stefany Puentes Cantor²

Yolanda Torres Pérez³

Edwin Yesid Gómez-Pachón⁴

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

El desarrollo de la actividad apícola se basa en la interacción del apicultor con las colmenas en diferentes tipos de terrenos para la producción de miel, polen, propóleos, jalea real, entre otros derivados. La manipulación de cada una de las partes de la colmena hace que el apicultor presente molestias y dolores en el sistema musculoesquelético. Por lo anterior, se hace necesario evaluar el riesgo ergonómico del puesto de trabajo de los apicultores en las tres actividades más frecuentes en la labor apícola: 1) inspección de media alza y cámara de cría, 2) recolección de polen, y 3) mudanza de colmena. La toma fotográfica secuencial de estas actividades se realizó en tres tipos de apiarios, se midieron los ángulos antropométricos mediante el software libre Kinovea y se compararon con los ángulos de confort funcionales reportados en la literatura. Posteriormente, se aplicó el método Rapid Entire Body Assessment REBA para determinar el nivel de actuación requerido en el puesto de trabajo según los ángulos articulares, el peso y la repetición de cada actividad. Este método permitió establecer el nivel de riesgo de cada actividad y las posibles enfermedades laborales que el apicultor podría adquirir, de continuar adoptando las mismas posturas para el desarrollo diario en la actividad apícola. A su vez, se determinó que las tres actividades en estudio se encuentran en nivel 4, según el método REBA, lo cual requiere un nivel de actuación inmediata, que hace necesario el rediseño del puesto de trabajo del apicultor. Finalmente, se identificaron las tres causas principales de la adopción de malas posturas: 1) la altura de la cámara de cría y la trampa de polen, 2) la inestabilidad del terreno, las estrechas dimensiones de las asas de las colmenas, y 3) el peso de la media alza y la cámara de cría.

¹ Contacto: montserratvu@gmail.com

² Contacto: stefany.puentes@uptc.edu.co

³ Contacto: yolanda.torres01@uptc.edu.co

⁴ Contacto: edwin.gomez02@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La palabra apicultura proviene del latín Apis (abeja) y Cultura (cultivo), es decir, la ciencia que se dedica al cultivo de las abejas o a la cría de las abejas [2]. Martínez [3] reporta que en Colombia existían alrededor de 2100 apicultores en 2006, siendo los departamentos con mayor importancia en producción Santander, Magdalena, Sucre, Cauca, Huila, Antioquia, Boyacá y Cundinamarca. Laverde y otros [4] reportan que en 2007 existían en Colombia cerca de 115.000 colmenas, con un potencial apícola de la flora de más de 1.000.000 de colmenas. Estos autores también reportan que en entre 2006 y 2008 el país presentaba un rezago en términos de exportaciones de los productos derivados de la actividad apícola, lo cual se debe corregir mediante la generación e implementación de desarrollos tecnológicos, junto con unas condiciones ergonómicas laborales, que mejoren de las condiciones del sector apícola.

En la actividad apícola como en la mayoría de las actividades laborales, se pueden generar riesgos disergonómicos, esto debido a que los modelos de colmenas no han evolucionado en su diseño y protocolos de manipulación, lo cual causa que los apicultores adopten posturas forzadas donde las articulaciones involucradas están al límite o superan los rangos de movimiento angular de confort. Además, el apicultor debe sujetar cargas entre 25 y 30 kg en terrenos inestables y expuestos a la intemperie; debe utilizar elementos de protección personal como overol, careta, guantes de carnaza y otros elementos especializados para el trabajo apícola, que dificultan su movilidad, la firmeza en la sujeción, así como los ángulos de visión del apicultor.

La colmena es el equipo principal de la actividad apícola; la colmena tipo Langstroth es la más utilizada en el mundo, esta fue creada en 1851 por el sacerdote americano Lorenzo Lorraine Langstroth, él estableció este modelo con dos principales contenedores, una cámara de cría y una media alza, las dos están formadas por varias piezas desmontables, con el fin de que estas piezas puedan revisarse o sustituirse [5].

Según la Asociación de especialistas en prevención y salud laboral AEPSAL [6], la apicultura presenta unos riesgos similares a los de las explotaciones agrícolas o pecuaria y todos sus trabajadores tendrán que estar informados de sus riesgos y medidas de prevención, por lo cual para evaluar los riesgos disergonómicos que se generan en la actividad apícola de la corporación Tibaira, se desarrolló un análisis de la manipulación de la colmena Langstroth por medio del registro fotográfico secuencial de los apicultores, teniendo como referencia el informe *Cosechar alzas: abrir colmenas, separar panales e inspeccionar* [7], donde se analizó las diferentes posturas que tienen los apicultores al realizar estas actividades, seguido a esto se implementó el método REBA en tres actividades de mayor frecuencia en la actividad apicultura.

2. MÉTODO

La siguiente es una investigación aplicada y exploratoria dado que se realiza trabajo de campo para conocer las instalaciones de los apiarios y el proceso de manipulación e inspección de las colmenas por parte de los apicultores. Además, se evalúan en campo las posturas tomadas por los apicultores, y con información cualitativa (fotos) y cuantitativa (ángulos articulares), se genera un diagnóstico del riesgo disergonómico de las actividades. Para el desarrollo de esta investigación se trabajó con la Corporación Tibairá, la cual cuenta con varios apiarios en los departamentos de Boyacá, de los cuales se seleccionaron tres ubicados en tres pisos térmicos diferentes en el departamento de Boyacá (Tabla 1). lo anterior permitió analizar tres entornos apícolas con condiciones variables a las cuales se encuentra expuesto el apicultor.

Tabla 1. Ubicación de los tres apiarios en estudio

Ubicación	Coordenadas	M.S.N.M	T° Media	Colmenas
Duitama	5°54'15,85"N 73°03'46,99"O	3.305 m.s.n.m	8°	40
Paipa	5°48'23,18"N 73°08'0,44"O	2.961 m.s.n.m	15°	16
Pachavita	5°10'18,01"N 73°24'05,13"O	2115 m.s.n.m	18°	10

La información utilizada para el desarrollo del estudio, se obtuvo de fuentes primarias, por medio del desarrollo de una entrevista al director de la Corporación Tibairá y apicultor con amplia experiencia [1], en la cual se indagó sobre las actividades realizadas dentro de la labor diaria del apicultor, lo cual permitió

extraer las tres principales actividades desde el punto de vista de su frecuencia de repetición. Adicionalmente, se realizaron visitas a los apiarios en estudio, en los cuales se usaron como métodos de recolección de información la observación directa, entrevistas y el registro fotográfico de las posiciones tomadas por los apicultores desde un plano lateral (plano sagital) para una mejor observación y medición de los ángulos articulares. Simultáneamente, se desarrolló la grabación de toda la actividad, material que fue analizado posteriormente y del cual se identificaron las tomas que permitieran un análisis ergonómico.

Se desarrolló una evaluación del puesto de trabajo de los apicultores por medio de un análisis postural empleando el método REBA, en el cual se evaluaron las tres actividades más desarrolladas por los apicultores en sus labores diarias, las cuales corresponden a: *inspección de media alza y cámara de cría, mudanza de la colmena y recolección del polen*; estas tareas conllevan a cambios inesperados de postura, como consecuencia normalmente de la manipulación de cargas inestables o impredecibles. La aplicación de este método brinda herramientas de evaluación sobre el riesgo de lesiones de tipo musculoesquelético asociadas a una postura, indicando en cada caso la urgencia con que se deben aplicar acciones correctivas en el puesto de trabajo.

Como puesto de trabajo se evaluó la interacción directa del apicultor con una colmena modelo Langstroth (Figura 1), la cual cuenta de cinco partes correspondientes a la tapa, media alza, cámara de cría, piquera y base, las cuales cuentan con las siguientes medidas y capacidad (Tabla 2).



Figura 1. Colmena tipo Langstroth completa con partes

Tabla 2. Medidas y capacidad de las partes de la colmena Langstroth

Partes	Medida
Cámara de cría	46,5 x 38 x 24 cm
Alza melaria	46,5 x 38 x 24 cm
Cuadro cámara	42 x 20 cm
Cuadro alza melaria	42 x 20 cm
Superficie cuadro	160 dm ²
Capacidad	Medida
Cría teórica	45.000 abejas
Kg de abeja x cría	4,5 kg
Capacidad en litros	42,4 - 44
Capacidad total	84,8 l
Capacidad alza melaria	25 a 30 kg

2.1 Fase 1. Análisis ergonómico de manipulación de colmenas Langstroth mediante fotogrametría digital

En el presente capítulo se presenta la evaluación individual realizada a las posturas que toman los apicultores en el momento de realizar las actividades de *inspección de media alza y cámara de cría, recolección de polen y mudanza de colmena*. Para la evaluación de la *inspección de media alza y cámara de cría*, se dividió esta actividad en las siguientes sub-actividades: *separar cuadros en cámara de cría, levantamiento de media alza y separar abejas de media alza*.

2.1.1 Selección y descripción de la muestra poblacional de estudio

Se tomó como referencia un apicultor principal en cada uno de los tres puntos focales (apiarios ubicados en Duitama, Paipa y Pachavita del Departamento de Boyacá, Colombia) y un apicultor asistente, dado que tienen amplia experiencia en el quehacer apícola. Es de resaltar que cuando se hace inspección de una

colmena, son mínimo dos personas las que participan para controlar imprevistos que se pueda dar en este entorno de alto riesgo [9]. En la Tabla 3, se muestran las actividades, sus respectivas tareas y los responsables de ejecutarlas, estas actividades fueron las más críticas que se encontraron en el momento de hacer inspección en un apiario. En la Tabla 4, se muestran los datos de los apicultores seleccionados, relacionándolos con el lugar de ubicación del apiario, su edad y sexo.

Tabla 3. Datos de las tareas realizadas en las actividades donde se hizo el análisis ergonómico

Actividad evaluada	Tarea	Responsable
Inspección de media alza y cámara de cría	Separar cuadros en cámara de cría	Apicultor principal
	Levantamiento media alza	Apicultor principal/ Apicultor asistente
	Separar abejas de media alza	Apicultor asistente
Recolección de polen	Retirar trampa de polen	Apicultor asistente
	Recolectar polen	Apicultor principal
	Pesar polen	Apicultor principal/ Apicultor asistente
Mudanza de colmena	Retirar media alza	Apicultor principal
	Retirar cámara de cría	Apicultor principal
	Reubicar base	Apicultor asistente
	Reubicar cámara de cría	Apicultor principal
	Reubicar media alza.	Apicultor principal

Tabla 4. Datos de los apicultores seleccionados para el análisis ergonómico en la manipulación de colmenas

Lugar	Apicultor	Edad	Sexo
Duitama	Principal	36	Hombre
	Asistente	62	Hombre
Paipa	Principal	42	Hombre
	Asistente	57	Hombre
Pachavita	Principal	38	Hombre
	Asistente	55	Hombre

Los apicultores están involucrados en todas las actividades que se realizan en el apiario, sin embargo, se tomó como referencia el apicultor principal para las tareas de separar cuadros en cámara de cría y el levantamiento de la media alza, debido a que su papel en estas actividades es crítico. Por otro lado, en el trabajo de campo se encontró que, en la tarea de levantamiento de la media alza, el papel del apicultor asistente es fundamental y permite analizar su tarea de forma individual.

2.1.2 Metodología de registro

La evaluación ergonómica tiene por objeto detectar en los puestos de trabajo evaluados, el nivel de presencia de factores de riesgo para la aparición, de problemas de salud de tipo disergonómico en los trabajadores que los ocupan [10]. Para esta evaluación, se hizo un contacto previo con los apicultores encargados para realizar una socialización de los objetivos del proyecto y obtener la autorización del manejo de datos para el estudio ergonómico, seguido a esto, se realizó una primera visita (apiario Duitama-Boyacá) de reconocimiento, contextualización y familiarización con el entorno de trabajo de los apicultores.

Se identificaron los factores que podrían influir en la toma de datos en campo y se tomaron las medidas preventivas para las posteriores visitas a cada uno de los tres apiarios (Pachavita, Duitama y Paipa), donde se registró fotográficamente a los apicultores en sus actividades cotidianas cuando inspeccionan un apiario. Las tomas fotográficas se realizaron con una cámara Canon EOS R, con un soporte (trípode) que permitiera la estabilidad de la cámara durante la toma, estas fotos se realizaron desde el plano lateral del apicultor; se tomaron videos mientras se realizaba la actividad para lograr capturar la mayor cantidad de posturas que adoptaba el apicultor en sus actividades, también se tomaron fotografías en eventos donde se consideró pertinente para una mejor comprensión y evaluación del riesgo disergonómico.

2.1.3 Modelado antropométrico

El modelado antropométrico permite detectar qué articulaciones intervienen en las posturas que son tomadas por una persona al realizar una actividad. Para la evaluación de las posturas de los apicultores, se

procesaron los videos para medir los ángulos articulares en el programa Kinovea®. Debido a que el traje del apicultor debe ser holgado para evitar la picadura de una abeja, no se tenía claridad de la ubicación de los puntos exactos de las articulaciones para hacer la medición, por lo que con base en las tomas seleccionadas de los videos, donde se evidencia el riesgo disergonómico que puede afectar la salud física del apicultor, se hizo un calcado de la fotografía en el programa Autodesk SketchBook, y se ubicaron los puntos articulares y luego se esbozaron los músculos alrededor del esqueleto generado por los puntos. En la Figura 2 se muestra el proceso de la realización del modelado antropométrico.



Figura 2. Secuencia de la realización del modelado antropométrico: a) Toma del video del apicultor, b) Posicionamiento de puntos articulares y conformando de esqueleto, c) Boceto de músculos y partes alrededor del esqueleto, y d) Modelado antropométrico

2.1.4 Inspección de media alza y cámara de cría

En esta actividad el apicultor toma diferentes posiciones para inspeccionar los dos espacios principales de la colmena: *la cámara de cría* que es la sección donde el apicultor debe brindar el entorno para que la abeja reina se sienta cómoda y pueda generar suficiente postura para hacer crecer la colmena y *la media alza* que es el espacio donde las abejas obreras crearan los panales y depositarán allí la miel.

La cámara de cría se ubica en la parte inferior de la media alza, por esta razón el apicultor inspecciona primero la media alza retirando cada uno de los cuadros para corroborar que las abejas estén depositando allí suficiente miel, si no es el caso, el apicultor tendrá que evaluar por qué razones no es así. Luego de revisar la media alza, el apicultor procede a retirarla para poder inspeccionar la cámara de cría y observar la postura de larvas de la abeja reina.

En el desarrollo de estas actividades el apicultor ejecuta diferentes tareas específicas, donde se encontraron las posturas más críticas que el apicultor adopta durante la inspección. A continuación, se dividen estas posturas por las articulaciones y/o partes del cuerpo involucrados en el desarrollo de la actividad:

- *Tarea: separar cuadros en cámara de cría. Análisis de Articulación de Cuello.* En la inspección de la cámara de cría, existe una baja variación en el rango de movimiento de flexión de la articulación del cuello (entre 58 y 66°) (Figura 3); sin embargo, estos valores de flexión del cuello están excediendo el ángulo máximo de confort para esta articulación (45°) (Figura 4) [11].



Figura 3. Secuencia de flexión del cuello durante la separación de cuadros en cámara de cría

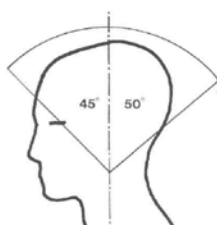


Figura 4. Ángulos límites que no debe superar la articulación del cuello [11]

Para una mejor observación del punto de articular del cuello involucrado en la actividad, se realizó un modelado antropométrico, ubicando el ángulo real en la articulación afectada (Figura 5).

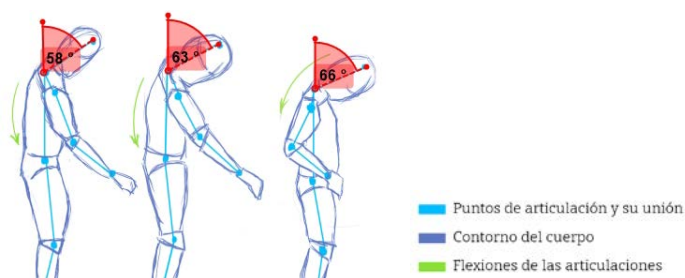


Figura 5. Modelado antropométrico de tarea donde se ve involucrada la articulación del cuello durante la separación de cuadros de la cámara de cría

En esta actividad, se genera estrés muscular debido a que la postura tomada por el apicultor causa que el peso que está soportando la articulación del cuello, aumente, debido a la sobre inclinación que hace la cabeza. Esta hiper-flexión puede provocar desequilibrios musculares; algunos músculos se alargan y se debilitan, como el *longus colli*, mientras que otros pueden acortarse y tensarse, como los *suboccipitales* (Figura 6) [12].



Figura 6. Ubicación y afectación que pueden tener los músculos *longus colli* y *suboccipitales* al tomar posturas antiérgicas en la articulación del cuello [12]

- **Tarea: levantar media alza. Análisis de Articulación de Codo y Columna-cuello.** En esta secuencia de inspección de la media alza (Figura 7), los ángulos de flexión de la articulación codo y columna se encuentran entre los rangos permitidos durante el levantamiento de la media alza (Figura 8) [8]; sin embargo, a pesar de que no excede los ángulos de confort, el peso manipulado es superior al permitido según la Resolución 2400 de 1979 [13]; por otro lado, se encontró que el ángulo de flexión del cuello excede el ángulo permitido [11].



Figura 7. Flexión de articulaciones de codo y columna-cuello durante el levantamiento de la media alza

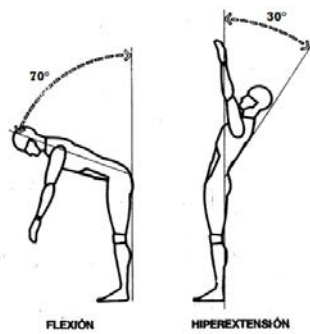


Figura 8. Movimientos de flexión y extensión de la columna vertebral [8]

En la Figura 9, se presentan los ángulos que exceden los límites recomendados en esta actividad, y los puntos articulares que se ven afectados, resaltando en color rojo los que pueden generar afectaciones a corto plazo en la salud física al apicultor.

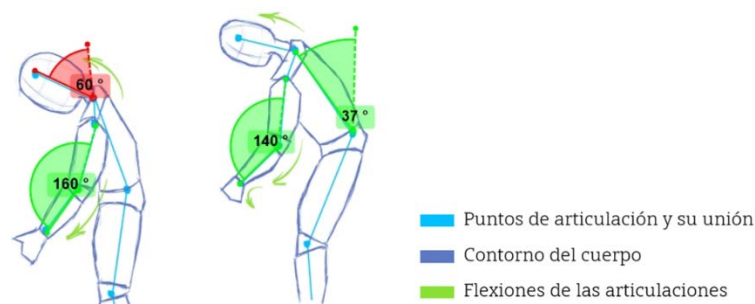


Figura 9. Modelado antropométrico de las articulaciones del cuello, codo y columna al levantar la media alza

Al igual que en la tarea anterior, las afectaciones en el cuello podrían ser la mismas, dado que se puede generar un desequilibrio muscular en esta zona. Sin embargo, se encuentra que la tensión muscular en toda la columna vertebral hasta el cuello se puede ver más afectada debido a la carga externa que está sujetando el apicultor, esto se genera porque una media alza pesa sin provisiones alrededor de 15 kg, a esto, se le suma 3 kg que pueden llegar a pesar las abejas que se encuentran en la parte interna de esta sección, a su vez, se suma la cantidad de provisiones (miel y polen) que puede llegar a contener una media alza (7 kg), por lo tanto, una media alza con una colonia normal puede llegar a pesar 25 kg [14].

- **Tarea: Levantar media alza. Análisis de Articulación de Muñeca-Mano.** En el desarrollo de la actividad, se observó que en el momento de sujetar la media alza o cámara de cría (este agarre se encuentra en cada uno de los laterales de la media alza o cámara de cría), la mano toma una desviación o cubital [15] con respecto a la articulación de la muñeca (Figura 10).

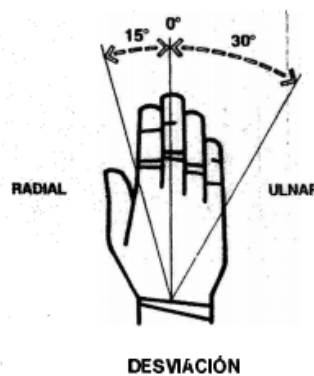


Figura 10. Movimientos de desviación ulnar o cubital de la muñeca [15]

Teniendo en cuenta la Figura 10, el ángulo límite de este movimiento es de 30°, por lo que excederlos puede traer problemas en la articulación de la muñeca hasta generar una fractura distal del radio [16], en la Figura 11 se muestra como el apicultor excede el ángulo límite de esta articulación durante la realización de la tarea.

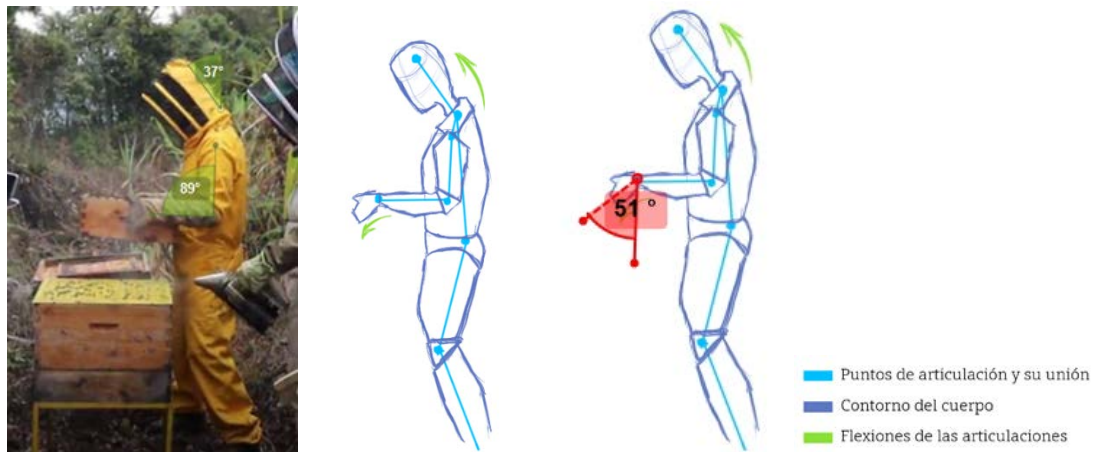


Figura 11. Posición de la articulación de la muñeca durante el levantamiento de media alza: a) Apicultor en el desarrollo de la tarea, b) Modelado antropométrico de la postura del apicultor, y c) Ángulo de desviación cubital adoptado por la muñeca durante la tarea

En esta tarea, también se encontró que la sujeción de la media alza y la cámara de cría es insegura y el apicultor corre el riesgo de que este peso que está sujetando se deslice y pueda caerse sobre sí mismo. Lo anterior se debe a dos factores principales: el primero es el guante de carnaza que usa el apicultor debe ser holgado y tiene un espesor de 1,4 a 1,6 mm [17], lo que dificulta la manipulación de diferentes instrumentos y reduce su libertad de movimiento. El segundo factor, es la reducida área del agarre que tiene la media alza, lo cual dificulta su cómoda manipulación (Figura 12).



Figura 12. Postura de las manos al manipular la media alza. a. Agarre de la media alza. b. Postura de la mano para sostener la media alza

Durante la visita a los apiarios se realizó la toma de medidas de la colmena, obteniendo así las dimensiones del agarre de la media alza y la cámara de cría, siendo estas 12 mm de profundidad y 98 mm de ancho, es decir que el área de contacto es menor de 2,5 cm², que corresponde al área mínima de contacto que debería tener un agarre y que según John Cronney [11], al tener sujeciones con esta área no debería exceder un peso de 0,9 a 3,63 kg por punto de apoyo. Ahora bien, teniendo en cuenta que el peso promedio de una media alza puede llegar a 25 kg, y que se distribuye en dos puntos de sujeción (2 manos), el apicultor puede estar soportando hasta 12,5 kg, lo cual es mucho más de lo recomendado previamente. Además, la carga aumenta porque el agarre que realiza el apicultor en esta tarea no es de toda la mano sino de tipo pinza lateral [18], donde la mayoría del peso recae en una parte lateral de los dedos (índice y corazón), mientras que el dedo pulgar genera estabilidad en la sujeción (Figura 13).

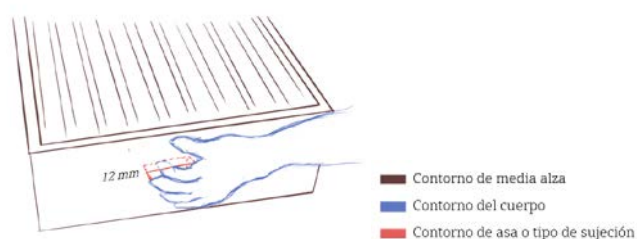


Figura 13. Boceto de la sujeción que adquiere la mano en el agarre de la media alza

- *Tarea: separar abejas de media alza. Análisis de Articulación de Cadera-rodilla, Columna- cuello, hombro-codo.* Esta tarea la realiza el apicultor asistente cuando el apicultor principal hace el levantamiento de la media alza, debido a que en el momento de realizar el levantamiento de la media alza para realizar la inspección en la cámara de cría, el apicultor debe posicionar la media alza en otro lugar, pero cuando el apicultor decide dejar reposar la media alza en una superficie se observó que se encontraban muchas abejas sujetas debajo de la media alza, por lo que se hace necesario retirarlas con un cepillo de cerda suave [19] para no lastimarlas o aplastarlas.



Figura 14. Apicultor principal levantando la media alza y apicultor asistente retirando las abejas que se encuentran sujetas en la parte inferior de la media alza

El apicultor principal no puede levantar más la media alza por su peso, es así como el apicultor asistente se ve obligado de tomar la posición forzada presentada en las Figura 15, donde el apicultor genera flexión en diferentes articulaciones de su cuerpo.

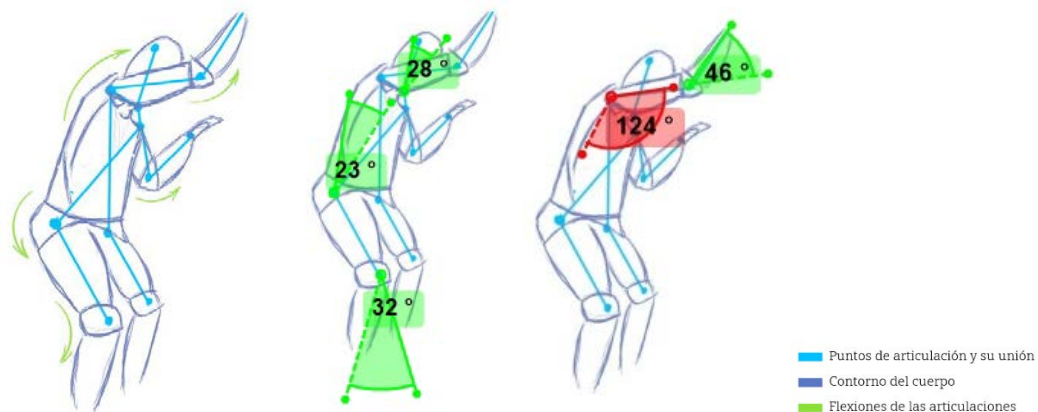


Figura 15. Modelado antropométrico de cadera, rodilla, columna- cuello, hombro y codo en la tarea de separar abejas de la media alza: a) Modelado antropométrico, b) Ángulos de las articulaciones de cadera, rodilla y cuello, y c) Ángulos de las articulaciones de hombro y codo

En la Figura 15 se evidencia que varios de los ángulos articulares no están excediendo los ángulos de confort [8]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente la combinación de músculos que se alargan y otros que se acortan o tensan significativamente, puede generar un debilitamiento en estas zonas y por ende la pérdida temprana de fuerza en los músculos involucrados [12].

2.2 Fase 2. Análisis del riesgo ergonómico por manipulación de colmenas Langstrot empleando el método REBA

Para el desarrollo de esta fase se aplicó el método REBA, que se emplea para análisis postural y es especialmente sensible con las tareas que conllevan cambios inesperados de postura, como consecuencia de la manipulación de cargas inestables o impredecibles. Su aplicación previene al evaluador sobre el riesgo de lesiones asociadas a una postura, principalmente de tipo músculo-esquelético, indicando en cada caso la urgencia con que se deberían aplicar acciones correctivas. En la Figura 16, se presenta un diagrama metodológico de aplicación del método REBA para valorar el riesgo postural en todo el cuerpo.

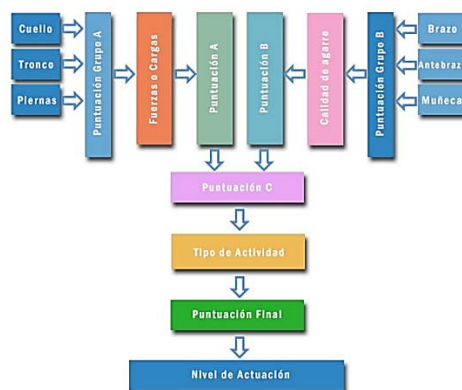


Figura 16. Diagrama de puntuación REBA [15]

Con el nivel de puntuación obtenido por este método se establece un determinado nivel de actuación, el cual, a su vez indicará si la postura es aceptable o en qué medida son necesarios cambios o rediseños en el puesto de trabajo. Para esta valoración, el cuerpo humano dividido en dos grupos, el grupo A compuesto por las articulaciones de tronco, cuello y piernas y el grupo B compuesto por articulaciones de brazo, antebrazo y muñeca (Figura 16); luego se analiza la calidad del agarre junto al análisis de las fuerzas y cargas, lo cual permite determinar la puntuación final, con la cual, se establece el nivel de actuación a ejecutar por cada actividad desarrollada en el puesto de trabajo.

En esta etapa se volvieron a evaluar las tres actividades más importantes desde el punto de vista de riesgo disergonómico que deben desarrollar los apicultores, *inspección de la media alza y cámara de cría, la mudanza de colmena y la recolección del polen*. La evaluación se realizó mediante la información obtenida de fotografías y vídeos, así como a través de la medición y análisis de los ángulos articulares de interés por medio del software Kinovea y siguiendo los pasos del método REBA.

A continuación, se presenta el proceso completo desarrollado para la actividad *inspección de la media alza*. Este mismo proceso fue aplicado a las otras dos actividades y las valoraciones del riesgo disergonómico de dichas actividades, se presentan en la Tabla 17 de la sección de resultados.

2.2.1 Inspección de la media alza y cámara de cría

Para la evaluación de la primera actividad correspondiente a la *inspección de la media alza y cámara de cría* se presenta en la Tabla 5 los puntajes obtenidos de las partes correspondientes al grupo A.

Tabla 5. Análisis Grupo A (inspección de media alza)

Parte	Posición	Puntuación	Sumatoria
Cuello	Flexión >20° o extensión	2	3
	Cabeza rotada	-	
	Inclinación lateral	1	
Tronco	Flexión >20° y ≤60° o extensión >20°	3	4
	Tronco rotado	-	
	Inclinación lateral	1	
Piernas	De pie con soporte unilateral, soporte ligero o postura inestable	2	3
	Flexión de una o ambas rodillas entre 30 y 60°	1	

Obtenida la puntuación anterior, se continuo con la puntuación y respectiva sumatoria con las partes del cuerpo correspondiente al grupo B, en la Tabla 6 se muestra los respectivos puntajes obtenidos con base en las posturas evaluadas.

Teniendo los puntajes de los dos grupos, se asignó un valor para cada grupo donde se relacionó los puntajes individuales de cada parte del cuerpo que intervienen, lo anterior, con el objetivo de obtener un puntaje colectivo por grupo, en la Tabla 7 se muestra el puntaje final del grupo A, y en la Tabla 8 se muestra el puntaje final del grupo B.

Tabla 6. Análisis Grupo B (inspección de media alza)

Parte	Posición	Puntuación	Sumatoria
Brazo	Flexión >45° y 90°	3	4
	Hombro elevado o brazo rotado	-	
	Abducido	1	
	Existe un punto de apoyo	-	
Antebrazo	Flexión <60° o >100°	2	2
	A un lado del cuerpo	-	
	Cruza línea media	-	
Muñeca	Flexión o extensión >0° y <15°	1	2
	Desviación cubital	1	

Tabla 7. Puntaje Grupo A (inspección de media alza). El valor en azul es el puntaje que se obtiene en el cruce de los valores de la Tabla 6.

	Cuello											
	1				2				3			
	Piernas				Piernas				Piernas			
Tronco	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tabla 8. Puntaje Grupo B (inspección de media alza). El valor en azul es el puntaje que se obtiene en el cruce de los valores dados en la Tabla 6.

	Antebrazo					
	1			2		
	Muñeca			Muñeca		
Brazo	1	2	3	1	2	3
1	1	2	2	1	2	3
2	1	2	3	2	3	4
3	3	4	5	4	5	5
4	4	5	5	5	6	7
5	6	7	8	7	8	8
6	7	8	8	8	9	9

Obtenidos los puntajes grupales, se analizó la intervención de las variables de manipulación de carga y la calidad del agarre para cada grupo según corresponde, la información del peso aplicado a cada postura fue obtenida por medio de entrevistas realizadas a los apicultores participantes del estudio, los cuales, como instrumento de medición utilizaron una báscula, proceso por el cual se estableció que el rango de peso de una media alza sin producción es de 2 kg a 4 kg dependiendo del tipo de madera con el cual está elaborada la colmena, y el rango de peso de la producción de una media alza lista para cosechar es de 25 a 30 kg, peso al cual debe sumarse el peso de la estructura inicial.

Estos datos permitieron asignar la puntuación de carga o fuerza al grupo A ya que al grupo B se asigna la puntuación de calidad de agarre como se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Sumatoria de cargas y calidad de agarre (inspección de media alza)

Tipo	Descripción	Puntuación	Sumatoria
Carga o fuerza (Grupo A)	Carga o fuerza menor a 5 kg	-	2
	Carga o fuerza entre 5 y 10 kg	-	
	Carga o fuerza mayor a 10 kg	2	
Carga brusca (Grupo A)	Carga aplicada bruscamente	1	1
Calidad de agarre (Grupo B)	Bueno	-	2
	Regular	-	
	Malo	2	
	Inaceptable	-	

En la Figura 16 se recopiló el puntaje de cada una de las partes del cuerpo que componen el grupo A de forma vertical, en la franja horizontal se muestra el puntaje global del grupo obtenido en la Tabla 7 y la sumatoria de las condiciones adicionales que intervienen en el análisis desarrollado en el paso anterior de carga, obteniendo así el puntaje total del grupo A.

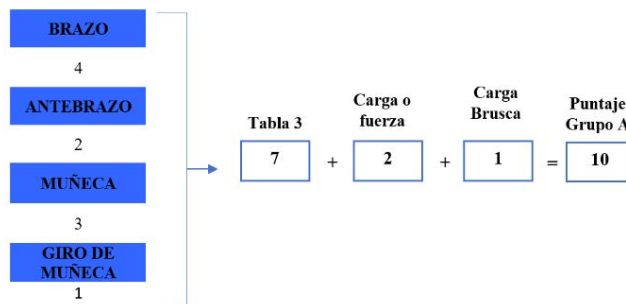


Figura 16. Puntaje con adicionales A (inspección de media alza)

En la Figura 17 se muestra el puntaje de cada una de las partes del cuerpo que componen el grupo B, de forma vertical, en la franja horizontal se muestra el puntaje global del grupo obtenido en la Tabla 8 y la sumatoria de las condiciones adicionales que intervienen en el análisis desarrollado en el paso anterior de la calidad del agarre, obteniendo así el puntaje total del grupo B.

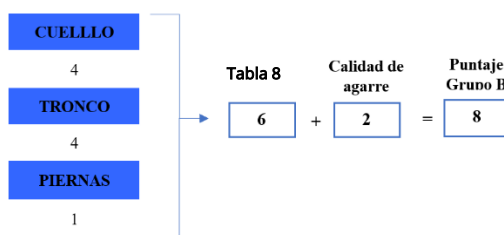


Figura 17. Puntaje con adicionales Grupo B, (inspección de media alza)

Una vez obtenido el puntaje total del grupo A y del grupo B, se hizo una correlación entre los dos puntajes globales, obteniendo el puntaje C (Tabla 10), el cual permitió obtener el puntaje global del cuerpo humano visto como un solo grupo.

Tabla 10. Correlación de puntaje del grupo A y B (inspección de media alza). El valor en azul es el puntaje que se obtiene en el cruce de los valores dados en la Tabla 9 y las Figuras 16 y 17

		Puntuación B											
Puntuación A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7	
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9	
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11	
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11	
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	

Como paso final se analizó las posturas estáticas y movimientos repetitivos de las actividades evaluadas, para lo cual se tomó el puntaje global obtenido en la Tabla 10 y se sumó las variables que intervienen en el puesto de trabajo según como se asigna en la Tabla 11, lo cual permitió obtener el puntaje C.

En la Figura 18 de forma vertical se muestra el puntaje total de la evaluación obtenida en las Tablas 7 y 8 correspondientes a los puntajes globales obtenidos del grupo A y el grupo B, en la franja horizontal se

muestra la sumatoria del puntaje C y las condiciones adicionales que intervienen en el análisis desarrollado en la Tabla 11 que hace relación a la actividad muscular utilizada en el puesto de trabajo, lo cual dio como resultado el gran puntaje del puesto de trabajo analizado *inspección de la media alza*.

Tabla 11. Adicional de repetitividad para el puntaje C (inspección de media alza)

Actividad			
Tipo	Descripción	Puntuación	Sumatoria
Tipo de actividad muscular	Una o más partes del cuerpo permanecen estáticas, soportadas durante más de 1 minuto	-	1
	Se producen movimientos repetitivos, más de 4 veces por minuto (excluyendo caminar)	-	
	Se producen cambios de postura importantes o se adoptan posturas inestables	1	

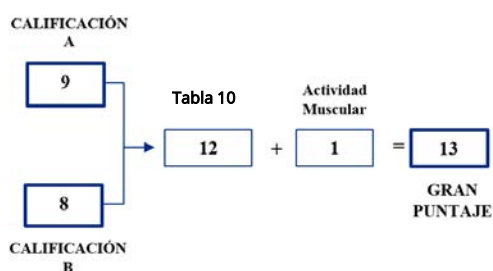


Figura 18. Gran puntaje, (inspección de media alza)

El puntaje obtenido para este caso correspondiente a 13, permitió analizar el nivel de intervención que se debe desarrollar en el puesto de trabajo según lo establecido por el método como se puede observar en la Tabla 12. El nivel de intervención obtenido por el método REBA para la inspección de la media alza, corresponde a nivel 4, el cual representa un nivel de riesgo para el apicultor muy alto y requiere de cambios urgentes en la tarea.

Tabla 12. Actuación con respecto al gran puntaje (inspección de media alza)

Puntuación	Nivel	Riesgo	Actuación
1	0	Inapreciable	No es necesaria la actuación
2 o 3	1	Bajo	Riesgo Aceptable
4 a 7	2	Medio	Pueden requerirse cambios en la tarea; es conveniente profundizar en el estudio
8 a 10	3	Alto	Se requiere el rediseño de la tarea
11 a 15	4	Muy Alto	Se requieren cambios urgentes en la tarea

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En las dos fases del estudio del riesgo ergonómico en puestos de trabajo de la actividad apícola, se encontraron las actividades y posiciones específicas en donde los ángulos articulares exceden los ángulos de confort, lo que puede llegar a generar posibles enfermedades; y posteriormente, se identificaron los tipos de actuación que deben realizarse en el puesto de trabajo según las puntuaciones obtenidas luego de la evaluación de cada actividad por el método REBA.

En la primera fase, se encontró como cada una de las partes del cuerpo se veían involucradas en el desarrollo de una actividad apícola. En esta sección se agruparon los datos obtenidos con respecto a cada actividad que realiza el apicultor, la parte del cuerpo afectada y el lugar donde se realiza, lo anterior, para obtener un rango promedio con respecto a los ángulos obtenidos en la valoración individual de cada uno de los apicultores (el apicultor principal en esta sección se denominó apicultor 1, y el apicultor asistente se denominó apicultor 2); con base en lo anterior, se tomaron los puntajes más bajos del ángulo obtenido en la medición sumándolos y dividiéndolos en la cantidad de ángulos sumados, seguido a esto se tomaron los ángulos más altos obtenidos y luego se halló el promedio de estos, así es como se obtuvo el rango promedio en el que las articulaciones están durante el desarrollo de una actividad; los ángulos analizados son los que se generan en el plano sagital de cada apicultor.

En la Tabla 13 se presentan los rangos de los ángulos que se encontraron en la valoración de la actividad de *inspección de media alza y cámara de cría*.

Tabla 13. Ángulos de las partes del cuerpo involucradas en la actividad inspección de media alza y cámara de cría relacionadas con el lugar de la realización de esta actividad y el rango promedio obtenido de cada parte evaluada.

Sección	Parte	Apicultor	Lugar			Rango promedio
			Duitama	Paipa	Pachavita	
Grupo A	Cuello	1	42-54°	40-52°	53-68°	39-52°
		2	30-43°	28-45°	43-54°	
	Tronco	1	35-47°	28-34°	25-32°	27-30°
		2	27-34°	27-32°	22-28°	
	Piernas	1	32-43°	34-44°	35-45°	31-43°
		2	26-38°	28-42°	32-45°	
Grupo B	Brazo	1	47-52°	45-52°	46-53°	45-51°
		2	45-50°	43-48°	44-49°	
	Antebrazo	1	30-45°	25-33°	22-47°	33-52°
		2	45-58°	36-63°	42-63°	
	Muñeca	1	12-14°	8-12°	13-15°	10-13°
		2	8-10°	12-15°	7-14°	

En la Tabla 14 se muestran los rangos de los ángulos que se encontraron en la valoración de la actividad *recolección de polen*.

Tabla 14. Ángulos de las partes del cuerpo involucradas en la actividad de *recolección de polen* relacionadas con el lugar de la realización de esta actividad y el rango promedio obtenido de cada parte evaluada.

Sección	Parte	Apicultor	Lugar			Rango promedio
			Duitama	Paipa	Pachavita	
Grupo A	Cuello	1	38-43°	37-52°	45-53°	36-45°
		2	35-42°	23-35°	38-43°	
	Tronco	1	58-63°	68-75°	63-68°	62-67°
		2	55-58°	62-68°	63-67°	
	Piernas	1	58-63°	64-66°	65-68°	62-65°
		2	58-62°	62-65°	66-67°	
Grupo B	Brazo	1	22-32°	19-25°	24-33°	21-29°
		2	20-28°	20-24°	22-31°	
	Antebrazo	1	72-78°	62-73°	58-64°	69-76°
		2	75-82°	74-81°	73-79°	
	Muñeca	1	8-11°	6-13°	7-12°	7-13°
		2	5-9°	6-14°	8-16°	

En la Tabla 15 se muestran los rangos de los ángulos que se encontraron en la valoración de la actividad *mudanza de colmena*.

Tabla 15. Ángulos de las partes del cuerpo involucradas en la actividad *mudanza de colmena* relacionadas con el lugar de la realización de esta actividad y el rango promedio obtenido de cada parte evaluada.

Sección	Parte	Apicultor	Lugar			Rango promedio
			Duitama	Paipa	Pachavita	
Grupo A	Cuello	1	52-63°	58-63°	63-68°	55-64°
		2	58-65°	45-61°	52-63°	
	Tronco	1	38-43°	32-45°	32-47°	32-41°
		2	35-43°	26-32°	28-37°	
	Piernas	1	35-47°	37-42°	38-43°	35-43°
		2	33-42°	31-38°	34-44°	
Grupo B	Brazo	1	45-51°	42-46°	46-51°	44-49°
		2	47-52°	41-47°	45-49°	

Antebrazo	1	68-73°	65-75°	59-62°	69-75°
	2	73-81°	74-78°	72-81°	
Muñeca	1	11-15°	9-11°	12-15°	10-12°
	2	7-10°	12-16°	10-12°	

Las anteriores valoraciones fueron tomadas como base para el desarrollo de la evaluación de la manipulación de la colmena en cada una de las actividades por medio del método REBA, resultados que se presentarán más adelante. Estas valoraciones se complementaron con la observación directa durante la inspección del apiario, debido a los otros criterios que sugiere el método que se deben tener en cuenta, como cargas o fuerzas generadas, calidad del agarre y entre otros aspectos.

En la Tabla 16 se muestran los rangos promedio obtenidos en las Tablas 13, 14 y 15, de cada una de las actividades evaluadas, donde se identificó en qué actividades partes del cuerpo como el cuello, la columna y el brazo se ven afectadas y cómo estas afectaciones ergonómicas pueden generar a corto o mediano plazo enfermedades laborales, clasificado en una gama de colores correspondiente de la siguiente forma: rojo grados sobre el nivel permitido, verde dentro del rango permitido, amarillo uno de sus grados hace parte del rango permitido la otra lo excede. Los valores que se encuentran en rojo hacen referencia a los rangos que se encuentran fuera de los rangos de confort, los que se encuentran en color naranja son rangos que contiene uno de sus valores dentro de los rangos de confort y el otro valor fuera del rango de confort y los valores que se encuentran en color verde son rangos que están dentro de los rangos de confort.

Tabla 16. Comparación de rangos de ángulos en articulaciones y posibles enfermedades laborales que se pueden generar [20]

Sección	Parte	Rango promedio por actividad			Rango confort	Posibles enfermedades laborales
		Inspección cámara de cría	Recolección de polen	Mudanza colmena		
Grupo A	Cuello	39-52°	36-45°	55-64°	0-30°	Cefaleas, cifosis en cuello, mialgias, vértigo, compresión radicular
	Tronco	27-30°	62-67°	32-41°	0-35°	Lumbalgia mecánica, hernias discales
	Piernas	31-43°	62-65°	35-43°	0-60°	Condromalacia, meniscopatias, bursitis
Grupo B	Brazo	45-51°	21-29°	44-49°	0-45°	Artrosis de hombro, lesión del manguito rotador, bursitis
	Antebrazo	33-52°	69-76°	69-75°	60°-100°	Adormecimiento en mano, hormigueo, corrientazos dolor irradiado a brazos
	Muñeca	10-13°	7-13°	10-12°	0-15°	Túnel carpiano, tenosinovitis de Quervain

Los resultados obtenidos en la segunda fase corresponden a un resultado cuantitativo para cada actividad, estos se encuentran recopilados según los ítems del método REBA en la Tabla 17, este resultado permite identificar rápidamente que las tres actividades en estudio requieren de una intervención que genere cambios en el usuario, en el dispositivo o en el medio, los cuales son las 3 variables que directamente se pueden intervenir es esta actividad.

Tabla 17. Resultado del análisis REBA de las 3 actividades del estudio

Actividad	Grupo A	Grupo B	Puntaje C	Gran Puntaje	Nivel	Riesgo	Actuación
Inspección de la media alza y cámara de cría	10	8	12	13	4	Muy Alto	Se requieren cambios urgentes en la tarea.
Recolección del polen	7	8	10	13	4	Muy Alto	Se requieren cambios urgentes en la tarea.
Mudanza de las colmenas	9	8	11	12	4	Muy Alto	Se requieren cambios urgentes en la tarea.

Llevando los resultados cuantitativos a una interpretación según el método REBA, se puede establecer un resultado cualitativo con relación a las causales de la obtención de este nivel, las cuales se convierten en la base para la toma de decisiones en la variable y la forma de intervención, ya que esa intervención debe contrarrestar estas causales, eliminando o reduciendo el nivel riesgo entre 0 y 1.

Con respecto a la actividad de *inspección de la media alza y cámara de cría*, los principales hallazgos son:

- La carga que se soporta en esta actividad equivale al nivel de puntuación más elevado considerado por el método, como se planteó anteriormente el rango de peso puede estar entre 25 a 30 kg.
- Las posturas inadecuadas que toma el apicultor para realizar la actividad no son repetitivas, generando así que no aumente el riesgo de afectación a largo plazo.
- Según la puntuación obtenida por el método, se evidencia que la actividad requiere un cambio inmediato.
- En esta actividad interviene la calidad del agarre, la cual no solo dificulta la manipulación debido al tamaño reducido de este, sino también a que el apicultor durante el desarrollo de esta actividad utiliza guantes de carnaza como elemento de protección personal para evitar la picadura de las abejas, lo cual no solo genera enfermedades a largo plazo, sino que adicionalmente representa un riesgo de deslizamiento de la carga que está sujetando y por ende un golpe en alguna de sus partes del tren inferior, no solo afectando al apicultor con el golpe, sino a la estabilidad de la colmena.

Con respecto a la actividad de *recolección del polen*, los principales hallazgos son:

- Debido a la ubicación de la trampa de polen, el apicultor debe tomar posturas equivalentes a la puntuación más alta considerada por el método, ya que se encuentra en la parte inferior de la colmena la cual está a una distancia de 40 cm sobre el piso; adicionalmente a esto el apicultor trabaja con un traje protector el cual cuenta con una careta que dificulta la movilidad del cuello y así mismo el rango de visión.
- Esta actividad requiere que el apicultor mantenga esta posición fuera de sus ángulos de confort por un tiempo prolongado, ya que debe realizar la inspección de la bandeja de recolección del polen para posteriormente retirar, y después volverla a ingresar una vez finalizada la cosecha.
- En esta actividad el apicultor no soporta ninguna carga, lo cual no genera ningún incremento en el nivel de afectación al cual se encuentra sometido.

Con respecto a la *mudanza de la colmena*, los principales hallazgos son:

- Se identificó en esta actividad que la calidad del agarre es deficiente al igual que en la actividad de la inspección de la media alza y cámara de cría, a diferencia que, para la mudanza de la colmena, se requiere hacer la mudanza de esta completamente, lo que hace que aumente el peso que debe sostener el apicultor y la cantidad de veces que debe realizar una misma tarea de esta actividad.
- La carga que se soporta en esta actividad equivale a la puntuación más alta considerada por el método.
- Las posturas inadecuadas que toma el apicultor no son repetitivas, permitiendo así que no aumente el riesgo de afectación, ya que la mudanza de la colmena, aunque es una actividad de suma relevancia para un apicultor, no se realiza con frecuencia.
- Según la puntuación obtenida por el método, se evidencia que la actividad requiere un cambio inmediato.

4. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de manipulación de la colmena por medio de toma de fotografías y valoración de ángulos, y la aplicación del método REBA, son consistentes, y evidencian un nivel de riesgo disergonómico significativo en el puesto de trabajo lo cual indica que se requiere hacer cambios urgentes para evitar lesiones musculoesqueléticas en los apicultores.

El desarrollo de las dos fases del proyecto, permitió desarrollar una medición cuantitativa de las condiciones del puesto de trabajo del apicultor, las cuales fueron sometidas a una interpretación cualitativa que permitió determinar las variables que requieren de una intervención para la mejora del puesto de trabajo, las cuales

son: la altura de la ubicación de la cámara de cría y la trampa de polen, la inestabilidad del terreno, las estrechas dimensiones del asa de la colmena y el peso de la media alza y cámara de cría.

Para el buen desarrollo de la actividad apícola es obligatorio el uso de los elementos de protección personal como la careta, el overol, guantes de carnaza, entre otros, los cuales limitan los ángulos de movilidad, siendo esta una variable que influye en las posturas tomadas por el apicultor, por lo cual, para el re-diseño del puesto de trabajo se hace necesario poner en consideración esta variable.

Según ASOPIBOY en la actualidad, la apicultura boyacense aporta el 12% de las colmenas en el país, concentradas en un 97% bajo la denominación de unidades productivas campesinas que desarrollan esta actividad de forma informal y no cuentan con la afiliación a ARL [21], por lo cual los resultados de este estudio permite vislumbrar el riesgo a largo plazo de adquirir una enfermedad laboral (Tabla 16) que le impida seguir con el buen desarrollo de sus prácticas perdiendo la remuneración, y generando inestabilidad laboral y económica.

Para lograr prevenir disminuir algunos de los riesgos disergonómicos a corto y mediano plazo, se propone la instrumentación de una colmena que permita a los apicultores tener información de la dinámica productiva de las colmenas (cantidad de larvas, cantidad de miel, temperatura interna y humedad, entre otras variables) sin tener que manipularlas físicamente. Esto se ve como una oportunidad debido a la situación actual y la emergencia sanitaria por la que pasa el mundo, donde existe riesgo de adquirir una enfermedad al tener que movilizarse.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la UPTC por su apoyo en la realización de este proyecto de investigación sobre la evaluación del riesgo disergonómico del trabajo con colmenas, en el marco del proyecto de investigación con código SGI 3006: *Desarrollo de un prototipo de colmena eco ambiental mediante la utilización de materiales industriales y agroindustriales residuales, para el confort productivo de las abejas y el fortalecimiento de la cadena apícola de Boyacá* en el marco del contrato de financiamiento de recuperación contingente No. 80740-732-2020 entre Colciencias y la UPTC.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Brbosa Moreno, Interviewee, *El diario que hacer de un apicultor..* [Entrevista]. 08 Junio 2021.
- [2] Infoagro, 2021. Recuperado: https://www.infoagro.com/agricultura_ecologica/apicultura.htm
- [3] T. Martínez Anzola, «Diagnostico de la actividad apícola y de la crianza de abejas en Colombia,» Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2006.
- [4] J. C. Laverde Rodríguez, L. M. Egea Hernández, D. M. Rodríguez Zárate y J. E. Peña Sáenz, «Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de las abejas y la apicultura en Colombia con énfasis en miel de abejas,» Ministerio de agricultura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2010.
- [5] F. O. Rodríguez, *Apicultura para pequeños emprendedores*, Buenos Aires: Ediciones Continente, 2011, p. 253.
- [6] AEPSAL, «AEPSAL,» 06 octubre 2017. Recuperado: <https://www.aepsal.com/apicultura-riesgos/>
- [7] F. P. L. R. D. R. Laborales, A. A. J. Agricultores, I. Y. T. Agrarios, F. Agroalimentaria, COAG y UPA, «Cosechar alzas: Abrir colmenas, separar panales e inspeccionar,» Fundación para la prevención de riesgos laborales, España.
- [8] J. Panero y M. Zelnik, *Las dimensiones humanas en los espacios interiores*, México: Ediciones G. Gill, 1987.
- [9] R. E. Vásquez Romero, N. C. Ortega Flórez, R. A. Martínez Sarmiento y W. D. Maldonado Quintero, *Manual técnico de apicultura abeja (Apis Mellifera)*, Bogotá: Produmedios, 2012, p. 100.
- [10] J. A. Diego Mas, «Ergonautas,» Universidad Politécnica de Valencia, 2015. Recuperado: <http://www.ergonautas.upv.es/ergonomia/evaluacion.html>
- [11] J. Cronney, *Antropometría para diseñadores*, Barcelona: Gustavo gili, S.A., 1978.
- [12] G. Morrison, «SPINE health,» 19 Octubre 2019. Recuperado: <https://www.spine-health.com/conditions/neck-pain/forward-head-postures-effect-neck-muscles>
- [13] Ministerio de trabajo y seguridad social, «Resolución 2400 de 1979,» Ministerio de trabajo y seguridad social, Bogotá, 1979.
- [14] P. Jean-Prost, P. Médori y Y. Le Conte, *Apicultura, Conocimiento de la abeja, Manejo de la colmena*, Madrid: Ediciones Mundi-prensa, 2007.
- [15] J. A. Diego-Mas, «Ergonautas,» Universidad Politécnica de Valencia, 2015. Recuperado: <http://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>

- [16] C. E. Medina Gonzalez, M. Benet Rodríguez y F. Marco Martínez, «El complejo articular de la muñeca: aspectos anatófisiológicos y biomecánicos, características, clasificación y tratamiento de la fractura distal del radio,» *MediSur*, vol. 14, nº 4, 29 Agosto 2016.
- [17] Guma de occidente S.A. de C.V., «Hoja técnica del Guante Q2,» D.R. Guma de occidente S.A. de C.V., 2006.
- [18] M. Vergara, J. Serrano Cabedo, P. Rodríguez Cervantes y A. Pérez González, «Resultados de un trabajo de campo sobre agarres utilizados en tareas cotidianas,» *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*, pp. 1-8, 2012.
- [19] D. Silva Garnica, A. L. Arcos Dorado y J. A. Gómez Díaz, "Guía ambiental apícola", C. M. V. G., M. M. G. U. y L. R. S., Edits., Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2006, p. 142.
- [20] J. Uribe Daza, Interviewee, *Enfermedades laborales que se desarrollan en actividades específicas de la apicultura*. [Entrevista]. 08 Junio 2021.
- [21] Asoapiboy, «Asoapiboy-a,» 6 Septiembre 2018. Recuperado: <https://asoapiboy.com/2018/09/06/212035/>

Modulo electrónico para la adquisición, procesamiento digital y transmisión de señales mioeléctricas en tiempo real usando microcontroladores dsPic

Néider Fabián Walteros Pinto¹

Daniel Humberto Albarracín Sepúlveda²

Fundación Universitaria de San Gil
Colombia

En el campo de la bioingeniería las señales mioeléctricas se presentan como un fenómeno electroquímico aprovechable y de fácil estudio, en parte debido a la sencillez con las que se adquieren y procesan. Debido a estas características es que se prefieren frente a otras, como las señales encefálicas, y se presentan como una alternativa más rápida para desarrollar dispositivos tecnológicos de interacción humano-máquina. Este trabajo consiste en el diseño e implementación de un módulo electrónico para la adquisición, procesamiento y transmisión de señales mioeléctricas. Para la adquisición se implementaron electrodos superficiales con etapa de amplificación activa; luego se utilizaron técnicas de filtrado digital programadas en un microcontrolador dsPic, con el fin de atenuar ruidos no deseados en la señal; y el tratamiento de los datos se realizó en tiempo real para luego transmitirlos de forma inalámbrica a una interfaz en un computador.

¹ Estudiante de último semestre de Ingeniería Electrónica, vinculado al Semillero de investigación Bioelectronic.

Contacto: neiderwalteros4@unisangil.edu.co

² Coordinador del Semillero de investigación Bioelectronic.

Contacto: dalbarracin@unisangil.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de señales DSP es una técnica que ya se ha venido desarrollando desde el siglo pasado, ha evolucionado muy rápidamente y ha sido involucrada en un gran número de áreas tanto tecnológicas como científicas; de esta manera se ha logrado desde mejorar la calidad de señales de audio hasta identificar patologías médicas gracias al procesamiento de señales biomédicas. Partiendo de ese abanico de posibilidades y de las ventajas que supone un sistema digital frente a uno analógico es que este proyecto en el área de la bioingeniería cobra vida.

La importancia de este tipo de desarrollos interdisciplinarios no solamente permiten promover la investigación sino que impulsan el desarrollo de tecnología biomédica en el país, la cual según el panorama de los últimos años, si se compara con el resto del mundo, presenta deficiencias [1] y es ahí donde el Semillero de Investigación Bioelectronic del Programa de Ingeniería Electrónica de la Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL se presenta para aportar en el área y así disminuir la brecha tecnológica local, brindando dispositivos tecnológicos que permitan facilitar la investigación y reducir los tiempos de desarrollo.

Actualmente para estudio de la actividad eléctrica muscular o actividad mioeléctrica se dispone de la electromiografía, esta es una técnica de captación y gráfico de señales eléctricas focalizadas en los músculos cuando en estos sucede una contracción muscular. Estas son captadas por electrodos y tratadas por un sistema electrónico para su correcta visualización. Sin embargo, no son sistemas adecuados para involucrarse en áreas como el control o la robótica, pues están diseñados únicamente para monitoreo.

Así, el objetivo es diseñar e implementar un módulo electrónico portátil que realice la adquisición de señales mioeléctricas, ejecute los procedimientos de filtrado digital correspondientes para eliminar interferencias, además que transmita los resultados de manera inalámbrica a una interfaz gráfica en un computador. Un aspecto importante es que toda la carga computacional ha de recaer en el módulo electrónico y ejecutarse en tiempo real pues lo que se busca es obtener un dispositivo autónomo que sirva de interfaz humano-máquina en trabajos futuros como el control de prótesis electrónicas.

2. MARCO CONCEPTUAL

En el siguiente apartado se detallarán los aspectos fundamentales de la señal eléctrica muscular o mioeléctrica, describiendo a brevedad el fundamento electroquímico y eléctrico que la genera, las formas de adquirir la señal y las interferencias que afectan la adquisición de dicha señal.

2.1 Señal mioeléctrica

Es el nombre que se le da un conjunto de potenciales de acción u ondas de descarga eléctrica [2] desencadenados por células nerviosas también conocidas como neuronas motoras; este proceso se le conoce como sinapsis que en esencia busca transmitir información a través de impulsos nerviosos [3] y es el primer paso de un complejo proceso electroquímico que tiene como finalidad la contracción muscular.

2.2 El mecanismo de contracción muscular

Es el proceso completo desde la intención de movimiento en el cerebro hasta la contracción del músculo [4] y comprende una gran cantidad de reacciones químicas complejas, que, si bien todas cumplen una función vital, aquí solo se hará mención en las que intervienen en el efecto eléctrico. El proceso comienza cuando un impulso nervioso llega a los axones de la neurona liberando acetilcolina, un neurotransmisor, que luego se une a receptores dispuestos en una membrana de la fibra muscular. Estos receptores, gracias a la unión con la acetilcolina, hacen las veces de canales iónicos permitiendo el intercambio de iones de sodio y potasio generando una diferencia de potencial de dos fases, despolarización y repolarización [5].

En el primer instante la membrana estaba cargada negativamente, cuando sucede el intercambio de iones se va despolarizando, cargándose ahora positivamente, una vez se alcanza un voltaje umbral determinado

se produce un efecto en cadena incrementado la diferencia de potencial, momento en el que sucede el denominado potencial de acción (pico de voltaje máximo), que se propaga a través de la membrana incrementando los niveles de calcio en las fibras musculares que desencadenará otras reacciones químicas que finalmente contraen el músculo, mientras esto sucede la distribución de iones se va reorganizando nuevamente, este estado se conoce como repolarización [6].

2.3 Características de la señal mioeléctrica

Esta señal se relaciona directamente con la actividad de contracción muscular sana. Como se muestra en las Figuras 1 y 2, en donde una mayor actividad eléctrica se refleja en mayor fuerza ejercida por el músculo, de igual manera un músculo en estado de reposo debe mostrar una mínima o casi nula actividad eléctrica, cualquier otra variación eléctrica puede deberse a neuropatías motoras [7].

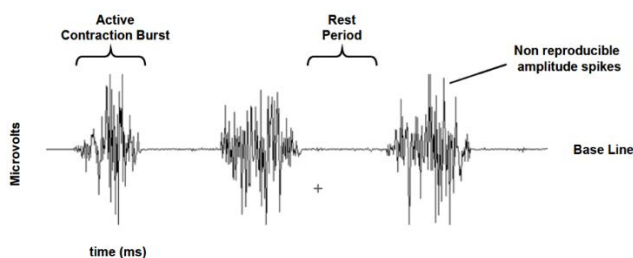


Figura 1. Forma de onda característica de una señal mioeléctrica en musculo sano [7]

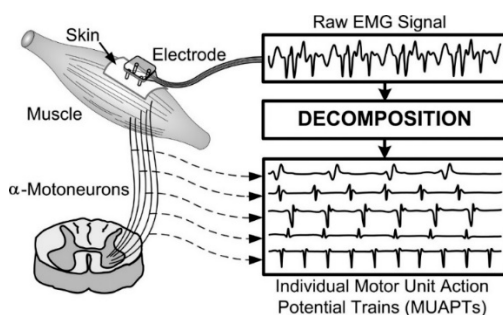


Figura 2. Composición de una señal mioeléctrica capturada por electrodos superficiales

Las señales varían dependiendo de la contextura corporal y el estado físico de la persona, así como también el tipo de electrodos y su ubicación. Sin embargo, una señal típica tiene rangos de amplitud que van desde 0.1 a 0.5 milivoltios, y el rango de frecuencias va desde unos pocos Hertz hasta los 500 Hertz aproximadamente [7].

2.4 Disposición de electrodos

Existen dos técnicas en la disposición de electrodos para electromiografía; la primera es una técnica invasiva con electrodos de aguja y requiere ser realizado por personal capacitado para realizar las inserciones intramusculares. La segunda forma consiste en el uso de electrodos de disposición superficial que se colocan sobre la piel en el área del músculo a analizar, esta técnica no es invasiva, cómoda y fácil de llevar a cabo, y debido a eso es la técnica escogida para realizar la adquisición de las señales.

Se requieren por lo menos dos electrodos para captar la señal, como se muestra en la Figura 3, estos se colocan en el área central del musculo a analizar, esta configuración se conoce como bipolar. Usualmente se usa un tercer electrodo de referencia para mejorar la estabilidad de la señal, a esta configuración se le conoce como diferencial. Concretamente los electrodos pueden disponerse tanto longitudinal como transversalmente con respecto al eje largo del músculo [8].

2.5 Ruidos en la señal

Es importante tener en cuenta que al no existir contacto directo de los electrodos sobre el músculo se incrementa notablemente la susceptibilidad a ruidos, ya sean extrínsecos como el producido por los campos

electromagnéticos, o intrínsecos, producidos por el cuerpo. Este ruido se hacen evidente cuando se amplifica la señal.

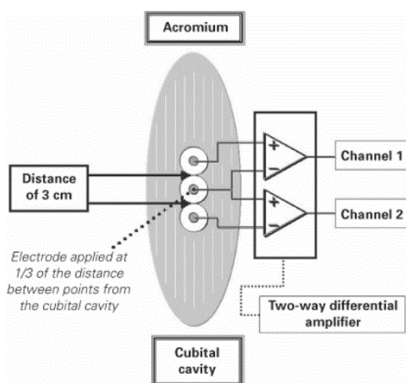


Figura 3. Esquema de disposición longitudinal de electrodos superficiales en músculo

- *Ruido extrínseco.* La radiación electromagnética es la gran fuente de este tipo de ruido. El cuerpo humano está constantemente expuesto a esta, es supremamente invasiva. Este ruido proviene de fuentes muy variadas, básicamente cualquier equipo eléctrico que se conecte a la red eléctrica irradia el que se conoce como: ruido de red, también los dispositivos de comunicación inalámbrica irradian ondas electromagnéticas [7].
- *Ruido intrínseco.* Cuando los electrodos son ubicados cerca del corazón, las señales eléctricas generadas por este músculo cardiaco pueden ser capturadas junto con la señal mioeléctrica ya que comparten el mismo principio electroquímico. También se debe tener en cuenta que la acción de contracción muscular causa cambios de textura y desplazamientos en la región donde se disponen los electrodos, por lo que la calidad de la señal puede verse afectada [7].

3. MÉTODO

3.1 Diseño e implementación de etapa de amplificación analógica

Debido a las características eléctricas de la señal muscular y a los rangos de voltaje del microcontrolador dsPIC seleccionado es primordial implementar una etapa de amplificación para la señal, de tal manera que sea posible procesarla en los niveles de tensión del microcontrolador usado [9]. Para lograr tal fin se diseña una etapa de amplificación que tiene como componente principal el amplificador de instrumentación AD620, como se muestra en la Figura 4, el cual está desarrollado para ser usado en aplicaciones biomédicas por su alta inmunidad al ruido.

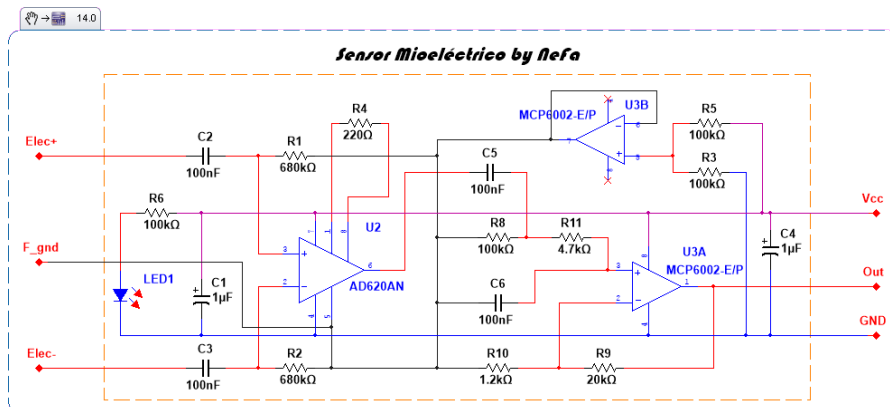


Figura 4. Esquema eléctrico de etapa de amplificación con posterior etapa de filtro pasabanda

Durante el desarrollo de esta etapa se exploró la posibilidad de integrar en una única placa toda la electrónica necesaria que prepara la señal para ser digitalizada por el microcontrolador, de esta manera se consigue implementar un sensor mioeléctrico compacto y de fácil manejo, como se muestra en la Figura 5.

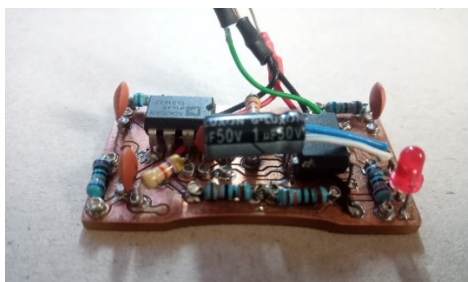


Figura 5. Implementación del sensor mioeléctrico en placa de circuito impreso de dimensiones 2.5cm x 4cm.

El sensor mioeléctrico cuenta con referencia de voltaje, de esta forma el sensor se alimenta con fuente simple y no dual. Aparte del amplificador de instrumentación se añade un filtro activo pasabanda que cumple dos funciones limitar el rango de frecuencias, de tal forma que solo permite el paso de la banda electromiográfica, y cumplir con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon para evitar errores de digitalización [10]. También se integra la conexión con los electrodos superficiales lo cual permite reducir la incidencia de ruidos externos y como aspecto ergonómico hace que el posicionamiento del sensor sea simple. Además, se equipa al sensor con un plug jack 3.5mm para conexión rápida.

3.2 Diseño e implementación de la tarjeta de procesamiento digital

A pesar de los sistemas analógicos son más rápidos por naturaleza, los sistemas digitales son mucho más compactos y requieren de muchos menos componentes, por lo tanto, son mucho más económicos. Además, presentan otras ventajas que son inherentes a los sistemas digitales, como el hecho de tener mayor inmunidad a los errores inducidos por campos electromagnéticos o las variaciones de temperatura, la suma de estas características da lugar a que el comportamiento sea predecible y repetible, por lo que es posible fabricar sistemas que tengan idénticas respuestas y que éstas no varíen a lo largo de la vida útil del sistema [10].

Por lo tanto, para la unidad de procesamiento digital se opta por un microcontrolador dsPIC, concretamente el dsPIC33FJ128GP804, el cual pertenece a una familia de microcontroladores especialmente diseñados para el procesamiento de señales pues integra un motor DSP que reduce los tiempos de cálculo e integra funcionalidades como memoria de acceso directo DMA, que permite desarrollar rutinas sin pasar por el microcontrolador, esto es particularmente útil pues permite llevar a cabo varias tareas simultáneamente.

La tarjeta o módulo electrónico, mostrada en la Figura 6, está destinado a ser usado de manera portátil y sin conexiones externas más allá de los propios sensores mioeléctricos; en base a esto se diseña la electrónica necesaria que le permite comunicarse inalámbricamente a través de bluetooth y funcionar autónomamente gracias a una batería de litio recargable.

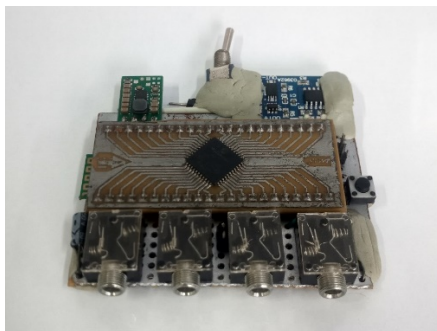


Figura 6. Implementación del módulo de procedimiento digital, usando el microcontrolador dsPIC33FJ128GP804

El dispositivo se diseña para recibir cuatro señales analógicas provenientes de cuatro sensores mioeléctricos, cuya conexión se da a través de conectores jack 3.5mm, por el cual también se brinda el suministro eléctrico a los sensores. Para asegurar una tensión de alimentación estable se hace uso de un regulador tipo buck-boost que asegura salida de voltaje de 3.3v independientemente de la variación de tensión en la batería.

3.3 Diseño de los filtros digitales

Previo al diseño de los filtros se establece la frecuencia de muestreo la cual cumple con el parámetro de Nyquist-Shannon, en donde la frecuencia de muestreo ha de ser el doble de la frecuencia máxima de la señal a muestrear, en este caso se establece la frecuencia de muestreo en 1200Hz [11].

El procesamiento digital de señales consiste en la manipulación matemática de una señal de información para modificarla o mejorarla en algún sentido y el filtrado digital es una de esas formas de manipulación. De acuerdo a esto, el objetivo de esta etapa consiste no solamente en eliminar ruidos presentes en la señal mioeléctrica, sino generar una señal de salida simplificada.

Los filtros diseñados que se presentan en la Figura 7 son de tipo IIR (Respuesta infinita al impulso). Estos son filtros recursivos y tienen en cuenta tanto los datos de entrada como los de salida lo cual les permite dar un buen desempeño con pocos coeficientes; esto visto desde el punto de vista del microcontrolador se traduce en mayor rapidez y menor carga computacional [10].

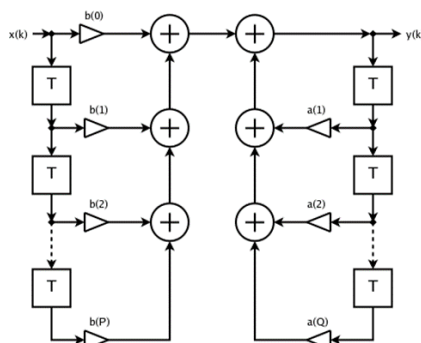


Figura 7. Estructura básica de un filtro tipo IIR, genérico para n coeficientes

3.3.1 Filtro Notch/Comb

El ruido de red es el más permisivo en la señal mioeléctrica, y esto es en gran medida por que se encuentra en el mismo espectro que la señal mioeléctrica, pero también se debe a que presenta bastantes armónicos. Por tal razón se opta por implementar un filtro digital tipo peine el cual a diferencia del Notch atenúa todos los armónicos de determinada frecuencia base. Para lograr el objetivo de diseño se hace uso de la herramienta Filter Designer de MATLAB, como se muestra en la Figura 8; esta herramienta permite calcular los coeficientes del filtro que es implementado mediante lenguaje C y ejecutado en el microcontrolador.

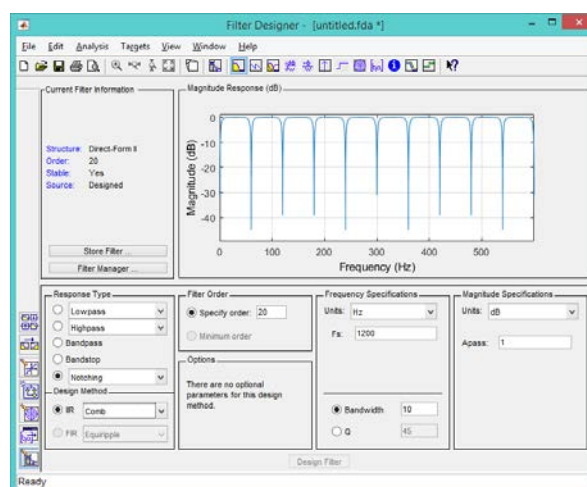


Figura 8. Herramienta Filter Designer en el diseño del filtro Notch/Comb

La gran ventaja de este tipo de filtros frente a una implementación analógica es que un solo filtro es capaz de atenuar todos los armónicos de una señal, mientras que en la versión analógica es necesario un filtro Notch por cada armónico, esto se traduciría en mayor tamaño y costo de producción.

3.3.2 Extracción de la envolvente de la señal mioeléctrica

Debido a que se pretende simplificar la forma de onda de la señal mioeléctrica, se opta por usar la técnica de extracción de la envolvente de la señal, este es un proceso muy conocido en la demodulación de señales de radio AM, entonces este mismo principio se puede aplicar aquí. El desarrollo de este apartado se puede implementar de manera sencilla gracias al procesamiento digital programado en el microcontrolador. Entonces, la señal filtrada se toma como entrada para este paso.

El procedimiento aprovecha el filtrado digital implementando un filtro pasabajas con una frecuencia de corte de apenas unos pocos Hertz, como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, la particularidad radica en que la señal de entrada toma valor absoluto, de esta forma el filtro actúa suavizando toda variación que esté por encima de su frecuencia de corte y con una amplitud que corresponde a la amplitud promedio de la señal mioeléctrica justo al ingresar al filtro.

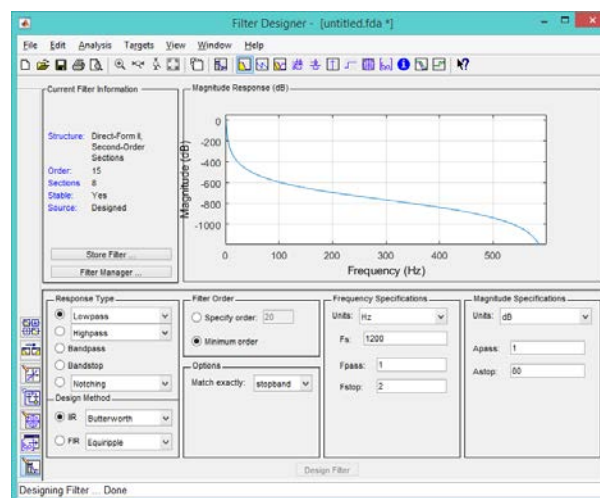


Figura 9. Herramienta Filter Designer en el diseño del filtro pasabajas

3.3.3 Trasmisión de los datos de salida

Hasta este punto se han logrado diseñar las etapas de filtrado correspondientes, sin embargo, no hay forma de validar su funcionamiento. Para lograr tal fin se hace uso del módulo de comunicación bluetooth para transmitir los datos a una interfaz y que puedan ser observados. El aspecto a tener en cuenta es que los datos procesados presentan formato de entero con signo de 2 bytes y el periférico de comunicación solo permite la transmisión de datos en formato entero sin signo de 1 byte. Debido a esto es necesario hacer un Split de la variable a fin de poder transmitir toda la información y reconstruirla en el receptor, el código implementado para este fin se muestra en la Figura 10.

```
Ch0_H = DataShiftred_Ch0[0] >> 8;  
Ch0_L = DataShiftred_Ch0[0] & 0xFF;  
Ch1_H = DataShiftred_Ch1[0] >> 8;  
Ch1_L = DataShiftred_Ch1[0] & 0xFF;  
Ch2_H = DataShiftred_Ch2[0] >> 8;  
Ch2_L = DataShiftred_Ch2[0] & 0xFF;  
Ch3_H = DataShiftred_Ch3[0] >> 8;  
Ch3_L = DataShiftred_Ch3[0] & 0xFF;
```

Figura 10. División de variable entera con signo de 2 bytes en variables enteras sin signo de 1 byte

La transmisión de los datos se realiza por paquetes cuidadosamente organizados para ser fácilmente reconstruidos del lado del receptor, además gracias a la funcionalidad de Memoria de Acceso Directo que presenta el microcontrolador se permite realizar transmisión de un "banco de datos A" mientras en otro "banco de datos B" se están digitalizando y procesando datos nuevos; de esta forma cuando los datos del banco A han sido transmitidos el banco B pasa a transmitir y el A pasa a recolectar datos. Esta forma de trabajo permite siempre tener disponible un banco para recolectar datos y evitar cualquier pérdida de información.

3.4 Diseño de la interfaz de visualización en computador

Para la visualización de los datos transmitidos se opta por implementar una interfaz gráfica para pc mediante el software de LabView, como lo muestra la Figura 11. La plataforma está encargada no solamente de recibir y reconstruir los paquetes de datos enviados mediante comunicación bluetooth, sino que se encarga de dar formato a estos modificando su amplitud, de esta forma se tiene una visual reconstruida del aspecto original de la señal mioeléctrica.

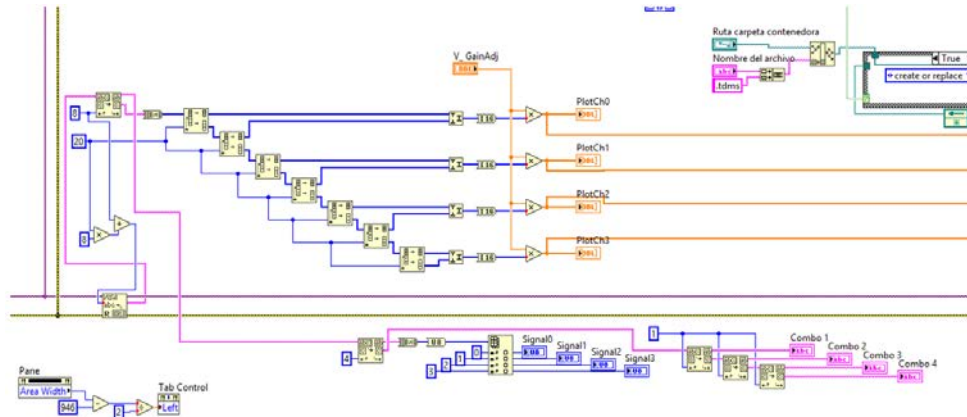


Figura 11. Sección del diagrama de bloques de la interfaz gráfica, en la sección se aprecia el flujo implementado para recibir y reconstruir los paquetes de datos enviados desde el microcontrolador

La interfaz es la encargada de establecer la comunicación con el módulo electrónico para entrar en sincronía en la transmisión de datos; además cuenta con pulsadores que permiten elegir qué etapa de filtrado se desea visualizar, ya sea: señal sin filtrar, señal con filtro de red, o señal envolvente o simplificada, como se muestra en la Figura 12. De esta forma se puede inspeccionar si efectivamente el filtrado digital está cumpliendo su cometido.

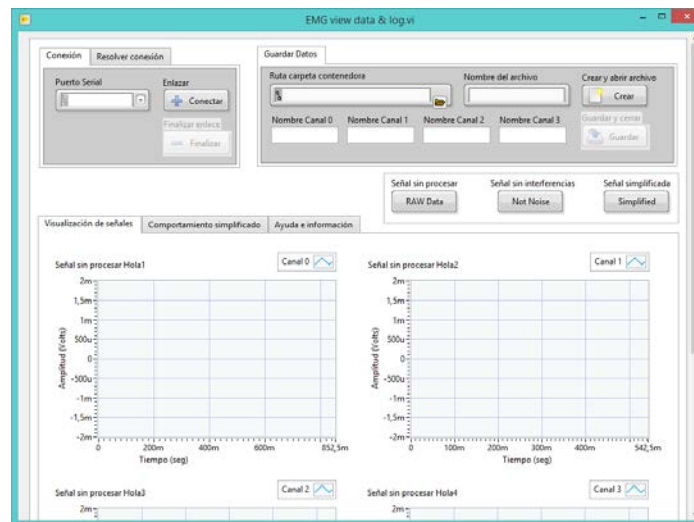


Figura 12. Ventana de la interfaz gráfica, cuenta con 4 gráficas que permiten la visualización en tiempo real de los datos recibidos

Tal como se observa en la figura anterior, la interfaz integra la funcionalidad de guardar datos, esta opción se añade aprovechando el almacenamiento que dispone un computador, así los datos quedan disponibles para análisis futuros.

3.5 Diseño de carcasas

Finalmente, como aspecto estructural y para dar mayor robustez al módulo electrónico se diseña en el software CAD SolidWorks carcasas tanto para los sensores mioeléctricos como para el módulo de procesamiento, como se muestran en las Figuras 13 a 16.

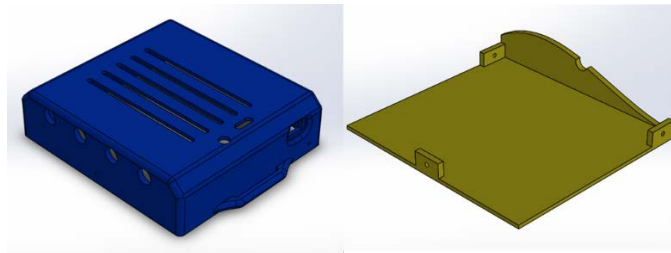


Figura 13. Diseño de carcasa en plástico PLA para el módulo de procesamiento digital



Figura 14. Carcasa del módulo de procesamiento digital, vistas isométricas

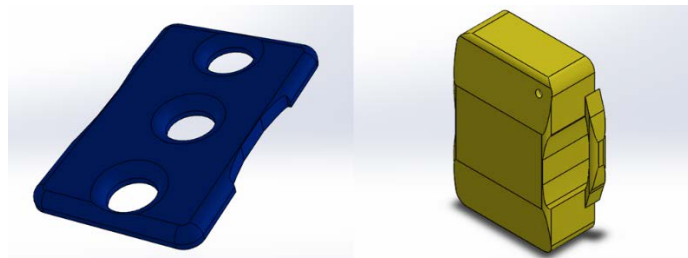


Figura 15. Diseño de carcasa en plástico PLA para el sensor mioeléctrico



Figura 14. Carcasa de los sensores mioeléctricos

Estos diseños son construidos por impresora 3D tipo FDM en material en material eco amigable PLA. Para desarrollos futuros se empleará material plástico flexible en pro de una mayor comodidad y ergonomía.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El desarrollo del proyecto dio como resultado un dispositivo portátil, de tamaño reducido y con conectividad inalámbrica que permite la adquisición y procesamiento de 4 señales mioeléctricas en tiempo real y además cuenta con 4 sensores que se encargan de adquirir las señales mioeléctricas mediante electrodos superficiales.

El módulo está pensado para la adquisición de las señales de manera general, es decir que puede ser usado en cualquier músculo del cuerpo cercano a la piel, además los sensores son intercambiables entre canales lo que significa que independientemente de donde se conecten funcionaran correctamente.

El desempeño del dispositivo es el esperado según los parámetros de diseño establecido, permite muestrear 1200 datos por segundo en cada canal, esto es más que suficiente para el rango de frecuencia

de las señales mioeléctricas. Con respecto al desempeño de los filtros digitales se observa un rendimiento según lo esperado, como se muestra en las Figuras 17 a 20.

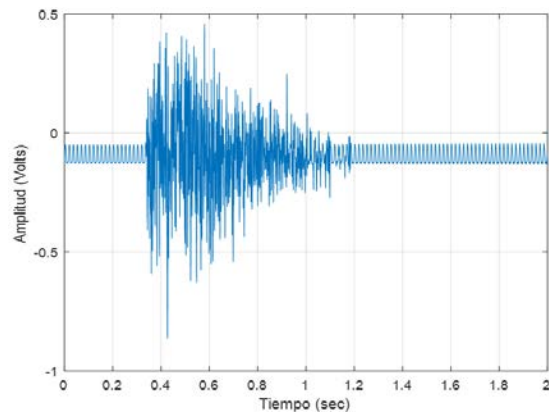


Figura 15. Señal mioeléctrica sin filtrado

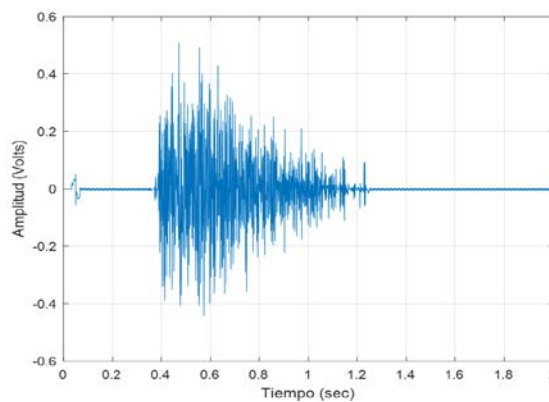


Figura 16. Señal mioeléctrica una vez aplicado el filtro de red comb

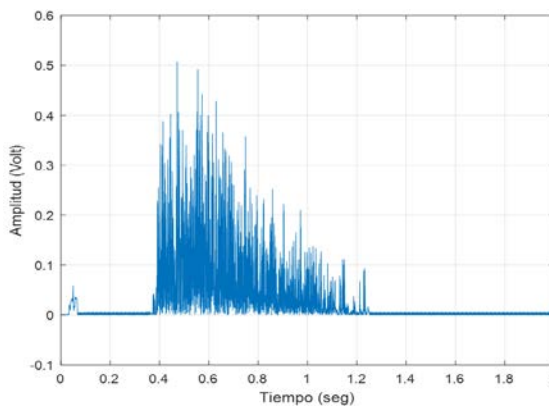


Figura 17. "Señal rectificada" o valor absoluto de esta; aquí la señal se prepara para ingresar al filtro pasabajas

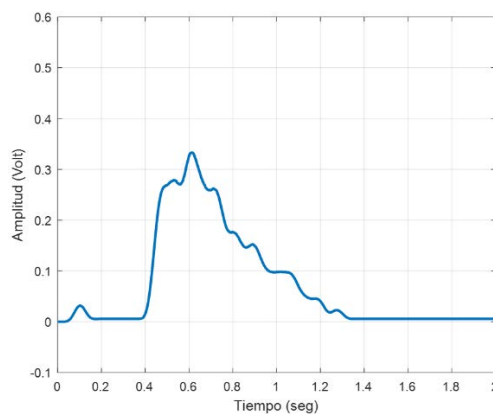


Figura 18. Señal simplificada, es la señal de salida después de aplicar el filtro pasabajas para obtener la señal envolvente

La interfaz en computador se encarga de realizar el enlace con el módulo a través de una conexión bluetooth. Cuenta con opciones que permiten indicar al microcontrolador qué tipo de señal se desea visualizar, entre las cuales se encuentran: la señal sin procesar, señal sin ruido y señal simplificada. Adicionalmente aprovechando el almacenamiento que posee el computador se puede guardar registro de las señales adquiridas para posterior visualización.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con la información recolectada sobre la naturaleza de las señales mioeléctricas se observó que éstas tienen un rango variable de frecuencias debido a que la contextura y el estado de salud de cada persona. Sin embargo, con base en las pruebas realizadas se logró identificar un rango en el cual se encuentra la mayor actividad eléctrica, este va desde los 20Hz hasta los 600Hz, por lo que siguiendo el teorema de Nyquist/Shannon se requiere una frecuencia de muestreo de 1200Hz. Aunque, con la intención de reducir la carga del microcontrolador se realizaron pruebas con frecuencias inferiores de muestreo dando resultados favorables, sin embargo, reduciendo la calidad de la señal. De lo anterior se puede concluir que, en aplicaciones como el control de prótesis, un sistema de bajo muestreo puede funcionar, puesto que aquí no importa el detalle de la señal, sino la amplitud de la misma, y este es un factor que no se ve alterado al cambiar la frecuencia de muestreo.

El filtrado digital es una excelente herramienta que trae varias ventajas en relación con el filtrado analógico; puesto que no requiere de componentes electrónicos adicionales, el volumen del dispositivo se reduce drásticamente, también reduce el tiempo de diseño y puesta en marcha debido a que los cambios se hacen en programación y no es necesario hacer recambio de componentes; esto lleva a la conclusión de que estos filtros pueden volverse dinámicos, durante la ejecución al interior del microcontrolador estos pueden modificarse y obtener un comportamiento más preciso dependiendo de la señal de entrada; de esta manera sería factible atenuar ruidos de manera selectiva sin tener que reprogramar el microcontrolador.

Se observó que el módulo no solo está en la capacidad de adquirir y procesar señales mioeléctricas, también es posible visualizar señales cardiacas sin requerir más modificación que la correcta adecuación de los electrodos en zonas específicas del cuerpo. La razón del porqué sucede esto es sencilla, el corazón también es un músculo y su actividad eléctrica entra dentro del rango de la señal mioeléctrica, así pues, se ha conseguido un dispositivo que no solamente permite captura de señales mioeléctricas, sino que también tiene la capacidad de procesar señales cardiacas.

Las posibilidades de este dispositivo son muy amplias, un módulo con estas características puede ser empleado en fisioterapia como dispositivo de monitoreo, seguimiento e incluso herramienta didáctica en ejercicios de rehabilitación. También puede ser usado en deportistas como herramienta de monitoreo, en personas con movilidad reducida como interfaz de control de dispositivos eléctricos, e incluso como dispositivo multimedia, por ejemplo, generar música al ritmo del movimiento; en general las posibilidades son muchas y muy variadas.

REFERENCIAS

- [1] M. Hernández Valdivieso, "La bioingeniería en Colombia, por el camino de las alianzas estratégicas," *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 3, pp. 10-14, 2009.
- [2] J. M. Berg, L. Stryer, and J. L. Tymoczko, *Bioquímica*. Reverté, 2007.
- [3] S. G. Hormuzdi, M. A. Filippov, G. Mitropoulou, H. Monyer, and R. Bruzzone, "Electrical synapses: a dynamic signaling system that shapes the activity of neuronal networks," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)- Biomembranes*, vol. 1662, pp. 113-137, 2004.
- [4] U. Houston. *Unit 3: Skeletal Muscle and Motor Units*. Recuperado: <https://grants.hhp.uh.edu/clayne/6397/unit3.htm>
- [5] P. D. Explains, "The Mechanism of Muscle Contraction: Sarcomeres, Action Potential, and the Neuromuscular Junction," *Anatomy & Physiology playlist*, P. D. Explains, Ed., ed. YouTube, 2019.
- [6] H. E. School, "Action Potential in the Neuron," H. E. School, Ed., ed. YouTube, 2018.
- [7] P. Konrad, "The abc of emg," *A practical introduction to kinesiological electromyography*, vol. 1, pp. 30-35, 2005.
- [8] S. Day, "Important factors in surface EMG measurement," *Bortec Biomedical Ltd publishers*, pp. 1-17, 2002.

- [9] D. Benchimol, "Microcontroladores: Funcionamiento, programación y usos prácticos," ed: Buenos Aires: Fox Andina, 2011.
- [10] J. G. Proakis, "Digital signal processing: principles, algorithms, and application-3/E," 1996.
- [11] J. M. Alvarado Reyes and C. E. Stern Forgach, "Un complemento al teorema de Nyquist," *Revista mexicana de física E*, vol. 56, pp. 165-171, 2010.

Biodegradación de láminas de polietileno de baja densidad LDPE pretratadas por radiación UV, en humus de lombriz y *Aspergillus brasiliensis*

Leidy Alejandra Calcetero Moreno¹

Diana Milena Morales-Fonseca²

Fundación Universidad de América
Colombia

La degradación de polietileno presenta una serie de dificultades al no contar con mecanismos eficientes que propicien el deterioro del material. Solamente en la ciudad de Bogotá, Colombia, se producen alrededor de 428 toneladas de este material anualmente. En ese sentido, es relevante centrar la atención en este tipo de residuos sólidos, generando una posibilidad de biodegradación del polietileno de baja densidad LDPE, mediante una matriz experimental que favorece la degradación de materia orgánica y láminas de LDPE pretratadas con radiación UV, en acción cinérgica con humus de lombriz y biomasa de *Aspergillus brasiliensis*. Las evidencias halladas de coloración opaca en las láminas de LDPE, disminución de la flexibilidad, corrugaciones, colonización del inóculo y grietas, comprueba la habilidad de una cepa de *Aspergillus brasiliensis* conservada en el laboratorio de investigación de la Fundación Universidad de América, para biodegradar LDPE con un 1,5276% y 1,5186% de pérdida de peso después de tres meses.

¹ Ingeniera Química.

Contacto: leidy.calcetero@estudiantes.uamerica.edu.co

² Microbióloga Industrial y Magíster en Ingeniería Química.

Contacto: diana.morales@profesores.uamerica.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La biodegradación es la transformación y deterioro de sustancias orgánicas por microorganismos vivos, que generan procesos de digestión y metabolización, en donde se reciclan los elementos de la biosfera, restituyendo los nutrientes esenciales para su crecimiento y formación [1].

En años recientes, se ha empezado a estudiar este proceso, con el fin de dar una solución a la problemática de la acumulación de plástico en los rellenos sanitarios. Asimismo, el humus, como matriz de biodegradación, aporta nutrientes como nitrógeno, calcio, fósforo, potasio, y un alto porcentaje de agua, que favorece la acción microbiana de bacterias y hongos sobre dichos materiales.

Los polímeros sintéticos son macromoléculas que, debido a su gran cantidad de sustancias, se convierten en sustratos potenciales para los microorganismos heterótrofos. Estos producen enzimas extracelulares capaces de actuar sobre los compuestos en la búsqueda de fuentes de carbono como alimento [2].

El polietileno de baja densidad LDPE, está conformado por cadenas ramificadas con monómeros de etileno, las cuales llegan a ser una fuente de carbono. A su vez, el LDPE es elaborado por la polimerización de etileno a altas presiones, mediante el mecanismo de radicales libres y caracterizado por excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, buena resistencia química, procesabilidad, tenacidad, flexibilidad, y un bajo costo en el mercado [3].

Los métodos de degradación del LDPE contemplan: degradación química, fotodegradación y biodegradación. Cabe destacar que varios estudios han reportado a *Aspergillus brasiliensis* como un microorganismo capaz de incentivar el proceso de compostaje con el uso de humus de lombriz, debido a la interacción con complejos enzimáticos producidos por otros microorganismos acompañantes en la descomposición de la materia orgánica. Es por esto, que el objetivo de este trabajo fue evaluar el grado de colonización y degradación de LDPE en presencia y ausencia de radiación UV.

2. MÉTODO

2.1 Microorganismo

Se usó una cepa de *Aspergillus brasiliensis* donada por la Universidad Nacional de Colombia y criopreservada en caldo de cultivo Sabouraud y glicerol al 25%, en el laboratorio de investigación de la Fundación Universidad de América. Para la propagación, se empleó cultivo en superficie en medio sólido Sabouraud, en el que se dispuso un disco agar con biomasa durante una semana. A partir de este cultivo se inocularon unidades experimentales con 75ml de caldo Sabouraud, dejando en crecimiento durante 8 días a 30°C. Posteriormente, la biomasa fue homogenizada en un procesador de alimentos, del cual se recuperaron 25ml de suspensión de biomasa que fueron implementados como inóculo de cada una de las unidades de compostaje.

2.2 Compostaje

Se empleó humus maduro cuya preparación duró 18 meses, el cual fue elaborado con residuos orgánicos de cocina (hollejos de papa, yuca, cáscaras de huevo, banano y plátano, hollejos de tomate, cáscaras y pulpa de frutas dulces), ramas y hojas secas, cartón, cascarilla de arroz y tierra negra, empleando a su vez lombrices californianas para su conformación.

2.3 Pretratamiento de las láminas de LDPE

Se seleccionaron películas calibre 1 de polietileno de baja densidad transparente de 7,5x13cm, irradiadas en una cámara de radiación UV, la cual fue construida con una lámpara de luz ultravioleta de 254 nm y una caja elaborada con metal, para un total de 9 láminas pretratadas en un tiempo de 400 horas continuas.

2.4 Diseño de la experimentación

Para el desarrollo de la investigación se eligió un diseño de experimentos completamente al azar DCA, con dos tratamientos (con y sin radiación UV), los cuales contaron con 2 repeticiones. Se realizó la manipulación del factor controlable (o variable independiente), que corresponde al pretratamiento, y los factores dependientes (o variables dependientes), como la temperatura y humedad.

2.5 Montaje de unidades experimentales

Se realizó la instalación de seis unidades experimentales utilizando el compostaje maduro (humus), inoculado con *Aspergillus brasiliensis*. A los cajones compostadores se le agregaron 609 g de humus. La distribución de los materiales se hizo de la siguiente forma: primero, se adicionó una capa de humus dentro de los cajones como base. Posteriormente dentro de cada cajón se ubicó una lámina de LDPE de forma horizontal; contando en total con dos películas irradiadas, dos sin irradiar, y dos blancos con películas con y sin pretratamiento UV (los datos de estas unidades no se consideran, solo se observa el comportamiento de los microorganismos, en comparación con las otras). Luego, se ubica el microorganismo *Aspergillus brasiliensis*, sobre 5 de las 6 láminas, y se cubre con otra capa de humus. Las unidades experimentales se mantuvieron a temperatura ambiente durante tres meses.

2.6 Análisis del proceso de biodegradación de LDPE

- *Peso seco.* Para cuantificar el peso seco recuperado de 25 ml de biomasa, en primera instancia se toma el peso de 2 tubos falcón, luego se adiciona la biomasa (25ml) y, por último, se introducen en un horno WTC Brinder a 110 °C hasta hallar peso constante.
- *Pureza.* Como parte de la determinación de la pureza de la cepa *Aspergillus brasiliensis*, se realizó un montaje en fresco, en el que se evidencian las características morfológicas (microscópicas) propias de la especie. La Figura 1 hace referencia a las pruebas de pureza realizadas con azul de lactofenol en montaje en fresco.

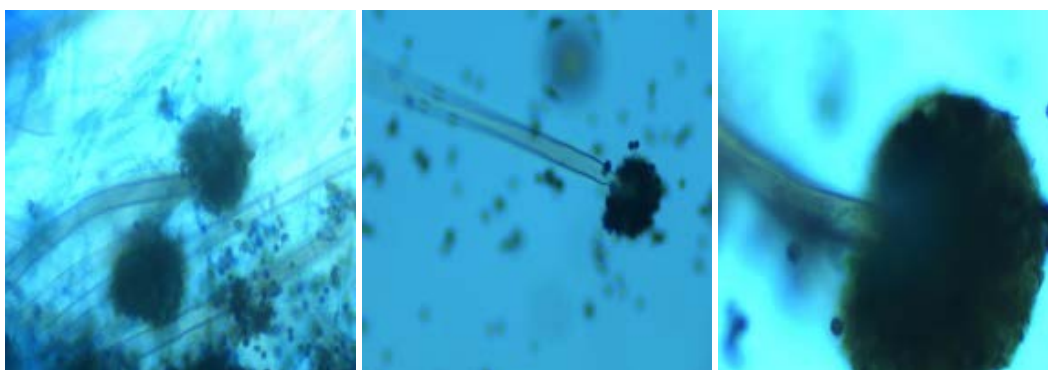


Figura 1. Caracterización morfología microscopica de *Aspergillus brasiliensis* presente en las láminas colonizadas (40X): a) Hifas y conidióforos; b) Conidios irregulares; y c) Cabezas conidiales globosas

- *Microscopía electrónica de barrido SEM.* Las láminas de LDPE con *Aspergillus brasiliensis* adherido, se retiraron del humus y se recubrieron con oro (una descarga de 20 mA / 60 s), en un equipo de revestimiento por pulverización catódica (Quorum Q150r ES). Las muestras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido (ZEISS EVO MA10), por medio del sistema de electrones secundarios con un EHT (voltaje de alta tensión de electrones) de 20.00 kV, y una distancia de trabajo de 10 a 10.5 mm. El análisis se realizó en el tercer mes del tratamiento biológico, a una muestra pretratada con radiación UV, y otra sin pretratamiento.
- *Porcentaje de biodegradación.* Las láminas de LDPE calibre 1 se cortaron en rectángulos de 7,5x13 cm y se pesaron en una balanza analítica. Luego de someterse a humus y biomasa de *Aspergillus brasiliensis*

por un tiempo de 3 meses a temperaturas entre 19,1 °C y 25,6 °C, las muestras se retiraron de las unidades experimentales, se lavaron con agua destilada en un recipiente estéril, se secaron en un horno WTC Brinder a 60°C por dos horas, y nuevamente se pesaron. La pérdida de peso presentado por el LDPE se determinó por la ecuación (1), mediante el cálculo del porcentaje de pérdida de peso.

$$\% \text{ Degradación} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad (1)$$

Donde: P_i – Peso inicial del LDPE; P_f – Peso final del LDPE después de 3 meses de biodegradación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las poliolefinas sintéticas (como el polietileno), son materiales resistentes a la degradación por microorganismos, dada su estructura con cadenas largas de carbono y enlaces covalentes C-C y C-H altamente estables [2]. La ausencia de grupos químicos fácilmente oxidables o hidrolizables, hace que las células microbianas no puedan penetrar con facilidad la superficie del polímero [4]. Sin embargo, como se observa en la Tabla 1, estudios previos sobre la biodegradación de polímeros dan cuenta de la acción microbiana, y de su capacidad para utilizar las poliolefinas de alto peso molecular como fuente de carbono.

Tabla 1. Degradación de LDPE por diferentes tratamientos.

Tratamiento	Pretratamiento	% pérdida de peso	Microorganismo	Tiempo	Referencia
Biológico	NA	5%	<i>Aureobasidium pullulan</i> , <i>Rhodotorula aurantiaca</i> , <i>Kluyveromyces spp</i>	56 días	[20]
Biológico	NA	0% - 15%	Cultivo mixto	180 días	[13]
Biológico	Químico/mecánico	10,89% (caballo) 7,87% (lombriz) 6,64% (gallina)	<i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Pseudomonas stutzeri</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Vibrio fluvialis</i> , <i>Burkholderia sp</i> , <i>Bacillus spp</i> , <i>Acinetobacter iwoffi</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Xanthomonas sp</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i> .	35 días	[15]
Biológico	NA	35,3% 22,14%	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus terreus</i>	77 días	[4]
Químico	Irradiación UV por 25 días	29,5% 15,8%	<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> , <i>Aspergillus niger</i>	126 días	[17]
Químico	Termooxidación	0,50% y 0,57% (<i>A. niger</i>) 0,64% y 0,37% (<i>P. pinophilum</i>)	<i>Penicillium pinophilum</i> , <i>Aspergillus niger</i>	961 días	[21]
Químico	Fotooxidación (25 días con radiación UV)	22.5% (<i>A. terreus</i>), 18.7% (<i>A. fumigatus</i>) y 22.6% (<i>F. solani</i>)	<i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Fusarium solani</i>	100 días	[22]
Químico	Termooxidación	Caracterización cualitativa	<i>Rhodococcus rhodochrous</i> , <i>Cladosporium cladosporoides</i> , <i>Nocardia asteroides</i>	204 días	[16]

El polietileno de baja densidad es un polímero de difícil degradación, con alto peso molecular y mínima capacidad de absorción de agua, y humedad en equilibrio [3]. Su biodegradabilidad se presenta con alteraciones en el peso molecular, la viscosidad, cristalinidad, y propiedades mecánicas. Estas modificaciones, se pueden obtener con la reducción de la longitud de su cadena por oxidación, para que sea accesible a la degradación microbiana [5].

La biodegradación de polímeros de alto peso molecular, puede ocurrir por dos mecanismos diferentes: oxidación o hidrólisis por enzimas microbianas, que mejoran el nivel hidrófilo [2]. La secreción de enzimas

extracelulares o intracelulares propician la degradación superficial del material [4], mediante la adhesión y colonización. Mientras sucede el proceso de adhesión, se producen polisacáridos como la quitina y el glicano, que permiten la fijación a la superficie del material, y las proteínas hidrofobinas [6] propiciando el incremento del micelio en la colonización y la entrada de los monómeros a las hifas.

En consecuencia, la difusión de enzimas incrementa y se produce la transformación del polímero [4] en cadenas cortas (monómeros de etileno y dímeros de butano), que pueden ser empleadas como sustrato en reacciones enzimáticas. Comenzando el proceso de oxidación, donde las enzimas del sistema ligninolítico intervienen en la depolimerización y oxidación de las cadenas de carbono [6]. Las moléculas remanentes se transforman en ácido carboxílico, que posteriormente se metaboliza en el ciclo de Krebs, formando el ácido cítrico como metabolito [7].

Labuzek et al. [8] y Sáenz et al. [4], han evaluado la degradabilidad de películas de polietileno, con la caracterización del crecimiento microbiano sobre ellas, evidenciando que la integridad del polietileno y sus principales cadenas fueron degradadas, haciéndolo más frágil e hidrófilo [4]. Por consiguiente, una mayor asimilación microbiana puede ser el resultado de moléculas de menor complejidad (polímero de bajo peso molecular), y propiedades mecánicas débiles [2]. Conforme a lo hallado por dichos estudios, en esta investigación, se observaron cambios macroscópicos en la estructura de las láminas de LDPE, después del primer mes de biodegradación (pérdida de flexibilidad, presencia de corrugaciones y pérdida de color, denotando opacidad), tanto en las muestras irradiadas con UV, como en aquellas que no tuvieron exposición. Adicionalmente, se denota la presencia del microorganismo (*Aspergillus brasiliensis*), adherido a la superficie de las muestras tratadas y no tratadas.

En la Figura 2 se observan las películas de LDPE luego de tres meses de biodegradación. En a) y b) se pueden apreciar corrugaciones originadas de la fijación y posterior colonización de *Aspergillus brasiliensis* en el material. No obstante, se hace visible una mayor colonización del hongo (aproximadamente de 81%, Figura 2a), en tanto, es más significativa su corrugación en la lámina pretratada con luz UV, al contrario de la colonización presentada por la lámina no irradiada (cerca de 60%, Figura 2b). En consecuencia, la comparación de estos hallazgos para muestras con y sin radiación UV, da cuenta de algunas similitudes con Múnera en [9] respecto a los procesos de degradación, para materiales expuestos a radiación UV, y también para aquellos que no fueron pretratados durante dos meses.

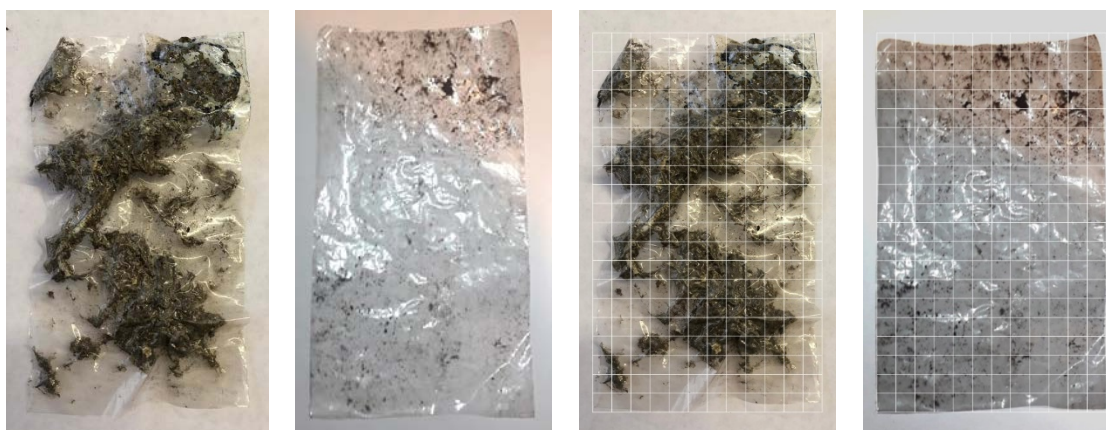


Figura 2. Láminas de LDPE colonizadas por *Aspergillus brasiliensis* luego de tres meses de incubación: a) Película pretratada; b) Película no pretratada; c) Película pretratada con plantilla para medición de la colonización; y d) Película no pretratada con plantilla para medición de la colonización

La microscopía electrónica de barrido SEM permite estudiar el mecanismo de degradación de manera microscópica, luego de encontrar cambios visuales, como crecimiento y fijación de los hongos en la superficie de las películas. Inicialmente, *A. brasiliensis* colonizó localmente el centro de la película de LDPE expuesta a radiación UV, pero con el paso del tiempo se presencié un crecimiento masivo de conidios dispersos en la superficie del material (Figura 3 a), atribuido a la actividad microbiana del inóculo. Las Figuras 3b y 3c muestran el ataque enzimático intensificado por el pretratamiento, con conglomerados de conidios

e hifas creciendo sobre la lámina, y quebrando las cadenas poliméricas. Después de tres meses de exposición de las muestras a biodegradación, la Figura 3d muestra la formación de un biofilm entre el humus y la biomasa de *A. brasiliensis*.

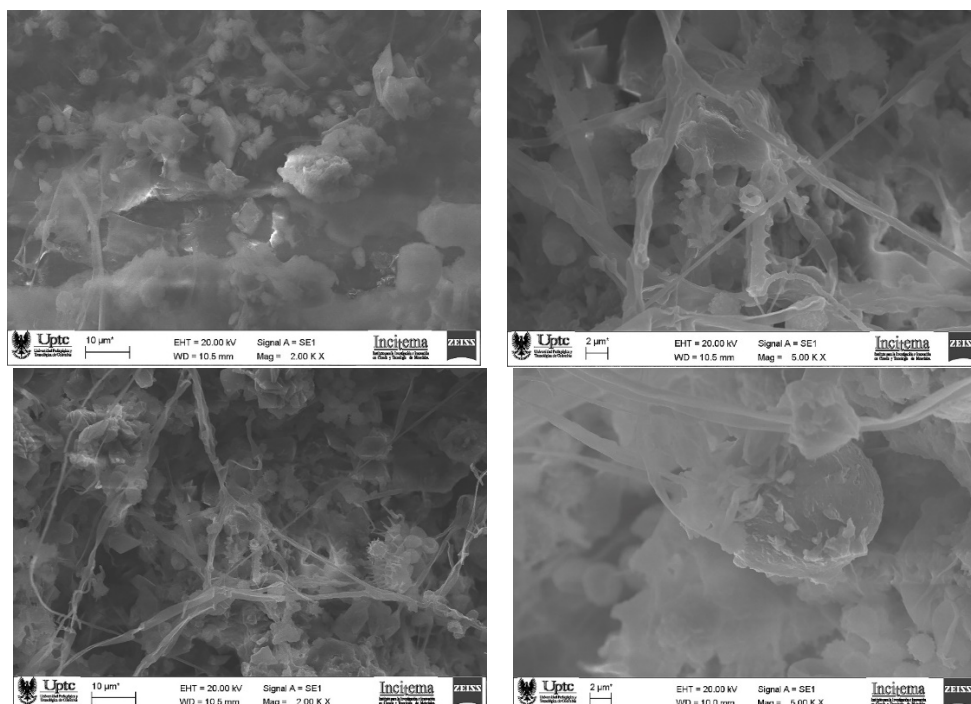


Figura 3. Micrografías SEM de la interacción de *Aspergillus brasiliensis*, sobre lámina de LDPE pretratada: a) Conidios en la superficie del material; b) Conidios ampliación 5000 x; c) Conidios e hifas ampliación 2000 x; y d) Biofilm ampliación 5000 x

La Figura 4 ilustra fotografías SEM de una lámina no expuesta a pretratamiento, en a) se percibe que la superficie de la película sometida a *Aspergillus brasiliensis* y humus, se deterioró de manera perceptible, razón por la cual se realiza un acercamiento a la imagen observada, y en b) se contemplan grietas o agujeros propios de la biodegradación generada luego de tres meses, producto de proteínas liberadas por los hongos que se ligaron a la superficie [10]. De igual forma, en a) y b) se evidencian restos de material orgánico adheridos a la superficie del material que, al retirar las muestras de las unidades experimentales, lavarlas y dejarlas secar, se convirtieron en sólidos con apariencia cristalina [11].

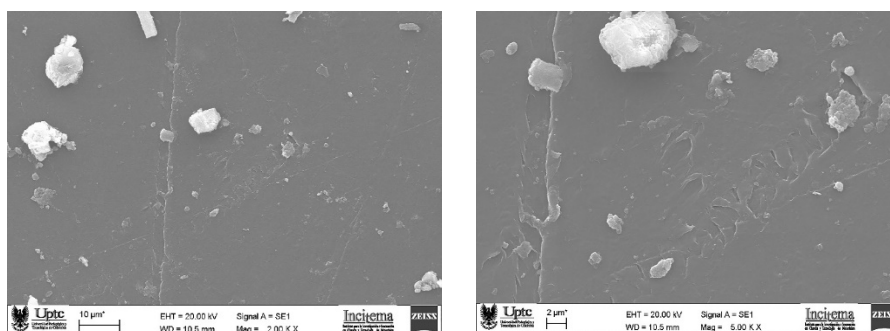


Figura 4. Micrografías SEM de la interacción de *Aspergillus brasiliensis*, sobre lámina de LDPE no pretratada: a) Deterioro del material; y b) Grietas después de tres meses de incubación

El compostaje consiste en la bio-oxidación y estabilización de los sustratos orgánicos, a través de la acción descomponedora conjunta de lombrices y microorganismos [12], cuyo producto es el humus. En general, sus características químicas y físicas, varían de acuerdo con la fuente de origen, las condiciones de operación, la actividad microbiana, y su capacidad de absorción de agua [13].

Algunas de las propiedades que distinguen al humus de otros materiales orgánicos son: el color, cuyos tonos van del café medio al café muy oscuro [13], estar compuesto por 57,55% de C, 5,73% de H, 4,13% de

N, y 32,59% de O₂ [14]. Sumado a esto, un 29% del contenido de materia orgánica, 16,9% de carbono orgánico, y su relación carbono nitrógeno es de 5,6, según Durán y Henríquez [12].

Los humus se constituyen como compuestos eficientes para la biodegradación, dada su cantidad de población microbiana presente en el estiércol, las cuales son capaces de degradar polímeros [15]. En contraste con lo mencionado, un factor determinante que aumenta el valor del compostaje es la conversión de envases de poliolefinas degradables a biomasa celular [16]. En ese orden de ideas, es relevante puntualizar sobre la cantidad de microorganismos presentes en el humus, resaltando a: *Acinetobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Aspergillus sp.*, *Candida sp.* y *Flavobacterium sp* [15].

Por lo anterior, al asegurar el proceso de colonización y degradación, es esencial monitorear el pH, la temperatura y la humedad. Estos parámetros se comportaron de acuerdo a ciertas condiciones encontradas en la literatura consultada para el compostaje con humus de lombriz [13], y sus resultados se muestran en la Tabla 2. Respecto a los valores de pH hallados, se registraron entre 6,14 y 7,14, iniciando con valores ácidos, que provenían de la descomposición de los azúcares. En la sexta y séptima semana, persiste la actividad fúngica con la colonización del material, sin ningún cambio aparente en el pH. La cercanía de estos valores a la neutralidad en las últimas semanas del estudio, se atribuye a la amonificación de los componentes nitrogenados [17], y el consumo de los ácidos orgánicos por parte de los microorganismos.

Los hallazgos sugieren que las temperaturas donde los hongos filamentosos logran una mayor actividad degradativa frente al polietileno, es entre los 20 y 30°C [18]; dado que, durante el periodo de incubación, la temperatura de las unidades experimentales se encontró en un rango de 19,1°C y 25,6°C. En las semanas 1 y 2 se presentó el mayor incremento con temperaturas de 21,4°C, 22,8°C, y 25,6°C, siendo este fenómeno causado por la actividad del microorganismo sobre las fuentes de carbono y nitrógeno, generando calor. Como resultado de lo anterior, estas condiciones propiciaron el avance de la colonización en la etapa inicial del proceso, como lo refleja el montaje 1 en la Tabla 2.

Tabla 2. Seguimiento a condiciones de pH, temperatura y humedad en tres momentos de la incubación de *A. brasiliensis* con humus

Medición	Montaje	pH	Temperatura	% Humedad
Inicial	1	6,84	20,1	66
	2	6,86	22,8	63
	3	6,37	25,6	66
	4	6,29	21,4	64
	5	6,19	22,8	63
Intermedio	Extra	6,14	20,1	61
	1	6,95	19,9	59
	2	7,04	18,9	65
	3	7,07	19,3	61
	4	6,91	20,9	59
	5	7,14	19,6	59
	Extra	6,99	20,2	58
Final	1	6,32	19,7	86
	2	6,75	19,3	87
	3	6,35	19,1	85
	4	6,69	19,3	76
	5	7,01	19,1	80
	Extra	6,79	20,5	75

El comportamiento de la humedad depende del contenido inicial de agua en los sustratos y del proceso de biodegradación, aun así, se puede controlar [19], por ello se realizó la adición de agua a cada uno de los montajes dos veces por semana, haciendo volteos en el humus, y midiendo sus valores con un higrómetro. El aumento de la humedad fue directamente proporcional a la condición climática, demostrando incrementos en días lluviosos. La humedad fue del 64% inicialmente y finalizó en 82%, estos valores se sitúan dentro de los rangos especificados por Bohórquez (40-60%) [23], y por Esmaeili y otros (70-90%) [17].

Cabe mencionar que los porcentajes superiores a 90%, favorecen la formación de núcleos que no cuentan con la presencia del oxígeno, afectando el proceso de biodegradación aerobia [19].

La mayoría de los polímeros comerciales experimentan reacciones químicas cuando se irradian con luz ultravioleta (UV), porque poseen constituyentes capaces de absorberla (grupos cromofóricos) [24]. La radiación UV-C con longitud de onda entre 100-280 nm, presenta suficiente energía para romper los enlaces covalentes y comenzar la degradación, particularmente, en el caso del polietileno se presenta con la rápida reducción de la longitud media de la cadena e incorporación del oxígeno. Es preciso señalar que, la presencia de radiación ionizante en conjunto con oxígeno, es muy dañina para los polímeros [24], y puede producir reacciones cuyo resultado son etilenos, butanos, alquenos, y ésteres, fácilmente aprovechables por microorganismos.

En este estudio se comprueba que el pretratamiento con radiación UV promueve el proceso de degradación de LDPE, con el rompimiento de la cadena del polímero, e incentiva la colonización de *Aspergillus brasiliensis*, mediante el ingreso de los monómeros del material a las hifas del microorganismo, para ser empleado como fuente de carbono. Es por ello que, para las unidades experimentales dispuestas con una lámina de LDPE pretratada y sometida a humus de lombriz californiana por 3 meses, se presentan porcentajes de degradación de 1,5276% y 1,5186%. En contraste con los valores obtenidos por las unidades experimentales con láminas de LDPE sin previo tratamiento por radiación UV, que en este estudio fueron 0,6212% y 0,6152% (Figura 5).

Es importante mencionar que los procesos de degradación en este tipo de matrices (humus), representan interacciones microbianas por parte de *A. brasiliensis* y la microbiota propia del humus, permitiendo la asimilación de polímeros de alta complejidad en moléculas con una mayor biodisponibilidad para otro tipo de comunidades microbianas que puedan llevarlo hasta CO₂.

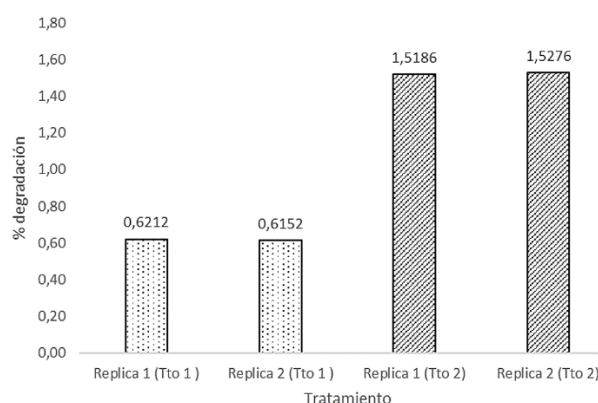


Figura 5. Porcentajes de degradación de láminas de LDPE irradiadas con UV y sin UV, incubadas por tres meses en humus y *A. brasiliensis*. (Tto 1: humus + microorganismo + LDPE no irradiado con UV; Tto 2: humus + microorganismo + LDPE irradiado con UV)

4. CONCLUSIONES

En esta investigación, una cepa de *Aspergillus brasiliensis* fue capaz de adherirse a la superficie del LDPE, utilizándolo como fuente de carbono y energía, demostrando crecimiento y degradación de las láminas, y dando cuenta de la posibilidad de hallar microorganismos que pueden incidir en el proceso de biodegradación de polímeros. Lo cual se evidenció por caracterización por SEM de las láminas. Por lo tanto, es indispensable estudiar las acciones enzimáticas de *A. brasiliensis*, que desempeñan un papel vital en la biodegradación del LDPE.

La mediación de la irradiación UV influye en la degradación del polietileno. No obstante, las muestras que no fueron expuestas a ningún tipo de tratamiento, tuvieron una respuesta favorable durante el proceso de biodegradación. Por lo cual, se podría decir que *A. brasiliensis* es efectivo degradando la matriz del polímero, teniendo en cuenta los cambios físicos en las láminas y la colonización de las mismas.

Los procesos de degradación de este tipo de polímeros complejos como el LDPE, pueden requerir tiempos superiores a los 90 días con el fin de obtener porcentajes de degradación similares a los de otros procesos químicos y físicos.

REFERENCIAS

- [1] G. López, "Ventajas y desventajas de los plásticos degradables para su aplicación en la agricultura sustentable o ecológica". Centro de investigación en química aplicada, Coahuila, México, 2012. Recuperado: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/371/1/Gorgonio%20Lopez%20Tolentino.pdf>
- [2] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, S. Ahmed, "Biological degradation of plastics: a comprehensive review", *Biotechnology Advances*, vol. 26, no. 3, pp. 246-265, 2008.
- [3] M. Gilbert. "Brydson's Plastics Materials". Ed. Elsevier, 8va ed. 2017.
- [4] M. Sáenz, T. Borodulina, L. Díaz, & C. Banchon "Minimal conditions to degrade low density polyethylene by *Aspergillus terreus* and *niger*", *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 44-51, jul. 2019.
- [5] D. Bikiaris J. Aburto I. Alric E. Borredon M. Botev C. Betchev C. Panayiotou, "Mechanical properties and biodegradability of LDPE blends with fatty-acid esters of amylose and starch", *Journal of Applied Polymer Science* Vol.71 pp. 1089-1100, 14, February 1999.
- [6] D. A Moreno Bayona, "Biotransformación de polietileno de baja densidad (LDPE) y LDPE oxo-biodegradable empleando *Pleurotus ostreatus* y residuos lignocelulósicos de pino (*Pinus caribaea*)", Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2018.
- [7] J.M. Restrepo, A. Bassi, & M.R. Thompson, "Microbial degradation and deterioration of polyethylene: a review", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol 88, 83-90. 2014.
- [8] S. Łabużek, B. Nowak, J. Pająk, "The susceptibility of polyethylene modified with bionolle to biodegradation by Filamentous Fungi", *Polish Journal of Environmental Studies* vol. 13, no. 1, pp. 59-68, 2004.
- [9] D. C., Múnera, "Degradación del polietileno de baja densidad por *Aspergillus niger*". Universidad De Los Andes, Colombia, 2014.
- [10] N. Acuña, "Revisión bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en el material. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [11] G. Ruíz, C. Montoya y M. Paniagua, "Degradabilidad de un polímero de almidón de yuca", *Revista EIA*. 2009, no. 12. pp. 67-78.
- [12] L. Durán, C. Henríquez, "Caracterización química, física y microbiológica de ver micompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos", *Revista Agronomía Costarricense*, vol. 31, no. 1, pp. 41-51.
- [13] M. Ruiz, K. Pastor y A. Acevedo, "Biodegradabilidad de artículos desechables en un sistema de composta con lombriz", en *Revista Información tecnológica*, vol. 24, no. 2, pp. 47-56.
- [14] M. R. Melgarejo, M. I. Ballesteros, M. Bendeck, "Caracterización de la fracción orgánica de humus de lombriz y composts producidos a partir de diferentes sustratos", en *Revista Colombiana de Química*, vol. 27, no. 2.
- [15] M. Meza, "Biodegradabilidad del polietileno tereftalato y de oxopolietileno, a nivel de laboratorio, por la acción de bacterias nativas presentes en humus de lombriz, caballo y gallina", Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
- [16] S. Bonhomme, A. Cuer, A-M. Delort, J. Lemaire, M. Sancelme, G. Scott, "Environmental biodegradation of polyethylene", en *Polymer Degradation and Stability*, vol. 81, pp. 441-452. 2003.
- [17] A. Esmaili, A. A. Pourbabaee, H. A. Alikhani, F. Shabani, y E. Esmaili, "Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by mixed culture of *lysini bacillus xylanilyticus* and *Aspergillus niger* in soil", in *Journal Plos One*, 2013.
- [18] V. C. Gonzales, "Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno", Universidad Nacional de Altiplano, Perú, 2019.
- [19] M. F. Rabell Contreras, et al, "Estudio de factibilidad de biodegradación de plásticos mediante composteo", en *Hacia la sustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, pp. 519-523, México, 2011.
- [20] S. Kumar, A.A.M. Hatha, & K.S. Christi, "Diversity and effectiveness of tropical mangrove soil microflora on the degradation of polythene carry bags," en *Rev. Biol. Trop.*, vol. 55, pp. 777-786, 2007.
- [21] T. Volke, G. Saucedo, M. Gutiérrez, A. Manzur, E. Favela, "Thermally treated low density polyethylene biodegradation by *Penicillium pinophilum* and *Aspergillus niger*", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 83, issue 2, pp. 305-314, 2002.
- [22] S. Zahra, S. Seyed, A. Mohammad, M. N. Mohsen, "Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by isolated fungi in solid waste medium", in *Waste Management*, vol. 30, issue 3, pp. 396-401, 2010.
- [23] W. Bohórquez, *El proceso de compostaje*. Ed. Unisalle, Bogotá, 2019.
- [24] B. Posada, "La degradación de los plásticos", *Revistas Académicas*, vol. 30, no. 94.

Uso de lodos aceitosos en la estabilización de suelos

José Rodrigo Alarcón Dallos¹

Richard Andrés Benítez Galindo²

Manuel Antonio Jiménez Caro³

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

El estudio de estabilización de suelos surge como alternativa en la construcción de vías para reemplazar los materiales convencionales usados en las capas granulares y/o mejorar la sub-rasante de las estructuras del pavimento, a la vez que se aprovechan los residuos de la extracción del petróleo para mitigar los impactos negativos al medio ambiente. Se emplearon suelos de la región de Tunja, Colombia, un material granular y un suelo arcilloso de sub-rasante, los cuales fueron caracterizados y posteriormente mezclados con diferentes porcentajes de lodo aceitoso, a estas mezclas, se les realizó diferentes ensayos para determinar sus propiedades y analizar el posible comportamiento en campo. Las mezclas de material granular con lodo aceitoso, se evaluaron mediante California Bearing Ratio CBR, expansión en el ensayo CBR y la acción del agua en las mezclas por medio del ensayo de estabilidad hídrica. La evaluación del material de sub-rasante y mezclas de sub-rasante lodo aceitoso, se realizó mediante parámetros físicos como la estabilidad hídrica, ensayos de ascensión y absorción capilar y límites de consistencia. Igualmente, se realizó caracterización dinámica por medio de los ensayos de módulo resiliente en el equipo Nottingham Asphalt Tester NAT, para los materiales naturales y mezclados con lodo aceitoso, esto con el fin de determinar el aporte del lodo a las propiedades dinámicas de los materiales. Se determinó que con la adición del 6% de lodo se mejora, de la mejor forma, las propiedades de resistencia y plasticidad del material granular y 4% para la sub-rasante, con periodos de curado de 26 días. Finalmente, se realizó un análisis económico comparativo para la implementación de una capa de material granular sin estabilizar y estabilizada en una estructura de pavimento flexible para un nivel de tránsito 2.

¹ Ingeniero en Transportes y Vías, Magíster en Ingeniería.

Contacto: joserodrigo.alarcon@uptc.edu.co

² Ingeniero en Transportes y Vías.

Contacto: andresbent2014@gmail.com

³ Ingeniero en Transportes y Vías.

Contacto: majc694@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En un país en desarrollo como Colombia, en el cual su principal medio de transporte es por carretera, la necesidad de infraestructura vial va en aumento demandando materiales de calidad, que muchas veces son de difícil consecución. Ante tal situación surgen alternativas constructivas, entre ellas, la estabilización de suelos con diversos agentes estabilizantes como asfalto, cemento, cal y los aceites que mejoran propiedades ingenieriles de los suelos y los hacen aptos para su utilización en las diferentes capas de un pavimento.

En este estudio se analizó la factibilidad de usar lodo aceitoso como agente estabilizante de materiales granulares y suelos de sub-rasante, buscando mejorar propiedades de resistencia y plasticidad y a su vez aprovechar los residuos de la extracción del petróleo, en aras de mitigar los impactos negativos al medio ambiente generados por estos.

Para lo anterior se caracterizó los materiales a estabilizar y el agente estabilizante, se realizaron mezclas adicionando diferentes porcentajes de lodo aceitoso a los materiales mencionados y a cada mezcla se le realizó ensayos de resistencia, plasticidad y estabilidad hídrica, para determinar el posible comportamiento del nuevo material y el porcentaje óptimo de lodo por utilizar.

2. MARCO CONCEPTUAL

Las operaciones en los campos petroleros incluyen el manejo en subsuelo o superficie de aguas de formación asociadas a la producción de hidrocarburos, en Ecopetrol, para mitigar el impacto ambiental causado por estas condiciones, ha decidido implementar en el área de la estación Acacias, un sistema de manejo eficiente de lodos, a través de un procedimiento combinado de separación de aceite y posterior deshidratación de las borras obtenidas, para disminuir los volúmenes que se transportan, y a la vez, recuperar parte del aceite que se pierde con este material [1].

2.1 Lodo aceitoso

Los efectos ambientales de la explotación de petróleo, abordadas desde la perspectiva de la geografía económica y la geografía ambiental, permite desarrollar y utilizar métodos y técnicas para dimensionar de forma integral el conflicto existente en zonas de explotación de petróleo, como es el caso del Piedemonte llanero en el departamento de Casanare, así como en otras áreas de similares características [2].

La biorremediación, se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora a las tradicionales técnicas físico-químicas para la remediación de los compuestos que contaminan el ambiente. Los lodos generados en al área de Apiay, Colombia, son tratados con esta técnica, práctica ambiental eficiente para el tipo de residuo generado, ya que permite reducir o remover los residuos potencialmente peligrosos presentes en suelos, lodos, aguas superficiales, subterráneas y residuales; así como gases, sin embargo, a pesar de sus beneficios, se presentan dificultades en la aplicación debido a las restricciones impuestas por el sustrato y variabilidad ambiental, el potencial limitado de biodegradación y la viabilidad de los microorganismos de origen natural, entre otras [3].

El volumen de lodo aceitoso se incrementa año a año, lo que ha llevado a la implementación de diferentes proyectos para dar una disposición o uso alternativo al material logrando mitigar el impacto ambiental que se produce en el lugar de almacenamiento. Este residuo puede ser usado como mezcla de revestimiento de carreteras, que posea características de densidad de mezcla y contenido de metales consistentes con las aprobadas para asfalto de carreteras o mezclas [4].

2.2 Estabilización de suelos

El objetivo de la estabilización de un suelo es mejorar las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia, con permanencia en el tiempo. El diseño de una estabilización con aditivo incluye clasificar el suelo, determinar el tipo y cantidad de estabilizante y el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. Es difícil establecer patrones de

estabilización de materiales, sobre todo cuando se tiene una gran diversidad de métodos de diseño de pavimentos [5].

Al seleccionar un agente estabilizante no tradicional, es necesario entender los mecanismos de estabilización, teniendo como punto de partida claridad del objetivo que se busca y así efectuar la elección correcta del producto a utilizar. En este proceso pueden intervenir muchas variables como el tipo de suelo o material existente, características de la ruta, clima, entre otros [6].

El diseñador de pavimentos debe, cuando no dispone de materiales aptos para la construcción de las capas del pavimento, tomar la decisión sobre el tipo de tratamiento de estabilización más adecuado para hacerlos aptos para la construcción de dichas capas, igual pasa en el caso de las sub-rasantes débiles. En algunos casos se procede a retirar el material arcilloso y reemplazarlo por otro tipo de suelo adecuado para el fin de una obra de construcción vial.

Otra alternativa es tratar los suelos arcillosos mediante la estabilización, proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Si el diseño y técnica constructiva es la apropiada, esta estabilización da como resultado suelos arcillosos que se pueden utilizar como estructura de pavimento [7].

Hoy por hoy en Colombia es de uso frecuente la estabilización química de suelos, sea con cal, cemento, polímeros o aditivos químicos. Así mismo en las zonas costeras, la estabilización o mejoramiento de suelos de sub-rasantes pobres, con adición de cemento y suelos de mejor calidad, es de uso frecuente, para solucionar los problemas de humedad del suelo y baja capacidad portante [8].

Las principales ventajas de la estabilización química son que el tiempo de fraguado y el tiempo de curado pueden controlarse. Sin embargo, la estabilización química es generalmente más costosa que otros tipos de estabilización y puede causar riesgos ambientales. Los estabilizadores químicos pueden tener tres divisiones según su objetivo: cubrir e impermeabilizar las partículas de arcilla; establecer una mejor unión entre las partículas de arcilla; suministrando fuerza y estabilidad y modificar el entorno del sistema agua-arcilla, con la cual se tendrá una menor plasticidad; posibles cambios de volumen creando uniones cementantes que corregirá la resistencia [9].

Para comprobar la efectividad y las consecuencias de la estabilización química de suelos, se realizan pruebas como el CBR, el Unconfined Compressive Strength UCS y la reducción del Índice de Plasticidad (Límite Líquido-Límite Plástico), entre otros. Estas pruebas son las más comúnmente usadas, en especial el CBR para medir la resistencia a la compresión de un suelo (antes y después). También es importante realizar una valoración técnico-económica [10].

3. MÉTODO

1. Fase 1: *Revisión bibliográfica*. En esta etapa se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte referente a los diferentes métodos y agentes de estabilización de suelos y a los lodos aceitosos producto de la extracción del crudo, y se definió el tipo de estabilización a utilizar en la investigación.
2. Fase 2: *Caracterización de materiales*. Se realizó la recolección del material granular, de sub-rasante y lodo aceitoso con su respectiva caracterización física, química y mecánica.
3. Fase 3: *Realización de estabilizaciones*. Se realizó las mezclas de material granular y de sub-rasante con diferentes porcentajes de lodo aceitoso como agente estabilizante, a cada mezcla se le realizaron ensayos de caracterización.
4. Fase 4: *Análisis de resultados*. Se analizó, desde el punto de vista técnico, económico y constructivo, la factibilidad de estabilizar suelos con lodo aceitoso y se determinó, a manera de recomendación, el porcentaje de lodo a utilizar para mejorar las propiedades mecánicas de un material granular y de sub-rasante.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Caracterización del material granular

La curva granulométrica del material granular se asemeja a un afirmado A-25, como muestra la Figura 1.

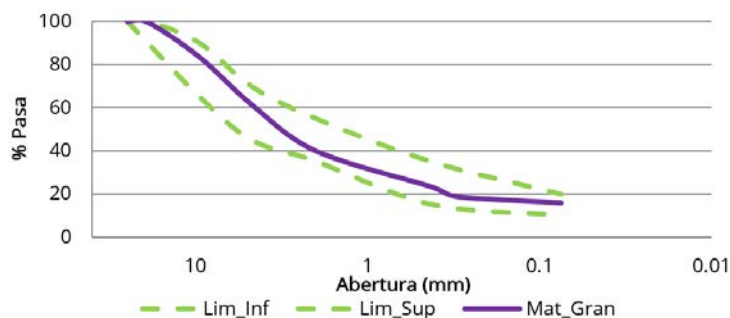


Figura 1. Curva granulométrica del material granular y afirmado A-25

Según la SUCS, el material está compuesto por 15.8% de finos, 45.7% de arena y 38.5% de grava y se clasifica como un limo, y según la AASHTO, se clasifica como A-2-4. La curva de compactación del ensayo Proctor Modificado aparece en la Figura 2.

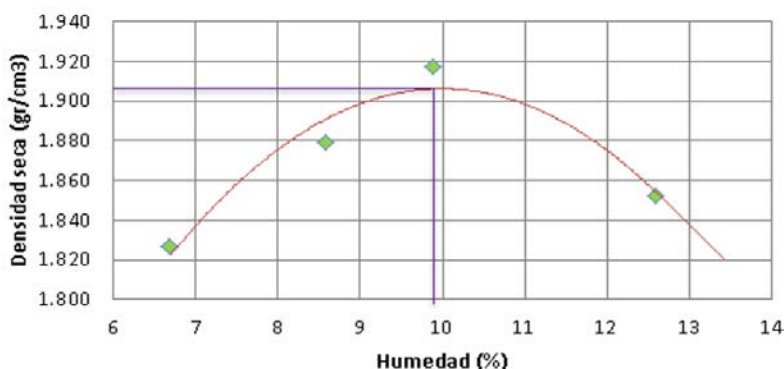


Figura 2. Curva de compactación del material granular

La relación de vacíos es de 0.318, es decir un suelo relativamente compacto y una porosidad de 0.24 indicativo que el suelo presenta baja capacidad de absorber agua.

El material granular presenta un CBR promedio de 30% al 90% de la densidad seca, con una expansión máxima de 0.44%, relativamente baja por lo que muy probablemente no genera mayores problemas en la estructura de un pavimento. Otros ensayos realizados al material granular se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado ensayos de caracterización del material granular

Ensayo	Norma INV	Requisito	Resultado	Cumple
Desgaste en máquina de los Ángeles (%)	218	Máximo 50	40	Sí
Solidez en sulfato de magnesio (%)	220	Máximo 18	4.7	Sí
Límite líquido (%)	125	Máximo 40	35	Sí
Límite plástico (%)	125	...	27	...
Índice de plasticidad (%)	125-126	4 a 9	8	Sí
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznablez (%)	211	Máximo 2	5.4	No
CBR (%): asociado al 90% de la densidad seca máxima y sometido a 4 días de inmersión	148	≥ 15	30	Sí

Analizando en conjunto los resultados de los ensayos de caracterización del material granular, a la luz de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras [11], el agregado cumple como un afirmado A-25, exceptuando el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznablez el cual está por encima del porcentaje máximo permitido. La plasticidad es del 8%, un poco alto dado la presencia de material arcilloso determinado en la granulometría del material.

4.2 Caracterización del material de sub-rasante

El índice de plasticidad es 17%, un poco alto para un suelo de sub-rasante. Según la SUCS, se determinó que el material es una arena con presencia de arcillas o limos o arena arcillosa (SM). Según AASHTO, es un suelo A-2-6. En el ensayo de compactación Proctor Modificado tipo A., se obtuvo como densidad seca máxima 1.92 gr/cm^3 y humedad óptima de compactación 12%.

Ensayo de ascensión capilar. En la Figura 3 se muestra la evolución del ensayo, en la cual se observa que la mayor pendiente de ascensión se da en los primeros 80 minutos con el 40%, a partir de ahí el incremento es del 10% para cada uno de los intervalos adoptados para el ensayo, hasta llegar a una ascensión en la totalidad de la probeta a las 6 horas de iniciado el ensayo.

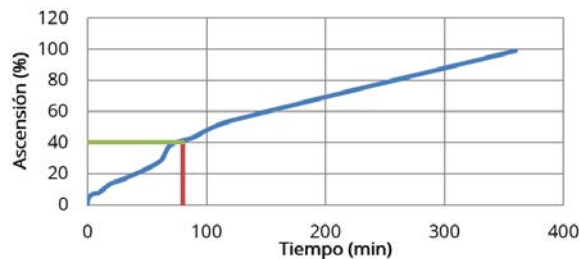


Figura 3. Curva ascensión capilar para material de sub-rasante

Ensayo de absorción capilar. La adición de productos químicos al suelo de sub-rasante se perfila como una solución interesante para estudiar, aprovechando las condiciones iniciales de los terrenos procurando elevar la resistencia, con la respectiva densificación de la estructura y las implicaciones que esto acarrearía en el retardo en la absorción de agua por el conjunto de capas del pavimento [12]. En la Figura 4 se observa el incremento de peso por unidad de área de la probeta, teniéndose el mayor incremento en el intervalo de tiempo de 1 hora.

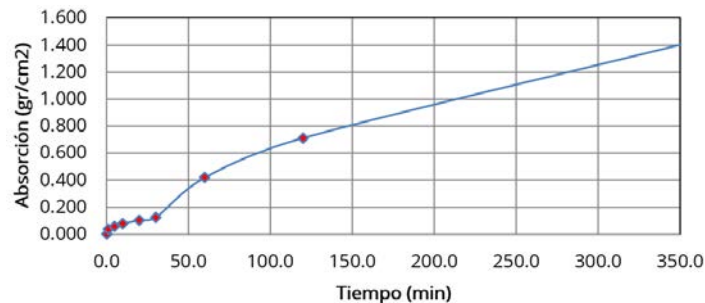


Figura 4. Curva de absorción capilar del material de sub-rasante

Debido al alto potencial de absorción del material de sub-rasante, se produjo la desintegración de la briqueta rápidamente, el colapsó se produjo a las 6 horas de iniciado el ensayo, como se observa en la Figura 5.



Figura 5. Briquetas después del ensayo de absorción capilar

Estabilidad hídrica. Luego de la inmersión, inmediatamente se presentó gran pérdida de material, a los 30 minutos de inmersión, hay pérdida de material en mayor medida como se observa en la Figura 6. A las 8 horas de ensayo se produce el colapso total de la probeta.

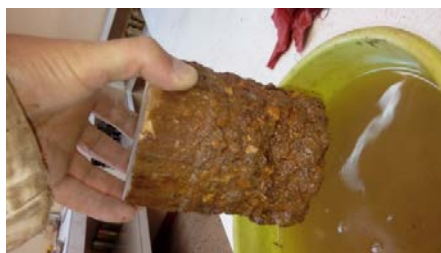


Figura 6. Ensayo de estabilidad hídrica a los 30 minutos

4.3 Caracterización del agente estabilizante - lodo aceitoso

Por medio del ensayo de fluorescencia de rayos x se determinó la composición química del lodo aceitoso, en la Figura 7 se muestra el espectro obtenido.

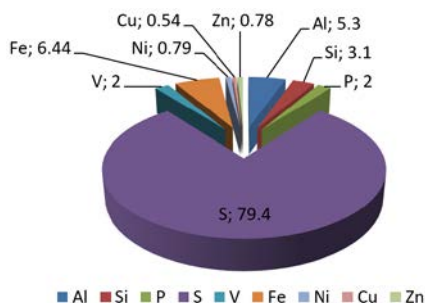


Figura 7. Espectro de composición química del lodo aceitoso

Según la densidad relativa del lodo en estudio, su gravedad API es 10, que, de acuerdo con la clasificación establecida para los crudos [13], es un crudo extra pesado.

4.4 Proceso de estabilización

A falta de un procedimiento normado para la estabilización con lodo aceitoso y siguiendo la tendencia general en las estabilizaciones, se decidió elaborar mezclas con la adición de diferentes porcentajes de lodo aceitoso con el fin de identificar el mejor comportamiento o tendencia de desempeño del material estabilizado mediante la medición de ciertas características físicas y de resistencia. En la Figura 8 aparece el diseño experimental utilizado para los procesos de dosificación, elaboración, curado y ensayo de las mezclas de material granular y sub-rasante con lodo aceitoso.

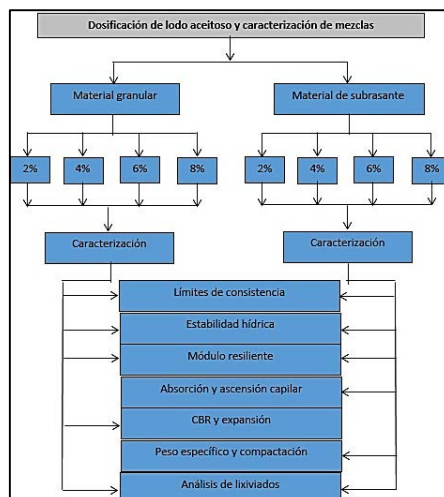


Figura 8. Diseño experimental de la investigación

En la carretera La Primavera – Puerto Carreño, Colombia, se evaluó las propiedades de resistencia y durabilidad de los suelos arcillosos de baja plasticidad, mediante la adición de silicato de sodio, se elaboraron muestras compactadas en laboratorio y curadas en condiciones ambientales controladas de humedad relativa y temperatura, representativas de la zona en estudio. Se utilizaron diferentes porcentajes de silicato de sodio, para edades de 0, 7 y 14 días, para seleccionar el porcentaje óptimo de sales, que permitiera obtener las mayores resistencias en ensayos de compresión y las menores pérdidas en el ensayo de desleimiento durabilidad [14].

4.4.1 Resultados de la estabilización del material granular

Se determinó el CBR de la mezcla para el 2%, 4%, 6% y 8% de lodo aceitoso y para curado durante 4 días en inmersión; en seco durante 14 días y curado de 14 días con 7 días en inmersión y 7 días en seco. La tendencia general indica que el mayor aumento de CBR del material estabilizado, respecto al material no tratado (30%), se da con la adición del 4% de lodo y periodo de curado de 14 días en seco (52%). Así mismo, el material no tratado aumenta su CBR con 4% de lodo, independientemente del periodo de curado, en todos los casos, como se observa en la Figura 9.

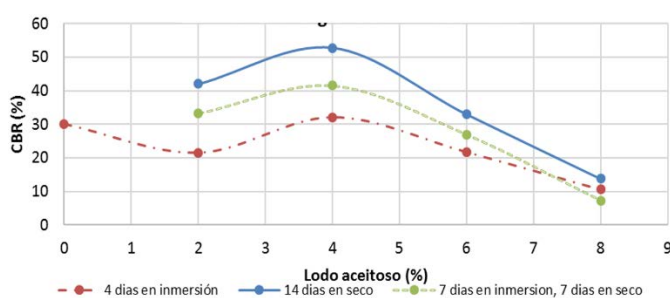


Figura 9. CBR de material granular - lodo aceitoso

Se determinó la expansión a las muestras de CBR, concluyendo que todas las medidas de expansión para las muestras estabilizadas son menores a la expansión del material no tratado, es decir, el lodo agregado al material hace que se disminuya el efecto del agua sobre el material granular. En la Figura 10 se muestra la magnitud de la reducción en los valores de expansión.

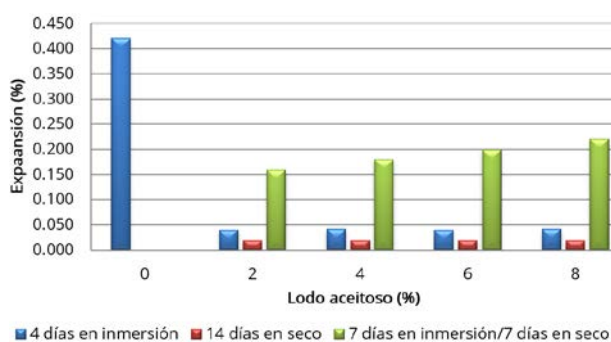


Figura 10. Expansión del material

La estabilidad hídrica se realizó a las briquetas del ensayo CBR para las muestras sin y estabilizadas, en la Figura 11 se muestra aspectos de realización del ensayo, la briqueta sin estabilizar presentó una ligera pérdida de material a los 5 minutos, a las 11 horas se desintegró en un 60%, luego de 24 horas falló en más del 90% y se destruyó al quinto día; las probetas estabilizadas no presentaron variación.



Figura 11. Estabilidad hídrica luego de 24 horas de ensayo

La adición de lodo aceitoso al material granular hace que este baje su plasticidad del 8% a N.P. a partir del 6% de lodo; con el 4% de lodo baja hasta el 7%; es decir el efecto favorable, en esta propiedad en el material granular ocurre con adición de lodo por encima del 6%.

La baja sensibilidad a la presencia de agua producido por el lodo aceitoso sobre el suelo granular es de gran utilidad, si se tiene en cuenta que el comportamiento de los suelos compactados, depende de su densidad seca máxima y de su contenido de agua. En los suelos de baja plasticidad, los cambios de humedad producen deformaciones por colapso cuando se humedecen, esta deformación se acentúa en suelos poco compactados, por estar parcialmente saturados y puede cambiar su estabilidad volumétrica [15].

4.4.2 Resultados de estabilización de la sub-rasante

Los pesos específicos de las mezclas disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de lodo aceitoso, esto dado que el peso específico del lodo aceitoso es inferior al peso específico de la sub-rasante. El índice de plasticidad disminuye a medida que se adiciona lodo al material de sub-rasante hasta un 6%, con el 8% de lodo el efecto es nulo y el material presenta la misma plasticidad que el material no tratado. La adición de lodo a la sub-rasante no afecta en gran medida la humedad óptima y la densidad seca máxima.

La ascensión capilar en las probetas estabilizadas fue nula, caso contrario ocurrió en las probetas de sub-rasante original. El lodo aceitoso mejora la impermeabilidad de la sub-rasante retrasando la ascensión del agua hacia el interior de la probeta, reduce la pérdida de material que le genera el agua y la disminución de la resistencia. En el ensayo de estabilidad hídrica se encontró que luego de 5 minutos de inmersión no ocurrió cambio alguno en las probetas; después de 20 días de inmersión, en las briquetas con 2 y 4% de lodo, se observó cierto grado de saturación sin colapsó ni desprendimiento de material, mientras que en las briquetas con 6 y 8% de lodo no se presentó cambio alguno.

En el estudio de la sub-rasante para pavimentos es muy importante su capacidad de soporte, para ello es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen, una vez que cambios de volumen conllevan a daños en las estructuras que se apoyen sobre este. Por esta razón, cuando se construye un pavimento sobre este tipo de suelos deberá tomarse la precaución de impedir las variaciones de humedad del suelo para la cual habrá que pensar en la impermeabilización de la estructura [7], aspectos que se logran mediante la adición de lodo aceitoso a la sub-rasante en porcentaje del orden del 6% en peso.

4.4.3 Análisis de lixiviados en las mezclas

Se realizó con el fin de evaluar la problemática ambiental que puede generar el uso de las mezclas estabilizadas con lodo aceitoso, al estar expuestas a las lluvias y su escorrentía. Las características de los lixiviados son muy variables y dependen de la interacción de muchos factores, como la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, la tasa de precipitaciones, la hidrología del lugar, la compactación, los procedimientos de muestreo y la interacción entre los lixiviados y el medio ambiente [16]. Las probetas de las mezclas estabilizadas se sometieron a saturación durante 15 días, luego se realizó el muestreo del agua mediante fluorescencia de rayos X, los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Componentes del agua antes y después de inmersión durante 15 días

Componente	Al	Si	P	S	V	Fe	Ni	Cu
Componentes de la muestra de agua antes de inmersión de probetas								
Contenido	3	0	2	91.3	1	0.9	0.8	0
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Componentes de la muestra de agua después de inmersión de probetas material granular - lodo								
Contenido	2	0.6	2	91.9	1	0.9	0.7	0.3
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%
Componentes de la muestra de agua después de inmersión de probetas sub-rasante - lodo								
Contenido	3	0.6	2	91.2	1	1	0.9	0
Unidad (%)	%	%	%	%	%	%	%	%

Para la mezcla lodo-material granular, se encontró que quedan trazas en el agua de elementos como silicio (Si), azufre (S) y cobre (Cu); mientras que para las mezclas sub-rasante - lodo se incrementa el contenido de silicio (Si), hierro (Fe) y níquel (Ni), aunque en muy bajas proporciones.

4.4.4 Caracterización dinámica

Las metodologías actuales para diseño de pavimentos consideran como propiedad fundamental, para caracterizar los materiales el módulo de resiliencia, estos se emplean tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico [17].

El ensayo triaxial es uno de los más empleados para determinar los módulos resilientes de los materiales granulares y suelos de sub-rasante, el ensayo simula las condiciones más reales de los estados de esfuerzos a los cuales están sometidos los materiales en las capas de las estructuras de pavimentos flexibles al estar expuesto a las cargas móviles en la vida de servicio de los materiales. *El comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial fue estudiado mediante ensayos de corte directo consolidado drenado y ensayos triaxiales a compresión a gran escala* [18].

Para la determinación de los módulos resilientes, se elaboraron probetas de cada material (sub-rasante y granular) con 0%, 2%, 4%, 6% y 8% de lodo aceitoso; se dejaron en una cámara de curado, tal como se muestra en la Figura 12, el periodo de curado fue de 7, 20 y 26 días, el ensayo se realizó en el equipo servo neumático NAT, en la Figura 13 se muestra el resultado obtenido para la sub-rasante.



Figura 12. Cámara para el curado de probetas

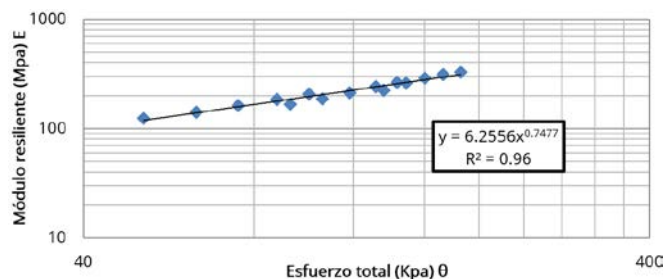


Figura 13. Módulo resiliente de la sub-rasante no tratada y 7 días de curado

Se halló los módulos resilientes para unas condiciones particulares de esfuerzos, para ello se planteó la estructura de pavimento tradicional que aparece en la Figura 14.

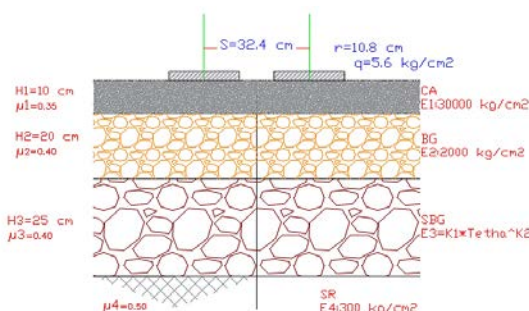


Figura 14. Modelo estructural de pavimento flexible

Se tomó los valores de esfuerzos para la estructura de pavimento planteada, y teniendo en cuenta los modelos obtenidos del ensayo triaxial se determinó los módulos resilientes, los resultados se muestran en la Figura 15 y 16.

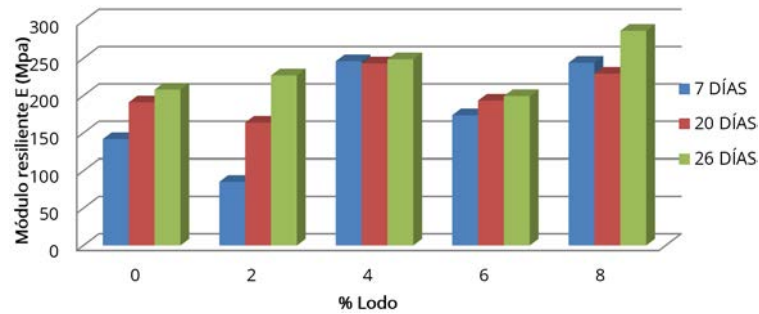


Figura 15. Módulos resilientes de las mezclas sub-rasante-lodo

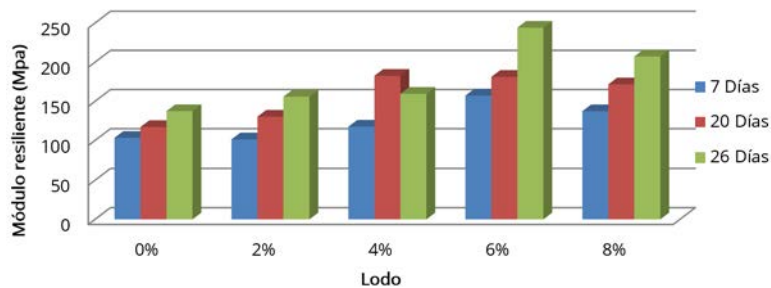


Figura 16. Módulo resiliente de las mezclas material granular - lodo

El módulo resiliente de la sub-rasante presenta un comportamiento irregular respecto al porcentaje de lodo y periodo de curado. Los mejores resultados se obtienen con el 8% de lodo y curado 26 días, datos similares con el 4% de lodo para los diferentes periodos de curado. Para el material granular, los módulos más altos se obtienen con 6% de lodo y curado de 26 días. En ambos casos, la adición de lodo a los materiales originales, produce efecto positivo en su resistencia.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para analiza la viabilidad económica de estabilizar sub-rasantes o material granular con la adición de lodo aceitoso, se determinó los costos del material original y estabilizado como parte integral de una de las capas de una estructura de un pavimento flexible, que se planteó inicialmente con materiales convencionales para un determinado tránsito de diseño, la estructura resultante se muestra en la Figura 17.

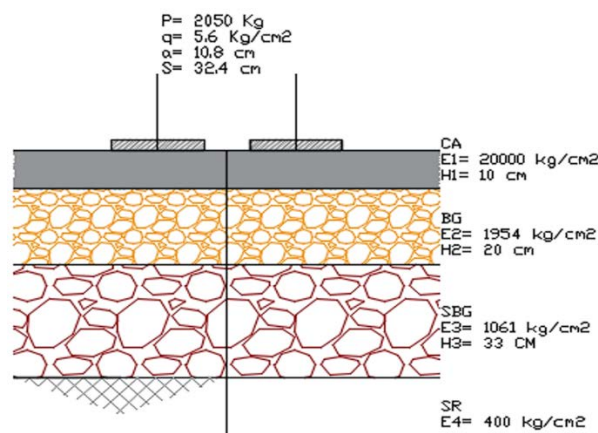


Figura 17. Estructura de pavimento con material granular convencional

Igualmente se diseñó una estructura de pavimento flexible similar a la anterior, pero reemplazando la capa de sub-base granular, por una capa del material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso, se dimensionó esta estructura de tal manera que los valores de servicio fuesen similares a la estructura de pavimento inicialmente planteada, la nueva estructura se muestra en la Figura 18.

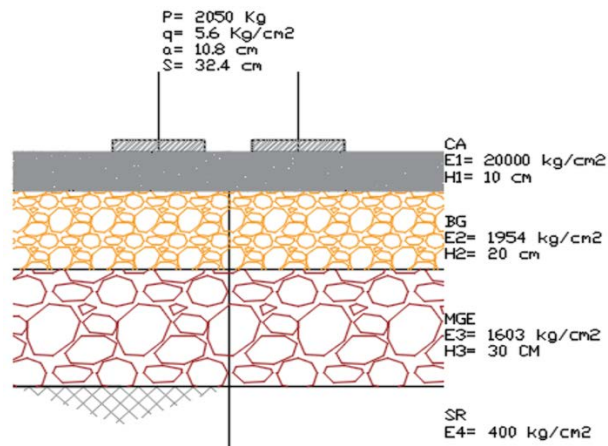


Figura 1. Estructura de pavimento con material granular estabilizado

Como se advierte, la estructura de pavimento flexible utilizando el material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso, disminuye su espesor en 5 cm respecto a la sub-base granular de la estructura convencional. Los valores de precios unitarios obtenidos son: \$90.046/m³ y \$79.170/m³ para material de sub-base convencional y material granular estabilizado con el 6% de lodo aceitoso respectivamente.

Aunque no es un resultado absoluto, si se muestra la tendencia a disminuir los costos e invita a seguir investigando en el tema y obviamente, a implementar tramos de prueba que den mayores luces respecto a aspectos no tratados en el presente estudio, entre ellos el análisis del comportamiento de las dos capas en el tiempo.

6. CONCLUSIONES

El porcentaje óptimo de lodo aceitoso recomendado para estabilizar el material granular, tipo afirmado, es 6%, con el cual se aumenta el módulo resiliente del orden del 40% con relación al módulo resiliente del material granular sin tratar, con un periodo de curado de 7 días.

Se recomienda el 4% de lodo aceitoso para tratar la sub-rasante, con el cual se logra un aumento de la resistencia del orden del 37% respecto a la sub-rasante natural.

Dados los resultados de los ensayos de CBR y módulo resiliente y teniendo en cuenta las condiciones bajo las cuales se ensayaron las probetas, se refleja la importancia del curado de las mezclas para que ganen resistencia con el tiempo.

El lodo aceitoso genera un efecto positivo en la sub-rasante, al hacerla menos susceptible a la acción del agua, más impermeable, incrementa su estabilidad hídrica al estar sometida a saturación, lo que garantiza la preservación de las propiedades de resistencia del material en las condiciones más críticas.

Es importante resaltar la reducción de la plasticidad alcanzada en la mezcla de material granular - lodo aceitoso, al pasar de 8% al 0%, es decir, con la adición del 6% de agente estabilizante, se produce una mezcla no plástica.

De acuerdo al análisis químico practicado al agua para revisar la acción de los lixiviados generados por las mezclas estabilizadas con lodo aceitoso, se encontró que la amenaza de contaminación de fuentes hídricas, en una posible implementación de la mezcla, es mínima; una vez que en los reportes del ensayo químico no se cuantificaron trazas de los componentes del lodo aceitoso.

Del análisis económico de la posible implementación del material granular estabilizado, como una capa de una estructura de pavimento flexible, se encuentra dos ventajas fundamentales; por un lado, se reducen los espesores de la estructura y por otro se disminuyen los costos constructivos por m³, esto teniendo en cuenta el reemplazo de la sub-base granular convencional por una capa de material granular estabilizada con el 6% de lodo aceitoso.

Los resultados de la estabilización de material granular y sub-rasante con lodo aceitoso, a nivel de laboratorio, fueron satisfactorios para su uso en vías, sería conveniente construir tramos de prueba instrumentados para monitorear y verificar el comportamiento de las mezclas estabilizadas en servicio cuando hacen parte integrante de una estructura de pavimento.

REFERENCIAS

- [1] Tecca, "Planta de mejoramiento de lodos. Proyecto Tricanter", Compañía Operadora del Agua, Bogotá, Gen. TRI-ACA-0911- INFGEN-01, 2014.
- [2] Y. Vargas y N. León, "Exploración y explotación de petróleo: enfoque geográfico de los efectos ambientales en el piedemonte llanero", *Perspectiva Geográfica*, Vol. 21, no. 2, pp. 199-224, 2016.
- [3] J. Garzón, J. Rodríguez, C. Hernández, "Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible", *Universidad y Salud*, Vol. 19, no. 2, pp. 309-318, 2017.
- [4] R. Méndez, P. Gómez, J. Ledesma, y C. Ceniceros, "Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en Tabasco", *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, Vol. 2, no. 4, 2013.
- [5] D. F. Bada, "Aplicación del aditivo químico Conaid para atenuar la plasticidad del material granular del tramo de la carretera Tauca - Bambas (km73 + 514 - km132 + 537) de la ruta nacional pe - 3na", *Tesis de maestría*, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú, 2016.
- [6] A. Ulate, "Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales", Unidad de Gestión Municipal, PITRA-LanammeUCR, Boletín Técnico, no. 2, 2017.
- [7] J. Hernández, D. Mejía, y C. Zelaya, "Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos en la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de el Salvador", *Trabajo de grado*, Universidad de el Salvador, San Miguel, El Salvador, 2016.
- [8] W. Chavarro, y C. Molina, "Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito", Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2015.
- [9] A. Olaya, "Aplicación de agente químico como estabilizador de suelos arcillosos para la construcción de vías", Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bucaramanga, Colombia, 2018.
- [10] M. Álvarez, "Estabilización química de suelos en proyectos de infraestructura vial en Antioquia", Tesis de maestría, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado, Colombia, 2015.
- [11] Instituto Nacional de Vías, "Especificaciones generales de construcción de carreteras", Bogotá, Colombia, 2013.
- [12] L. Díez, O. Montes, y B. Caicedo, "Estabilización de sub-rasantes con productos químicos", *Universidad de los Andes*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [13] A. Peralta, J. Blanco, J. Reina, y L. Mantilla, "Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: Un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos", *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, Vol. 15, no. 2, pp. 7-17, 2017.
- [14] O. Caballero, "Estabilización química con silicato de sodio del material de préstamo de la vía La Primavera - Bonanza - La Venturosa en el Departamento del Vichada", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.
- [15] C. Chávez, J. Espinosa, J. Alarcón, y J. Arreygue, "Colapso por humedecimiento en los terraplenes de la Autopista Páztcuaro-Uruapan", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. 17, no. 2, pp. 201-210, 2016.
- [16] A. Arrechea, M. López, M. Espinosa, y LL. Orestes, "Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 36. No. 2. pp. 3-16, 2015.
- [17] C. Corona, "Determinación de módulo de rigidez y caracterización de módulo dinámico de mezcla Superpave", Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2017.
- [18] F. Nanclares, "Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial", Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2018.

Estudio del comportamiento a flexión de la guadua angustifolia kunth utilizando el método de elementos finitos

Germán Camilo Leguízamo Guzmán¹

Juan Camilo Morales Castañeda²

Miguel Fernando Montoya Vallejo³

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

En esta publicación se implementa un modelo de elementos finitos que permite analizar el comportamiento de la guadua Angustifolia sometida a flexión, siguiendo los parámetros establecidos en la norma NTC-5525. Para esta investigación se consultó una amplia bibliografía con el fin de encontrar la caracterización mecánica del material. Luego de revisar la información encontrada, se resolvió utilizar los datos de esfuerzo-deformación obtenidos por [3] para modelar el material en ANSYS. Durante la modelación, se varió la distancia comprendida entre los nodos presentes en el culmo con el fin de conocer la incidencia de dicha variable en la resistencia a flexión del material.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil.

Contacto: german.leguizamo@mail.escuelaing.edu.co

² Ingeniero civil y Magíster (c) en Estructuras.

Contacto: juan.morales-cas@mail.escuelaing.edu.co

³ Doctor en Ingeniería Mecánica.

Contacto: miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales dilemas que enfrenta la humanidad actualmente es el uso de tecnologías que disminuyan su impacto sobre el medio ambiente. Tal dilema no es ajeno a la industria de la construcción, y, desde la academia se han realizado esfuerzos con el fin de proponer materiales que reduzcan la huella de CO₂ producida por el constante desarrollo en el sector de la infraestructura.

Teniendo en cuenta lo anterior, organizaciones como la ZERI (Iniciativa de Investigación para las Cero Emisiones) y constructores como Simón Vélez y Marcelo Villegas, han propuesto un material llamativo por su economía, tradicionalidad y atractivo estético: la guadua. Sin embargo, la variabilidad en las características físicas y mecánicas de la misma genera un debate alrededor de su desempeño estructural, que, al verse sesgado por la falta de estudios técnicos concluyentes puede llegar a rezagar su uso.

A partir de esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar por medio del método de elementos finitos el comportamiento a flexión de la guadua *Angustifolia* junto con la incidencia en su resistencia que tienen el número de nodos presentes en su tallo y su separación.

La guadua *Angustifolia* Kunth es una de las 150 especies de bambú registradas en Colombia, puede llegar a crecer 20 cm por día y alcanzar una altura de hasta 30 m. Ha sido utilizada ampliamente en el campo de la construcción y alrededor de ella se ha generado una cultura de consumo bastante madura; su impacto social, económico y cultural en Colombia ha sido tal que se considera una de las diez especies de guadua prioritarias del país [1].

Actualmente, Colombia cuenta con institutos que impulsan el estudio de la guadua, como la Sociedad Colombiana del Bambú SCB y el Centro Nacional para el Estudio del Bambú Guadua – Corporación Autónoma Regional de Quindío CNEBG; políticas que regulan su manejo, como la Resolución No. 1740 de 2016 y la Norma Unificada de la Guadua; y, gremios encargados de su producción, comercialización y uso, como Federación Nacional de Empresarios de Guadua y Bambú FEDEGUADUA. Sin embargo, a pesar de que ha sido estudiada y que tiene el respaldo de normas como la NSR-10, su análisis no ha sido tan profundo como para contar con un grado de confiabilidad suficientemente alto sobre su comportamiento, que la impulse a ser aceptada como material estructural. Al igual que la madera, es de naturaleza ortotrópica y presenta gran variabilidad en sus propiedades físico-mecánicas, lo cual dificulta aún más su aceptación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una revisión bibliográfica con el fin de obtener información suficiente para producir el modelo analizado en el presente artículo y contrastar los resultados obtenidos, a continuación, se presenta un breve resumen de los datos recopilados.

2. MARCO CONCEPTUAL

[2] realizaron un estudio donde se caracterizó la estructura interna de la guadua *Angustifolia* Kunth y se analizó su influencia en la resistencia a tensión y flexión de la misma. Para ello, fallaron probetas con presencia y ausencia de nodos por medio del ensayo a flexión estipulado por la norma ISO TC-165 del INBAR, dichas probetas se caracterizaron previamente con ayuda de un microscopio de barrido electrónico SEM marca JEOL, de acuerdo a parámetros como la estructura del material compuesto, la unión parénquima, el tejido conductivo y la fibra dentro de la matriz. En esta investigación se encontró que la resistencia a flexión se ve afectada por la presencia de nodos, y, que los valores de la misma disminuyen de la capa externa a la capa interna debido a que la cantidad de fibras presentes en el material decrece en ese sentido.

El estudio de [3] para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth, con el fin de emplear los resultados obtenidos en el diseño de baterías sanitarias. Aplicaron pruebas de flexión a 4 puntos en 3 probetas de 1.5 m de longitud con ayuda de un brazo de carga que se desplazaba a una razón de 0.05 mm/s, esto, con el fin de estimar el esfuerzo último a flexión, la curva esfuerzo-deformación y el módulo de elasticidad del material; luego, utilizaron los resultados obtenidos para modelar el comportamiento a flexión del material en ANSYS. Como resultados, obtuvieron un esfuerzo a flexión

promedio de 34.98 MPa, un módulo de elasticidad de 10312 MPa y deformaciones máximas en la zona de aplicación de carga de 16 mm.

Rubio [4] llevó a cabo una investigación para determinar el comportamiento mecánico de cerchas construidas en guadua rolliza. Para tal fin, realizó 45 ensayos de resistencia a flexión en probetas de guadua, de acuerdo a los parámetros dictados por la norma NTC-5525. El material fue extraído de las zonas cepa (inferior), basa (media) y sobrebasa (superior) del tallo, con el fin de analizar la influencia de la ubicación de las probetas en su comportamiento frente a momentos flexionantes. En este trabajo se observó que la falla se provocaba, predominantemente, por el aplastamiento de las fibras, es decir, por compresión; por otro lado, se encontró que los esfuerzos máximos se producían en las probetas extraídas de la zona sobre basa, concluyendo que el papel que juega la inercia de las secciones transversales de la guadua es importante, ya que ésta es más flexible a medida que su inercia disminuye; por último, se encontró un valor de esfuerzo máximo promedio a flexión de 106.74 MPa.

En el estudio [5] determinaron los valores característicos de la resistencia a flexión, compresión, tracción y corte, junto con los módulos elásticos de la guadua *Angustifolia*. Para determinar la resistencia última a flexión del material, realizaron 89 ensayos con 65 probetas provenientes de Quindío, 12 procedentes de Cundinamarca y 12 de Valle del cauca, correspondientes a culmos extraídos de las zonas media y superior de la guadua. La prueba realizada fue un ensayo a flexión de cuatro puntos, donde se aplicó la carga en sentido ascendente con ayuda de un gato hidráulico, siguiendo los parámetros establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC-5525. Como resultados, encontraron que la resistencia última a flexión longitudinal del material varía a lo largo de la extensión de la guadua, siendo menor para la parte media que para la parte superior, con valores de 35.3 MPa y 40.8 MPa respectivamente, obteniendo un valor característico para la totalidad del culmo de 37.4 MPa; por otro lado, encontraron un módulo de Poisson de 0.35 y un valor promedio de 13.90 GPa para el módulo de elasticidad.

2.1 Características físicas

1. *Morfología*. Al ser una especie de bambú, la guadua *Angustifolia* se encuentra dividida en rizoma, tallo, ramas y hojas. A continuación, se hace una breve explicación de la función de cada parte junto con sus respectivas características [6].

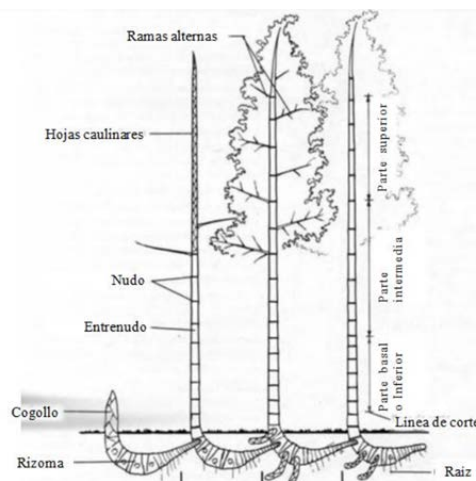


Figura 1. Morfología de la guadua [6]

2. *Rizoma*. Estructura anclada compuesta por raíces que puede alcanzar una profundidad de entre 1 y 3 m. Es la parte encargada de captar, suministrar, transferir y almacenar agua y nutrientes.
3. *Tallo*. También conocido como culmo, es un sistema de ejes vegetativos segmentados que tiene origen en el ápice del rizoma. Está compuesto por fibras de celulosa ordenadas longitudinalmente, y su estructura se conforma por nodos, entrenodos y ramas. Suele dividirse en 3 secciones con fines comerciales: cepa (zona inferior), basa (zona media) y sobrebasa (zona superior).

4. *Nodo*. Tabique transversal que divide el culmo en cavidades huecas. De acuerdo con [7] el espesor de los nodos en la guadua *Angustifolia* varía entre 3 y 10 mm.
5. *Entrenodo*. Cavidad hueca que separa los nodos. De acuerdo con Hidalgo [7] su longitud varía respecto a la zona del tallo en que se encuentre, teniendo valores que van de 12 a 24 cm en la cepa, y, de 30 a 40 cm en las zonas media y superior.
6. *Densidad*. Este factor varía dependiendo de factores como la especie y la tipología de la guadua. En [8] determinaron un rango de 0.4 a 0.8 g/cm³, lo cual difiere muy poco de estudios publicados anteriormente, pues Hidalgo [7] declaró que la densidad de la guadua *Angustifolia* variaba entre 0.5 y 0.9 g/cm³.

2.2 Características mecánicas

Al ser un producto natural, las características de la guadua son variables, y, en su magnitud influyen factores como las condiciones del suelo, el clima, la presencia o ausencia de luz y las labores silviculturales (podado de ramas). A continuación, se presentan algunos valores registrados en la bibliografía para las variables de interés del presente estudio:

1. *Módulo de elasticidad*. Diversos autores han analizado el módulo de elasticidad de la guadua *Angustifolia* con el fin de encontrar un rango de valores que permita estimar de manera confiable su magnitud. [5] encontraron valores promedio de 13.67 GPa para la zona inferior, 14.16 GPa para la zona media, y, 13.90 GPa para la totalidad del culmo. [9] hallaron un módulo de elasticidad promedio de 21.53 MPa, siendo la sobrebasa aquella zona con mayor flexibilidad (23.55 GPa) y la cepa la más rígida (18.24 GPa).
2. *Coefficiente de Poisson*. [5] determinaron un coeficiente de poisson de 0.36 para las partes media e inferior del tallo y de 0.33 para la zona superior, siendo 0.35 el valor promedio para la totalidad del culmo. Por otro lado, [9] encontraron que la relación de Poisson variaba entre 0.22 y 0.35, y [10] hallaron valores entre 0.27 y 0.36, con un coeficiente promedio de 0.34.
3. *Esfuerzo último a flexión*. Este factor ha sido uno de los más estudiados debido a su importancia en el ámbito estructural, sin embargo, en la literatura pueden encontrarse valores en un orden de 50000 a poco más 100000 MPa. [11] determinaron un esfuerzo último de 58.18 MPa.; por otro lado, [12] obtuvo una magnitud de 68.39 MPa; [4] encontró un valor de 106.74 MPa; y [5] halló uno de 37.4 MPa.

3. MÉTODO

El método utilizado en Colombia para definir la resistencia a flexión en tallos de guadua se encuentra estipulado en la norma NTC-5525: Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth [13]. Dicho método (Figura 2), consiste en la obtención de la curva de Carga Vs. Deflexión vertical y del módulo de elasticidad nominal del culmo, por medio de la aplicación de una prueba de resistencia a flexión a cuatro puntos en la que se fallan probetas con luz libre entre apoyos no menor a 30 veces su diámetro externo, sometidas a dos cargas puntuales aplicadas a una velocidad constante de 0.5 mm/s sobre los tercios medios de la probeta.

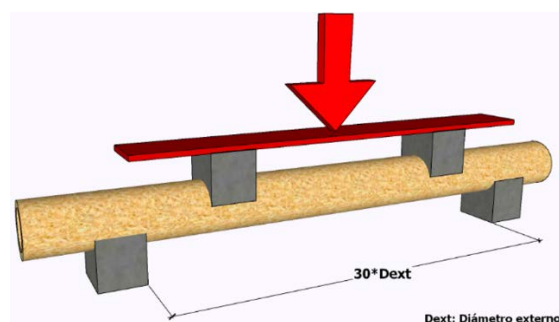


Figura 2. Diagrama del ensayo

3.1 Implementación del MEF

El modelo expuesto (Figura 3) fue desarrollado en ANSYS Workbench 2020 R2 usando un sistema de análisis de tipo estructural estático (Static Structural). El cual, es un método que determina los desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y fuerzas, en estructuras o componentes afectados por cargas que no inducen efectos de inercia o amortiguación significativos. El método asume estables las condiciones de carga y respuesta, es decir, supone que las cargas y la respuesta de la estructura varían lentamente con el tiempo.

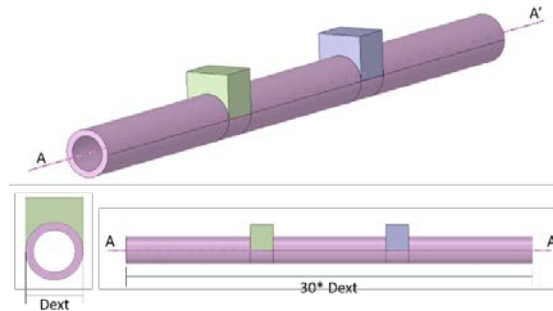


Figura 3. Modelo

Luego de haber establecido el tipo de análisis, se configuraron las propiedades mecánicas del material teniendo en cuenta la bibliografía consultada. Debido a las restricciones de tiempo y recursos que se tenían, se optó por utilizar los datos obtenidos por J. Cobos y X. León en los ensayos de flexión realizados para llevar a cabo la investigación Propiedades físico-mecánicas de la guadua *Angustifolia Kunth* y Aplicación al diseño de baterías sanitarias del IASA II [3]. A continuación, se muestran las curvas de esfuerzo-deformación (Figura 4) obtenidas en el trabajo mencionado anteriormente junto con la caracterización geométrica de las probetas utilizadas (Tabla 1).

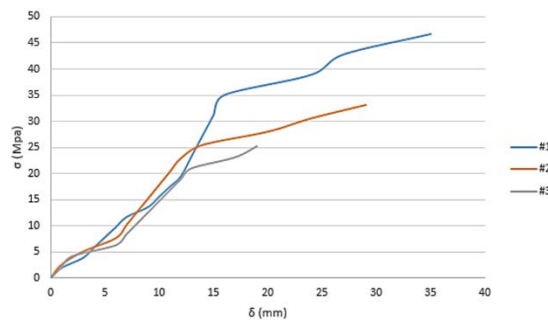


Figura 4. Diagrama Esfuerzo-Deformación

Tabla 1. Caracterización geométrica de las probetas utilizadas

Probeta	Lugar	D _{externo medio} (mm)	D _{interno} (mm)	L (mm)
1	A	99.6	72	1500
	B	92	68.9	
2	A	91.45	74.2	
	B	87.4	66.5	
3	A	96.05	76.7	
	B	100.4	87.6	

Para efectos prácticos, y teniendo en cuenta que las dimensiones de las probetas del estudio se encuentran dentro de los rangos suministrados por la literatura, se resolvió trabajar únicamente con los datos de la probeta 1.

Luego de convertir las deformaciones a términos unitarios y analizar la forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria obtenida, se encontró que dicha gráfica se aproximaba a un modelo bilineal, por lo cual, se procedió a dividir la gráfica en dos secciones: sección elástica y sección plástica. Para luego calcular una regresión lineal de los datos de cada zona y obtener las ecuaciones de las rectas que describían el modelo (Figura 5).

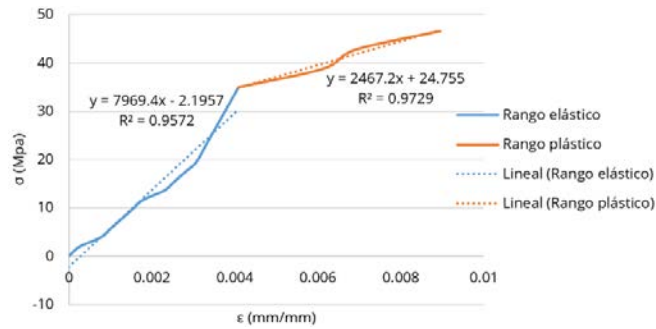


Figura 5. Modelo bilineal de la gráfica esfuerzo-deformación unitaria

Partiendo del hecho de que no puede haber esfuerzos negativos, se desplazó la recta del rango elástico de tal forma que se intersecara con el origen, obteniendo la ecuación (1). La ecuación (2) pertenece a la recta representativa del rango plástico.

$$\sigma = 7969.4 * \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma = 2467.2 * \varepsilon + 24.755 \quad (2)$$

Después de haber encontrado las ecuaciones de las rectas que describían el modelo bilineal de la curva esfuerzo-deformación unitaria se procedió a calcular su intersección con el fin de hallar el esfuerzo de fluencia del material, obteniendo como resultado 35.86 MPa. Posteriormente, se procedió a configurar las características del material en el software (Tabla 2). Debido a que la guadua no está incluida en la biblioteca de materiales de ANSYS, se creó un nuevo material, asumiendo su comportamiento como isotrópico. Lo anterior, debido a que la única dirección con respecto a las fibras en que se puede aplicar la carga es perpendicular a éstas, por lo tanto, solo habrá un comportamiento a flexión.

Tabla 2. Configuración de las propiedades del material

Propiedad	Tipología
Elasticidad (Linear Elastic)	Isotrópica (Isotropic Elasticity)
Plasticidad (Plasticity)	Bilineal Isotrópica (Bilinear Isotropic Hardening)

Luego de elegir la tipología de cada propiedad, se procedió a ingresar las constantes del material (Tabla 3). El módulo de elasticidad corresponde al obtenido por [3] y el coeficiente de Poisson se asumió dentro de un rango igual al de la madera, teniendo en cuenta la similitud entre ambos materiales. Por otro lado, el esfuerzo de fluencia y los módulos de tangencia, corresponden a los calculados a partir del modelo bilineal.

Tabla 3. Propiedades del material

Constante	Valor
Módulo de Young (MPa)	11022.6
Coefficiente de Poisson	0.4
Esfuerzo de fluencia (Mpa)	35.86
Módulo de tangencia (R. elástico)	7969.4
Módulo de tangencia (R. plástico)	2467.2

Habiendo configurado el material, se procedió a realizar el modelo de la geometría del experimento. Para esta etapa, se idealizó la forma de la guadua como un cilindro hueco de superficie uniforme con dimensiones iguales al promedio de las medidas correspondientes a la probeta 1 (Tabla 4).

Tabla 4. Dimensiones del modelo

Probeta	D _{externo} medio promedio (mm)	D _{interno} promedio (mm)	L (mm)
1	95.8	70.45	1500

Dicho cilindro se modeló junto con dos sólidos que representaban las cuñas con que se aplicaba la carga. El siguiente diagrama ilustra su configuración.

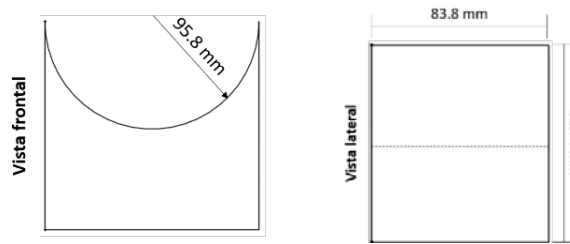


Figura 6. Diagrama de las zapatas de carga

Las zonas de apoyo se omitieron, debido a que su influencia se tuvo en cuenta en la configuración de las condiciones de contorno, por lo que la figura modelada corresponde a la fracción del culmo ubicada entre los bordes internos de los apoyos (Figura 7).

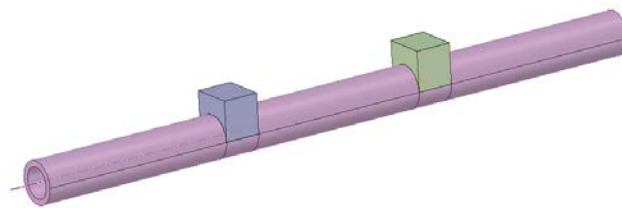


Figura 7. Modelo del ensayo

Como el anterior, se realizaron 9 modelos distintos, variando el número y distribución a lo largo del tallo, de los nodos presentes en cada cilindro. Tres de los ensayos se simularon con una distribución de nodos simétrica y otros tres con una distribución asimétrica, esto con el fin de analizar la influencia de la ubicación de los nodos en la respuesta del culmo frente a esfuerzos flexionantes. De acuerdo con [7], el espesor de los nodos puede variar entre 3 y 10 mm, y, la separación entre éstos, también conocida como entrenodo, puede tener entre 30 y 40 cm de longitud para la zona media-superior del tallo de la guadua, sección de la cual se extrajeron las probetas analizadas. Teniendo en cuenta lo anterior y partiendo de la hipótesis de que la influencia de los nodos en el comportamiento mecánico del material aumenta con su espesor, se idealizó su forma como una placa circular de grosor igual a 10 mm. La cantidad de nodos en cada modelo se configuró de acuerdo a su separación, siendo así, los modelos con entrenodos de 30 cm aquellos con mayor cantidad de nodos y los modelos de 40 cm aquellos con menor cantidad. También se realizaron: un modelo sin nodos con el fin de observar el comportamiento del cilindro totalmente hueco, un modelo con dos nodos de 10 cm de espesor en los extremos, y, un modelo con un único nodo central de espesor igual a 10 cm. (Figuras 7, 8 y 9).

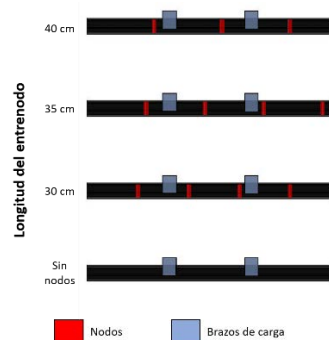


Figura 8. Configuración de los nodos asimétrica

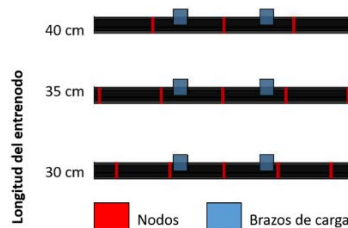


Figura 9. Configuración de los nodos simétrica

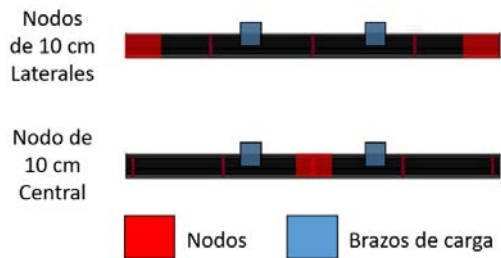


Figura 10. Configuración con nodos de 10 cm

Después de haber definido la geometría del material, se procedió a seleccionar las zonas del tallo acotadas por los bordes de las cuñas de carga para delimitarlas como áreas de contacto. La tipología de dichas zonas se definió en ANSYS como Frictionless (Sin fricción), de tal manera que se permitiera el deslizamiento del material a medida que el brazo de carga se desplazaba, como pasaría en la vida real.

Luego, se configuraron las condiciones de contorno de los apoyos. Debido a que la simulación del ensayo se modeló omitiendo la parte del culmo posada en los apoyos, se restringieron los extremos del cilindro de manera que se simularan empotramientos perfectos en ambos. Por último, se discretizó la malla del modelo con elementos de tamaño igual a 50 mm, y se corrió con el fin de obtener los análisis gestionados.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan las Figuras 11 a 35 de intensidad de esfuerzo y deformación obtenidas para cada uno de los casos modelados, junto con una tabla y una gráfica que relacionan los resultados obtenidos en el esfuerzo máximo. Dicho procedimiento no se realizó para la deformación máxima debido a que ésta fue inducida y, por lo tanto, los valores de este factor para todas las simulaciones tienden a ser iguales.

4.1 Sin nodos

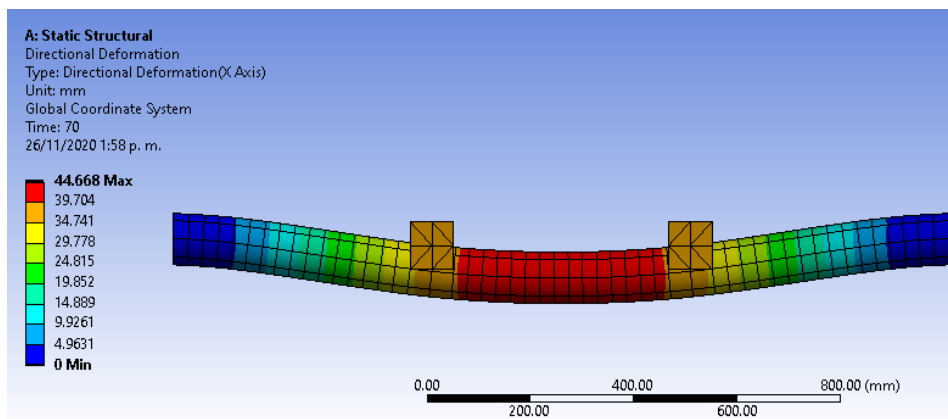


Figura 11. Diagrama de intensidad de la deformación (modelo sin nodos)

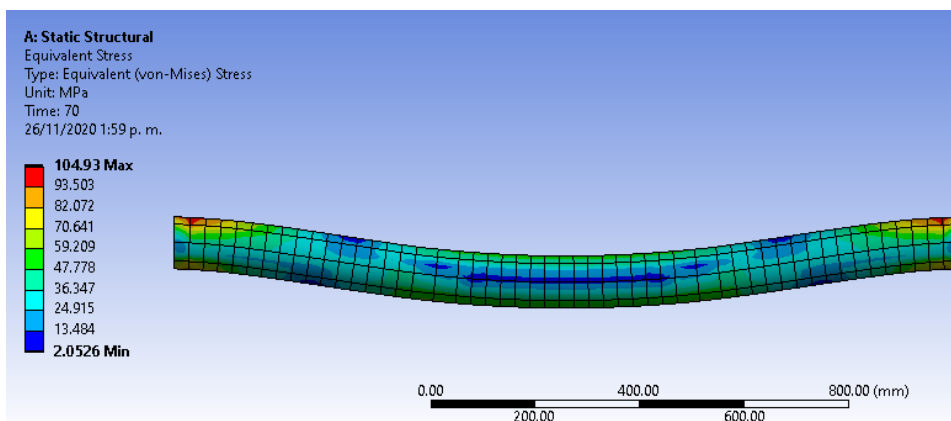


Figura 12. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo sin nodos)

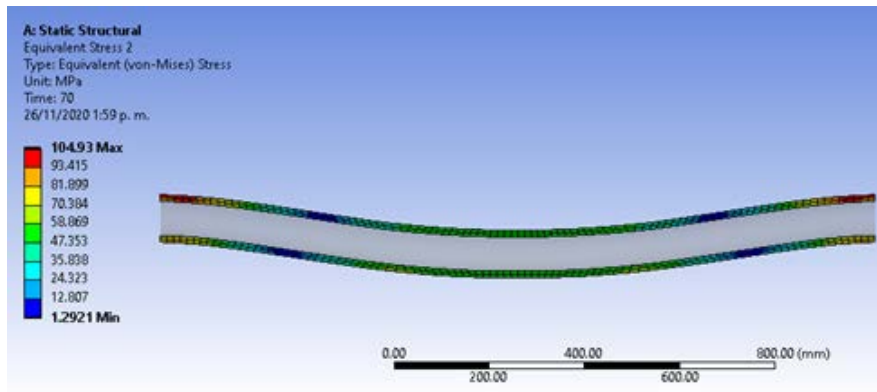


Figura 13. Diagrama de la intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo sin nodos)

4.2 Con entrenodos de 30 cm (Asimétricos)

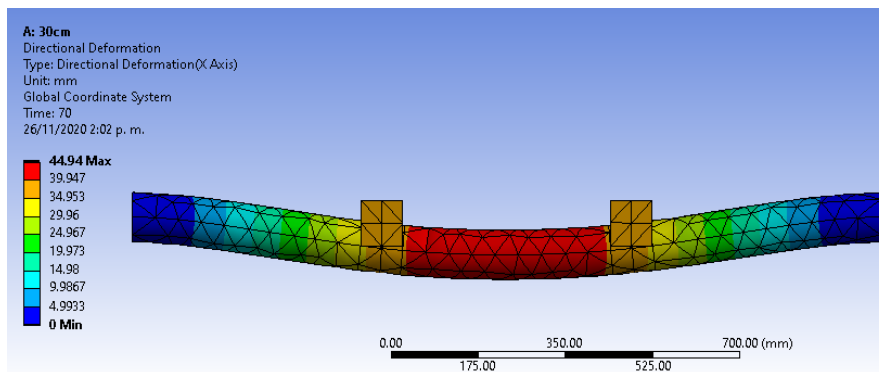


Figura 14. Diagrama de intensidad de la deformación (modelo con entrenodos de 30 cm asimétricos)

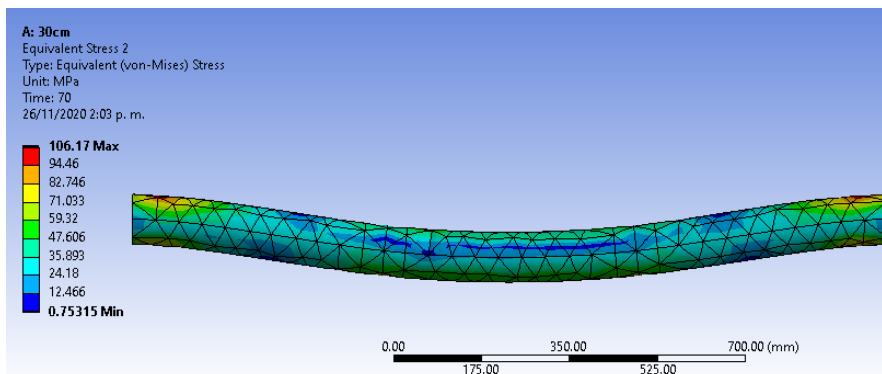


Figura 15. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo con entrenodos de 30 cm asimétricos)

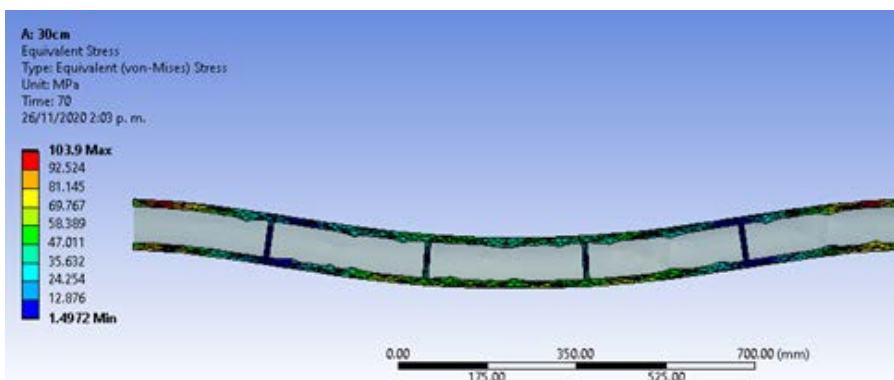


Figura 16. Diagrama de la intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo con entrenodos de 30 cm asimétricos)

4.3 Con entrenodos de 30 cm (simétrico)

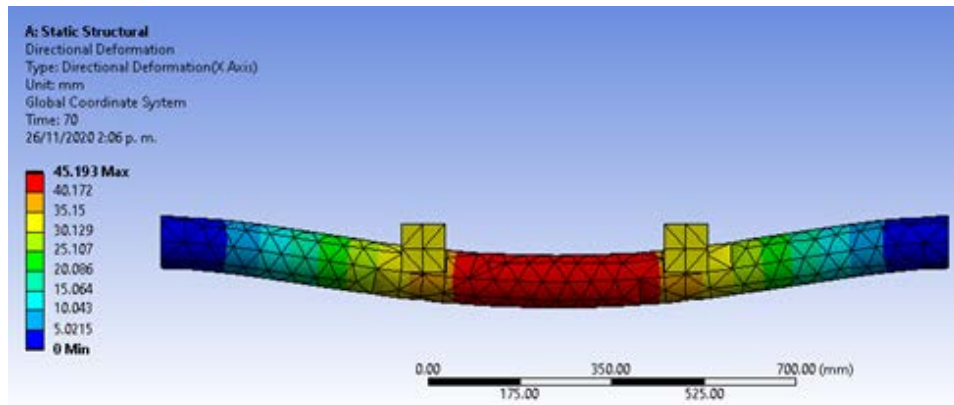


Figura 17. Diagrama de intensidad de la deformación (entrenodos de 30 cm simétricos)

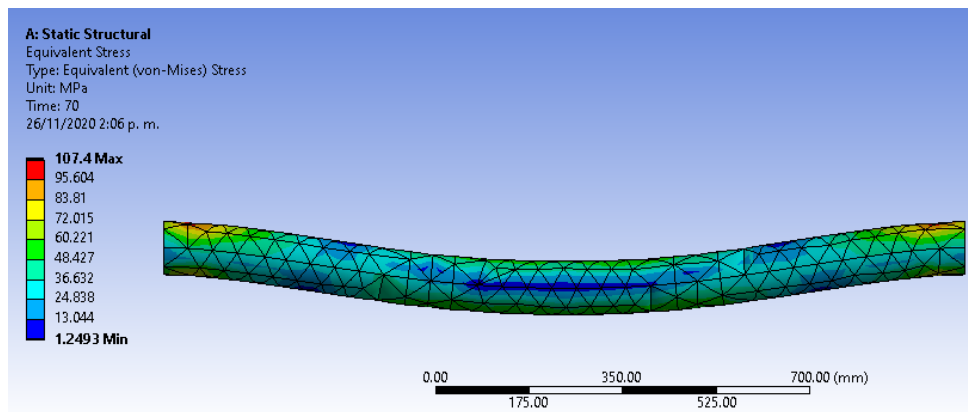


Figura 18. Diagrama de intensidad del esfuerzo (entrenodos de 30 cm simétricos)

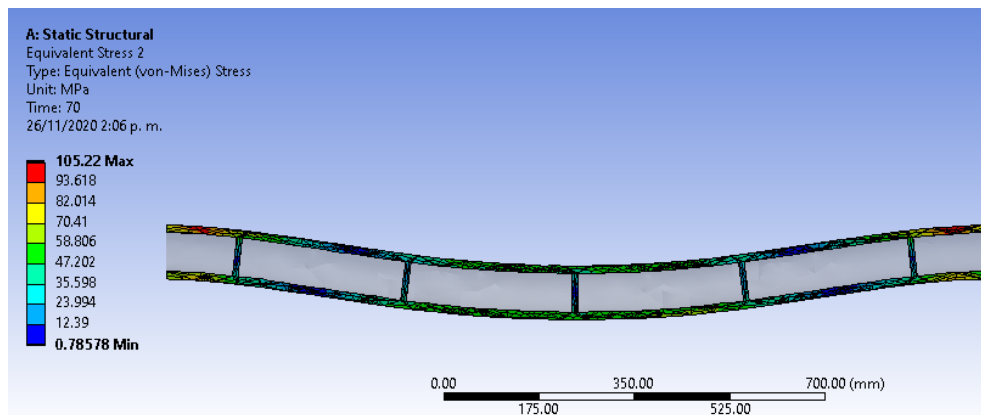


Figura 19. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (entrenodos de 30 cm simétricos)

4.4 Con entrenodos de 35 cm (Simétrico)

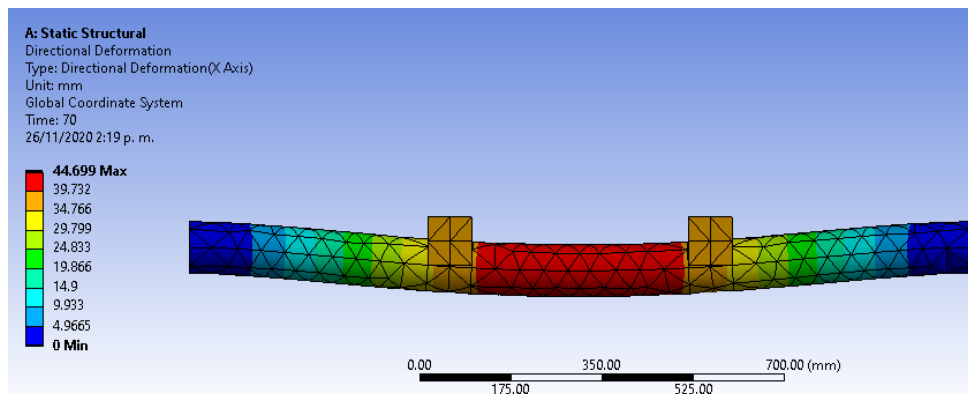


Figura 20. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo con entrenodos de 35 cm simétrico)

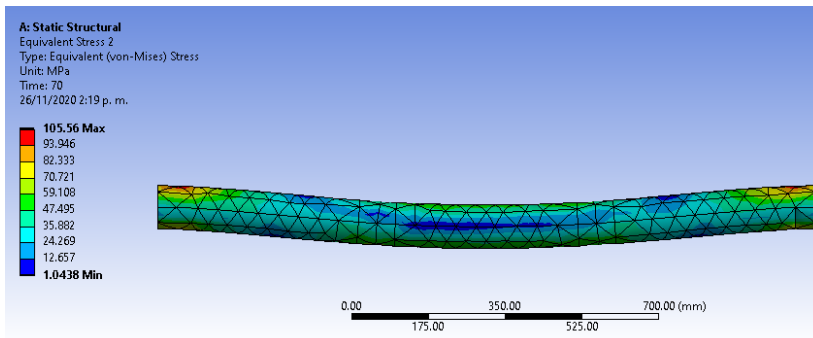


Figura 21. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo con entrenodos de 35 cm simétrico)

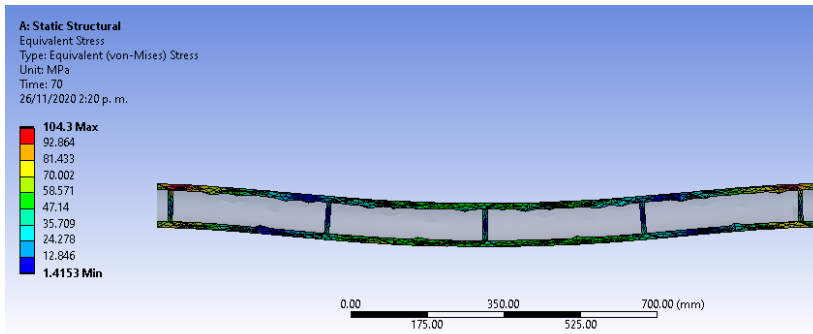


Figura 22. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo con entrenodos de 35 cm simétrico)

4.5 Con entrenodos de 35 cm (asimétrico)

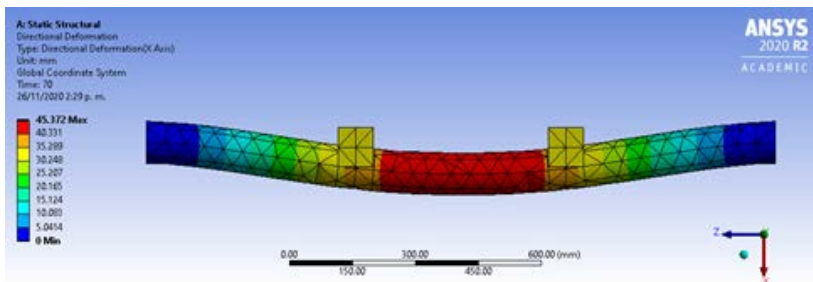


Figura 23. Diagrama de intensidad de la deformación (modelo con entrenodos de 35 cm asimétrico)

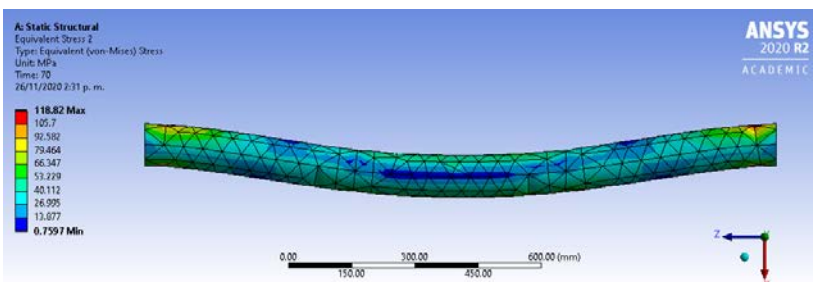


Figura 24. Diagrama de intensidad del esfuerzo último (modelo con entrenodos de 35 cm asimétrico)

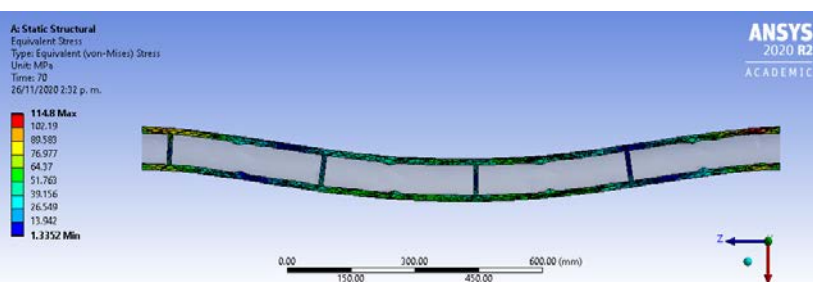


Figura 25. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo con entrenodos de 35 cm asimétrico)

4.6 Con entrenodos de 40 cm (simétrico)

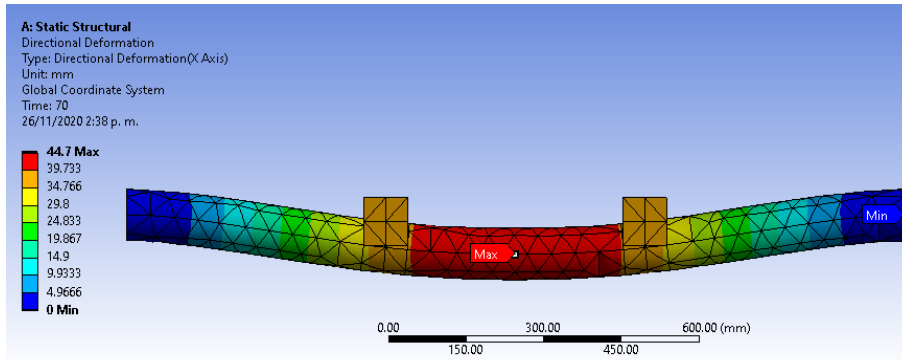


Figura 26. Diagrama de intensidad de la deformación (modelo con entrenodos de 40 cm simétrico)

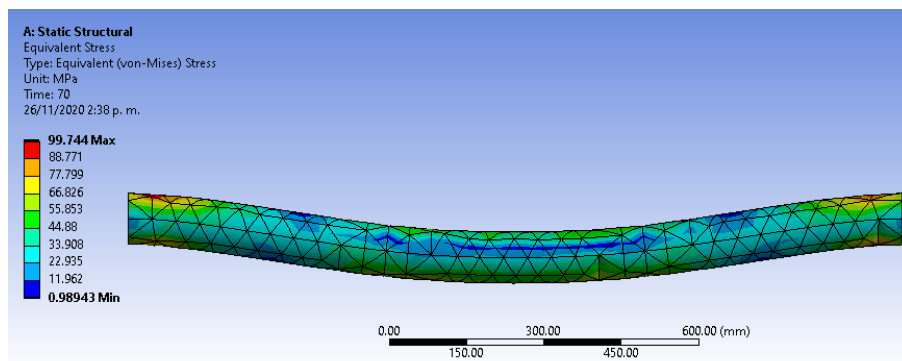


Figura 27. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo con entrenodos de 40 cm simétrico)

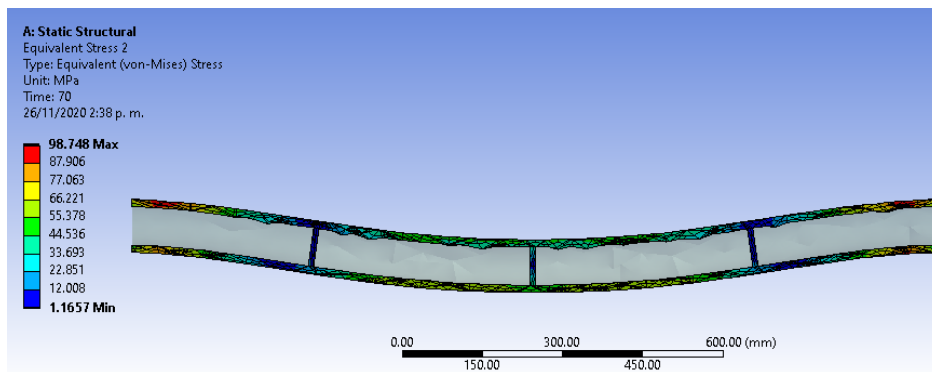


Figura 28. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo con entrenodos de 40 cm simétrico)

4.7 Con entrenodos de 40 cm (asimétrico)

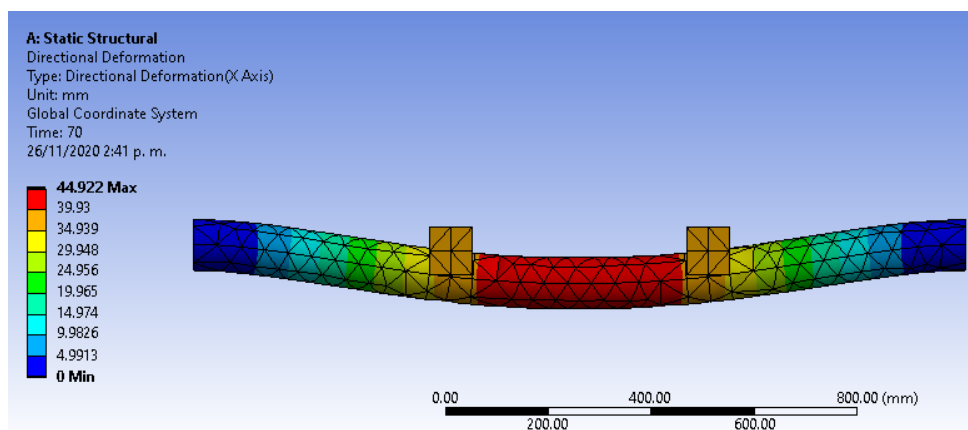


Figura 29. Diagrama de intensidad de la deformación (modelo con entrenodos de 40 cm asimétrico)

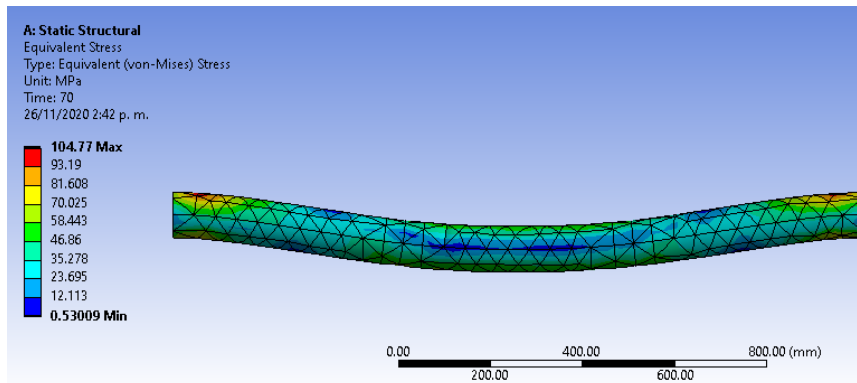


Figura 30. Diagrama de intensidad del esfuerzo (modelo con entrenodos de 40 cm asimétrico)

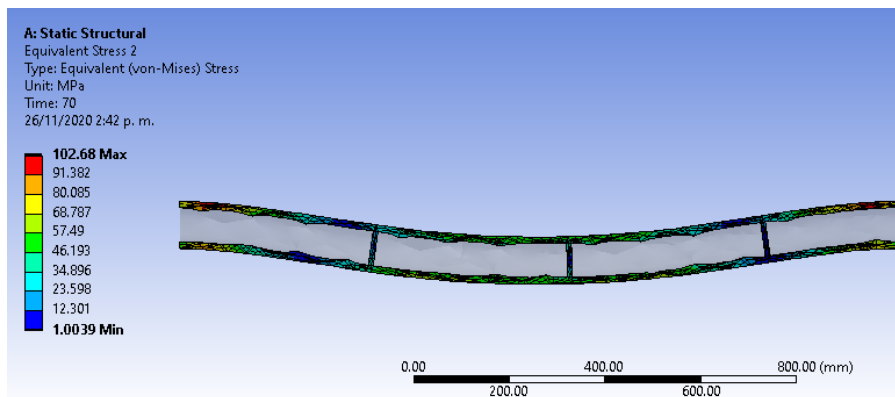


Figura 31. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (modelo con entrenodos de 40 cm asimétrico)

4.8 Nodos de 10 cm (Solo esfuerzos máximos)

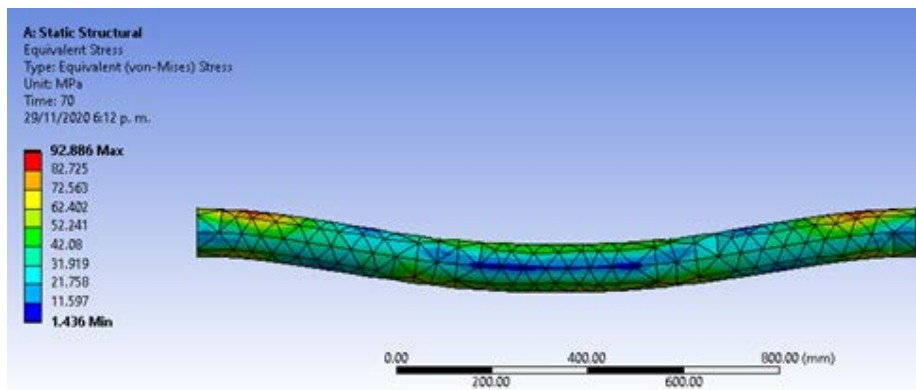


Figura 32. Diagrama de intensidad del esfuerzo (Modelo con nodos de 10 cm laterales)

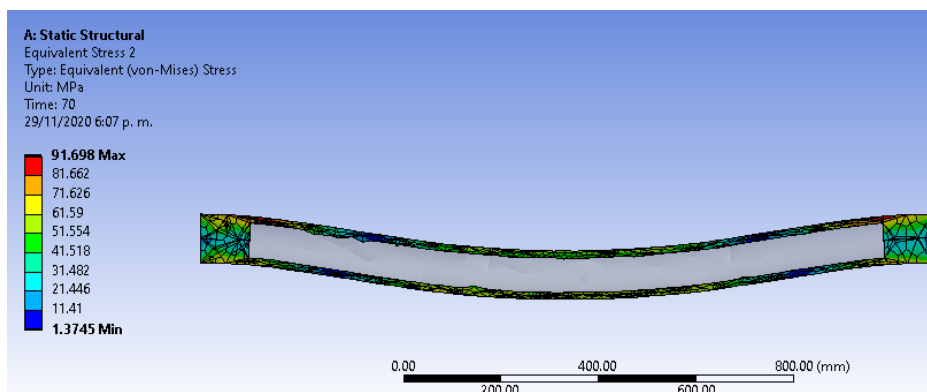


Figura 33. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (Modelo con nodos de 10 cm laterales)

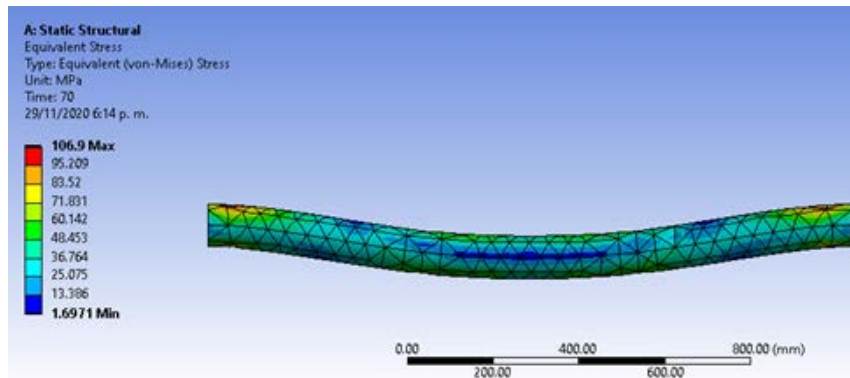


Figura 34. Diagrama de intensidad del esfuerzo (Modelo con nodo de 10 cm central)

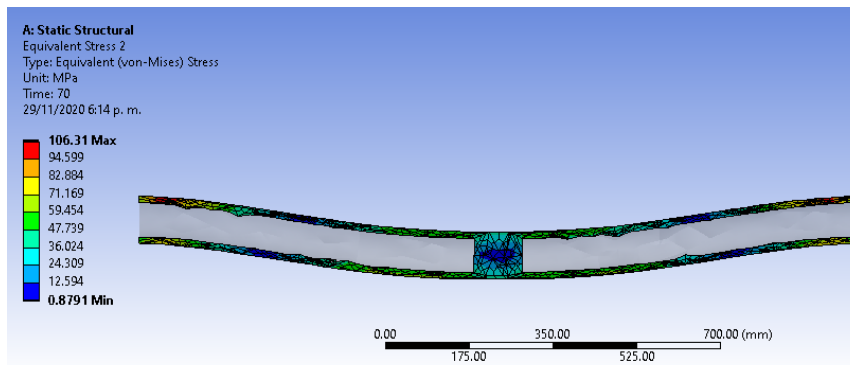


Figura 35. Diagrama de intensidad del esfuerzo con corte longitudinal simétrico (Modelo con nodo de 10 cm central)

4.9 Tablas y Figura de resumen

En las Tablas 5 y 6 y la Figura 36 se presenta los datos resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 5. Esfuerzos máximos obtenidos

Entrenodo (cm)	Esfuerzo máximo (Mpa)	
	Simétrico	Asimétrico
30	107.4	106.17
35	105.56	118.82
40	99.744	104.77
Promedio (Mpa)	107.08	

Tabla 6. Deflexiones máximas de cada ensayo

Entrenodo (cm)	Deflexión máxima (mm)	
	Simétrico	Asimétrico
30	45.193	44.94
35	44.699	45.372
40	44.7	44.922

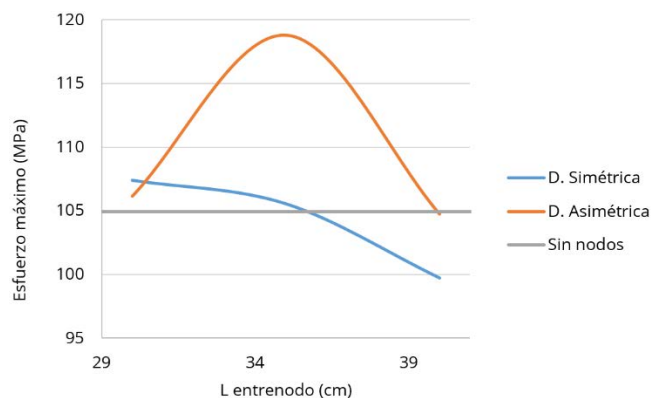


Figura 36. Comparación de los esfuerzos máximos obtenidos con cada distribución nodal

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al contrastar los diagramas de intensidad del esfuerzo de las probetas con y sin nodos, podemos observar que la presencia de éstos ocasiona fluctuaciones en la gama de colores, demostrando que aquellos puntos con presencia de nodos se ven sometidos a esfuerzos menores que el resto de la estructura del culmo. Esto puede observarse con mayor facilidad en las figuras 33 y 35, pues, la gama de colores permite ver cómo disminuye gradualmente el esfuerzo a medida que se va acercando al nodo.

Al examinar los espectros de intensidad del esfuerzo, se puede ver que todos los culmos experimentan el mayor esfuerzo en la zona superior del área que limita con los extremos. Por la manera en que se deforma, es correcto afirmar que los mayores esfuerzos experimentados por el tallo son esfuerzos a tensión.

El promedio de los esfuerzos máximos encontrados es 107.08 GPa. Contrastando éste valor con los encontrados en la bibliografía, podemos encontrar que los derivados de la aplicación del método de elementos finitos son 84% mayores que los de [11], 57% más altos que los de [12], 0.3% mayores que los de [4] y 186% más altos que los de [5]. Teniendo en cuenta esto, es importante estimar que es necesario contar con una muestra de resultados más grande y tomar más variables en cuenta, como la disformidad de la distribución de los nodos a lo largo del tallo, con el fin de disminuir la variabilidad de los resultados.

Como se dijo anteriormente, al observar las gráficas se puede advertir acerca de la influencia de los nodos en la resistencia del material. Al ver esto, se tuvo la hipótesis de que dichos elementos funcionaban como disipadores de energía, por lo cual, era de suponerse que el esfuerzo experimentado por el diafragma interno del nodo fuera igual a la disminución del esfuerzo exterior, sin embargo, al contrastar los valores se encontró una relación de 10 a 1 entre la variación del esfuerzo exterior y el esfuerzo experimentado por el diafragma interno. Por lo cual, no se puede concluir con certeza que los nodos cumplan la función supuesta.

La Figura 36 condensa las gráficas Esfuerzo Máximo Vs. Longitud de Entrenodos para las distribuciones simétricas y asimétricas. Puede verse que el esfuerzo máximo de la curva correspondiente a la distribución nodal simétrica presenta una tendencia a decrecer a medida que la longitud de los entrenodos aumenta. Esto podría haber sido un factor determinante en el estudio de la influencia de los nodos en el comportamiento a flexión de la guadua si, en el caso de la distribución asimétrica, se hubiera evidenciado la misma tendencia, pero, debido a que no es así, se requiere utilizar una muestra más amplia con el fin de encontrar un factor determinante.

En la Figura 36. Se puede evidenciar un fuerte aumento de la resistencia máxima para el caso del culmo con entrenodos de 35 cm de longitud y distribución nodal asimétrica. Si nos remitimos a la gráfica de intensidad del esfuerzo de dicho caso (Figura 22), podemos observar que el punto donde se ocasiona el valor máximo está precedido por un nodo que lo separa del extremo de la probeta. Debido a la forma del nodo, podría suponerse que, al ser una zona maciza muy delgada y encontrarse perpendicular a las fibras, contrarresta el giro del material próximo a su límite, produciendo de ésta manera esfuerzos más altos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los nodos influyen en la resistencia a flexión del material.
- Los esfuerzos máximos que se producen en el material son esfuerzos a tensión.
- La distribución de los nodos a lo largo del tallo juega un papel determinante en la variabilidad del comportamiento a flexión del material.
- En elementos con una distribución nodal simétrica, la resistencia a flexión tiende a aumentar a medida que disminuye la longitud de los entrenodos.
- La distribución de nodos a lo largo del culmo tiene más influencia en el comportamiento a flexión que su cantidad.
- Los esfuerzos experimentados por el diafragma interno de los nodos son insignificantes a comparación de los esfuerzos a los que se ve sometida la pared externa del tallo.
- Los resultados obtenidos para la influencia del número de nodos en el comportamiento a flexión del material no son concluyentes.

- En el presente estudio se idealizó un distanciamiento entre nodos uniforme a lo largo del tallo, lo cual, es difícil de encontrar en la naturaleza. Se recomienda analizar la influencia de longitudes variables de entrenodos en análisis futuros.
- Los resultados obtenidos dan una idea de cómo puede comportarse el material en el laboratorio, sin embargo, debido a que en este trabajo se suponen factores ideales para variables difícil de controlar en la vida real como la distancia entre nodos, el espesor de los mismos, el diámetro de las probetas y el grosos de sus paredes. Los ensayos simulados deben ser llevados a cabo en laboratorio, teniendo en cuenta los parámetros analizados con el fin de contrastar los resultados obtenidos
- Para obtener resultados concluyentes es necesario contar con una muestra de mayor tamaño.

REFERENCIAS

- [1] X. Londoño, «El bambú en Colombia,» *Bioteología Vegetal*, vol. 11, n° 3, pp. 143-154, 2011.
- [2] J. A. Osorio, J. M. Vélez y H. J. Ciro, «Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas,» *DYNA*, vol. 74, n° 153, pp. 81-94, 2007.
- [3] J. A. Cobos Fisher y X. A. León Rodríguez, «Propiedades físicas-mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth y su aplicación al diseño de baterías sanitarias del IASA II,» *Escuela Politécnica del Ejército*, Noviembre 2007.
- [4] L. F. Rubio Caballero, «Comportamiento de las cerchas construidas en guadua rolliza,» *Universidad de los Andes*, 2011.
- [5] P. Luna, J. Lozano y C. Takeuchi, «Determinación experimental de valores característicos de resistencia para guadua *Angustifolia*,» *Maderas, Ciencia y Tecnología*, vol. 16, n° 1, pp. 77-92, 2014.
- [6] E. Salas Delgado, *Actualidad y Futuro de la Arquitectura de Bambú en Colombia*, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- [7] O. Hidalgo López, *Bamboo. The gift of the gods*, Hipertexto Ltda, 2003.
- [8] J. R. Moreno Molina y M. L. Cendales Puentes, «Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth Originaria de Armenia Quindío,» *Universidad Católica de Colombia*, 2018.
- [9] J. A. Osorio Saraz, J. M. Vélez Restrepo y C. J. Ciro Velásquez, «Determinación de la relación de poisson de la guadua *Angustifolia* Kunth a partir de procesamientos de imágenes y su relación con la estructura interna,» *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, vol. 60, n° 2, pp. 4067-4076, 2007.
- [10] K. Ghavami, A. Barbosa Marinho y M. L. Sánchez Cruz, «Análisis de las propiedades mecánicas de tallos enteros de bambú,» *CEDEX*, n° 132, p. 119, 2003.
- [11] E. Sapuyes, J. Osorio, C. Takeuchi, M. Duarte y W. Erazo, «Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua *angustifolia* Kunth de Pitalito, Huila,» *Revista de Investigación*, vol. 11, n° 1, pp. 97-111, 2018.
- [12] L. C. Sánchez Escobar, «Caracterización de las propiedades físico-mecánicas de la Guadua *Angustifolia* Kunth del municipio de Socorro, Santander - Colombia,» *Universidad Nacional de Colombia*, 2018.
- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, «NTC-5525: Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth,» *ICONTEC*, pp. 13-16, 2007.

Evolución del modelo *airport-city*. Caso de estudio Bogotá, Colombia

Oscar Díaz Olariaga¹
Universidad Santo Tomás
Colombia

En este capítulo se realiza un análisis con enfoque urbano, y a través del modelo *airport-city*, del Aeropuerto El Dorado de Bogotá, Colombia, en directa relación con la ciudad a la que sirve. El aeropuerto comenzó operaciones al final de la década de 1950 y a los pocos años empezó un desarrollo urbano en su entorno no ordenado ni controlado, que prácticamente no cesa hasta hoy, cercando, literalmente, al aeropuerto. Desde hace dos décadas el tráfico aéreo en el aeropuerto se ha incrementado, lo que llevó a la ejecución de dos ampliaciones del mismo, hecho que impactó de forma directa en el desarrollo urbano de la zona de influencia, aspecto que se estudia aquí desde varias vertientes. Entonces, el modelo de desarrollo urbano ciudad-aeropuerto se analiza a partir de cinco dimensiones: 1) usos del suelo (haciendo especial énfasis en la diferenciación de actividades productivas y residenciales), 2) actividades económicas (entendidas desde la perspectiva de localización de empresas y la generación de empleo), 3) renta del suelo, 4) movilidad, y 5) medioambiente.

¹ Ingeniero Aeronáutico.
Contacto: oscardiazolariaga@usantotomas.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de *airport-city* (ciudad-aeropuerto) no es nuevo ya que fue descrito, analizado y documentado hace cuatro décadas por Conway [1]. Pero es en los últimos 10-15 años cuando el concepto fue desarrollado, a tal punto que hoy es casi un estándar en la literatura científica como en la industria. Entonces, en la bibliografía se pueden encontrar varias definiciones del concepto urbano ciudad-aeropuerto, o a veces también aerópolis [2-10]. Una síntesis de varias de dichas definiciones podría ser la de un aeropuerto cuya periferia experimenta un importante desarrollo urbano, principalmente comercial, industrial y logístico (en lo que se refiere al uso del suelo), en donde las empresas se aprovechan de la próxima situación del aeropuerto, y a su vez éste se alimenta de la actividad de las mismas para el desarrollo de su operación; y en donde coexiste una adecuada infraestructura de comunicaciones entre esta zona aeroportuaria y el resto de la ciudad y/o región metropolitana. Con ello, el aeropuerto evoluciona y se transforma en el epicentro de un fuerte desarrollo urbano con enfoque comercial, generador de empleo y riqueza, y nodo (e intercambiador modal) de conexión regional, nacional y global tanto de pasajeros como de carga aérea.

En otro orden, y en el presente, la ciudad-aeropuerto es una categoría conceptual que sirve para explicar los nodos de servicios generados por los desarrollos de los grandes aeropuertos que operan en espacios/regiones urbanas donde la ausencia previa de esquemas de planeación territorial metropolitana ha propiciado desarrollos urbanos no siempre ordenados ni controlados. El modelo ciudad-aeropuerto conlleva la planeación urbanística del denominado lado tierra de los aeropuertos y de los terrenos aledaños [11]. El desarrollo no ordenado del entorno de grandes aeropuertos, en muchas ciudades del mundo, se explica por la débil planeación del territorio donde se han instalado los mismos, que inicialmente eran zonas de transición rural y urbana, alejadas del centro de las grandes ciudades, pero cuya dinámica posterior los ha prácticamente insertado en el mismo corazón de las ciudades [12].

En definitiva, las ciudades aeropuerto muestran las tipologías dominantes en la planeación de territorios donde se instalan aeropuertos y evidencian que la relación aeropuerto-centros urbanos ha cambiado notablemente desde aquellos tiempos en que los aeropuertos se localizaban según criterios de alejamiento de los cascos urbanos por cuestiones de seguridad y protección ambiental. Los estudios de las ciudades aeropuerto afirman que las instalaciones aeroportuarias producen mutaciones territoriales que se potencian en espacios con débil gobierno local/regional y donde la lógica expansionista de los operadores aeroportuarios se enfrenta con resistencias locales que deben tramitarse mediante estrategias de planeación de uso del suelo que armonicen requerimientos ambientales, con demandas sociales y oportunidades de negocio [13].

Entonces, la presente investigación realiza un análisis urbano, a través del modelo ciudad-aeropuerto, del Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá BOG, en directa relación con la ciudad a la que sirve, Bogotá, capital de Colombia. El aeropuerto comenzó operaciones al final de la década de 1950. A pesar de que el desarrollo de su tráfico, y por lo tanto de sus infraestructuras e instalaciones, fue inicialmente muy lento, a los pocos años empezó un desarrollo urbano en su entorno no ordenado ni controlado que prácticamente no cesó hasta el presente (y cercando, literalmente, al aeropuerto en tres de sus cuatro caras). A principios de la década de 1990 el transporte aéreo se liberaliza en el país lo que da pie, entre otros hechos, a la privatización de los aeropuertos del país [14]. Con ello la demanda de transporte aéreo empieza a crecer y se dispara a partir de mediados de la década del 2000 cuando BOG se privatiza [15]. Desde 2006, por un lado, el aeropuerto ha experimentado dos grandes ampliaciones, y por otro, el entorno del aeropuerto ha visto un relevante e incesante desarrollo urbano en su entorno. Entonces, este artículo analiza y evalúa el desarrollo del modelo *airport-city* en las últimas tres-cuatro décadas desde la óptica urbana.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Fundamentos del concepto *airport-city*

La relación urbana entre la ciudad y el (o su) aeropuerto ha evolucionado de manera sutil y gradual en las últimas dos décadas hasta llegar a poner en evidencia la manifestación espacial de las interacciones de ciertos sectores socio-económicos cuya actividad se centra, casi exclusivamente, en el aeropuerto, como el

comercio, el desarrollo inmobiliario, las industrias de servicios, el sector de la alta tecnología, sector de ocio, la hostelería, etc. Todos estos sectores, unido al desarrollo de las comunicaciones (redes de transporte terrestre), se han complementado para posicionar a los aeropuertos como nuevos centros de crecimiento urbano distintivos [5]. El desarrollo centrado en el aeropuerto comenzó inicialmente *ad hoc*, pero luego evolucionó a un punto en el que el aeropuerto y las áreas circundantes se han transformado en importantes destinos de negocios, compras, trabajo, comercio, ocio y entretenimiento [52]. En dicho proceso, el modelo ciudad-aeropuerto ha adoptado muchas de las características (tanto espaciales como funcionales) de los distritos urbanos centrales [16].

Las comunidades y los gobiernos locales donde se desarrollan los modelos ciudad-aeropuerto están realizando contribuciones positivas que estimulan y energizan este nuevo modelo urbano. Estas contribuciones multifacéticas, tanto de los gobiernos locales como de las comunidades empresariales, son sinérgicas y atraen nuevos negocios, crean nuevos puestos de trabajo y abren nuevas posibilidades comerciales, introduciendo un modelo comercial dinámico que puede adaptarse a las necesidades de viajes aéreos intensivos de una manera ambientalmente responsable. A este respecto, las ciudades-aeropuerto deben estar integradas en el desarrollo de una planificación urbana, donde los gestores aeroportuarios y las autoridades locales se asocian para garantizar una gestión inteligente y mutuamente beneficiosa del uso del suelo para limitar la perturbación del ruido (en los residentes) y preservar la calidad del aire [17-19].

Los aeropuertos, como las ciudades, nunca son estáticos, están evolucionando constantemente en forma y función. Históricamente, los aeropuertos se han entendido como una simple (pero grande en tamaño) estación, destinada exclusivamente a proveer un servicio público de transporte (aéreo). Pero esto ahora está dando paso a un concepto mucho más amplio con el modelo ciudad-aeropuerto. Este nuevo concepto se basa en el hecho de que todas las funciones de los centros metropolitanos modernos están evolucionando (y desplazándose) hacia el entorno de sus aeropuertos, transformando los aeropuertos de ciudad en verdaderas ciudades aeroportuarias [4, 6].

En el modelo de ciudad-aeropuerto, además de su infraestructura y servicios aeronáuticos centrales, los aeropuertos principales han desarrollado importantes instalaciones de servicios cuyo mercado objetivo va más allá del pasajero o del empleado del aeropuerto, lo que contribuye al aumento de los ingresos de los aeropuertos, bajo la modalidad de ingresos no-aeronáuticos (o comerciales) [20].

En definitiva, en un entorno de fuerte crecimiento del tráfico aéreo que está aumentando constantemente y el papel que los aeropuertos desempeñan actualmente como catalizador e imán de la actividad económica mundial, los modelos ciudad-aeropuerto continuarán desempeñando un papel central para acomodar el crecimiento de las actividades económicas y culturales en las grandes ciudades en todo el mundo [21].

2.2 El papel del aeropuerto en la globalización de las ciudades

Con el inicio de la desregulación y la liberalización de la industria de la aviación (finales de década de 1970), que generó un crecimiento superlativo de la demanda (aún en curso), muchos aeropuertos superaron su función de solo estaciones de transporte aéreo y se convirtieron en grandes nodos intermodales urbanos. La globalización, concepto que también impactó en los grandes centros urbanos, acompañó el proceso de transformación de los aeropuertos. Hoy en día, y en varias ciudades / regiones del mundo, ya se está evolucionado a conceptos como ciudad aeroportuaria, región aeroportuaria, aerotrópolis, corredor aeroportuario o *airea* (conjunto de zonas urbanas desarrolladas, no necesariamente conexas o lindantes entre sí, del área metropolitana que están predominantemente influenciadas por el aeropuerto, o que, a la inversa, influyen directamente en el aeropuerto [19]), dando a entender que en la actualidad los aeropuertos están generando desarrollo urbano y económico también a través de una relación sinérgica y simbiótica entre el desarrollo comercial e industrial en el entorno más próximo del aeropuerto [7, 22].

En otras palabras, se está en presencia de ciudades globales que reciben beneficios sustanciales de sus (cada vez más grandes) aeropuertos principales. El éxito de los desarrollos de los aeropuertos, en conjunción con el desarrollo urbano de la ciudad que los acoge, dependió de factores tales como la disponibilidad del espacio (suelo) para el desarrollo del aeropuerto, la ubicación (y conexión) del aeropuerto

dentro de las redes de comunicación terrestre, la estructura socioeconómica de la región, el entorno institucional del gobierno local / regional / nacional, y el marco de planificación (política pública) [9].

Volviendo al concepto de ciudad global, la misma, y según algunos autores, es aquella que se puede considerar como un nodo importante en el sistema económico global. El concepto tiene sus raíces en la geografía y los estudios urbanos, y se basa en la idea de que la globalización puede entenderse como una ciudad desarrollada en lugares geográficos estratégicos, de acuerdo con una jerarquía de importancia para el funcionamiento del sistema global en términos financieros, empresariales, de comercio internacional, etc. [16].

Se han realizado muchos estudios sobre este tema para definir el concepto de ciudad global e identificar sus atributos. Uno de los primeros intentos de definir y clasificar ciudades globales se realizó en 1998 por el Globalization and World Cities (GaWC) Research Network de la Universidad de Loughborough en el Reino Unido [23], ellos agruparon varios indicadores en cuatro grandes grupos característicos: a) económico, b) político, c) cultural, d) infraestructuras. En el presente, el ranking mundial de ciudades globales, según el GaWC, se divide, primero en cinco grandes grupos (alfa, beta, gama, alta suficiencia, suficiencia); el primero de ellos (y más importante) es el alfa, y éste a su vez se divide en cuatro niveles de relevancia: alfa++, alfa+, alfa, y alfa-. Mencionar que la ciudad de Bogotá, caso de estudio de la presente investigación, figura categorizada en el grupo beta, nivel beta+, según el GaWC para el año 2020 [24].

En definitiva, la evaluación de los parámetros incluidos en el ranking de ciudades globales podría ayudar a proyectar futuras ciudades aeroportuarias, convergencia natural de estos desarrollos duales aeropuerto-ciudad o región. La relación estrecha y activa entre la ciudad global y su(s) aeropuerto(s) puede contribuir en la evolución hacia ciudades aeroportuarias sujeta a la disponibilidad de suelo, infraestructura y congregación de negocios e industrias cercanas al aeropuerto [16].

3. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 Datos generales del Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá

El Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá (H24, código IATA: BOG; código OACI: SKBO), situado en la ciudad capital de Colombia, y único aeropuerto que sirve a la ciudad, es de propiedad pública, pero con operación concesionada desde el año 2007 a la empresa (privada) OPAIN, S.A. [14], año en que el aeropuerto experimentó el inicio de una importante ampliación de su infraestructura e instalaciones (principalmente el nuevo edificio terminal de pasajeros), con una inversión de USD 650 millones, y que culminó en el año 2013. En el año 2015 dio inicio una segunda ampliación que finalizó en el año 2018, esta última ampliación implicó actuaciones tanto en el lado tierra como en el lado aire.

El aeropuerto (situado a 2.548 m sobre el nivel del mar) cuenta con un área aproximada de 975 ha, se encuentra a 12 km del centro de la ciudad de Bogotá, y limita con las localidades de Fontibón y Engativá (en sus caras sur y norte respectivamente y también en toda la cara oriental del aeropuerto), ambas pertenecientes, administrativamente, a la ciudad de Bogotá, y por el río Bogotá, y humedales pertenecientes a la zona rural de la ciudad de Funza, en su cara occidental (Figura 1). El aeropuerto cuenta con un sistema de dos pistas paralelas, 13L/31R (pista norte) y 13R/31L (pista sur), ambas para operaciones de despegue y aterrizaje, y cada una con una longitud y ancho de 3.800 x 45 m [25] (AIP, 2019). Las estadísticas para el año 2019 indican que el aeropuerto movilizó 35,1 millones de pasajeros totales (nac. + int.), 741 mil toneladas de carga aérea totales y gestionó 333 mil operaciones (despegues / aterrizajes) totales [26]. En el aeropuerto trabajan, aproximadamente, unas 23.000 personas [27].

3.2 Datos generales de la ciudad de Bogotá

Al 2019 la ciudad de Bogotá presenta los siguientes indicadores [29-31]:

- Superficie: 1.775 km²
- Población: 8,2 millones de habitantes

- División urbana y administrativa: 20 localidades (a su vez compuestas por varios barrios)
- PIB: 273,9 billones de Pesos
- Aportación al PIB nacional: 25,7%
- PIB/cápita: 35.661.888 Pesos
- Índice de desempleo: 10,9%
- Ranking económico de la ciudad: octava economía de Latinoamérica (por PIB)
- Actividad empresarial: 424.000 empresas (todos los tamaños), 1.504 son sociedad de capital extranjero.
- Ranking GaWC 2020 (ciudad global): beta+
- IDH (Índice de Desarrollo Humano): 0,767 (alto)

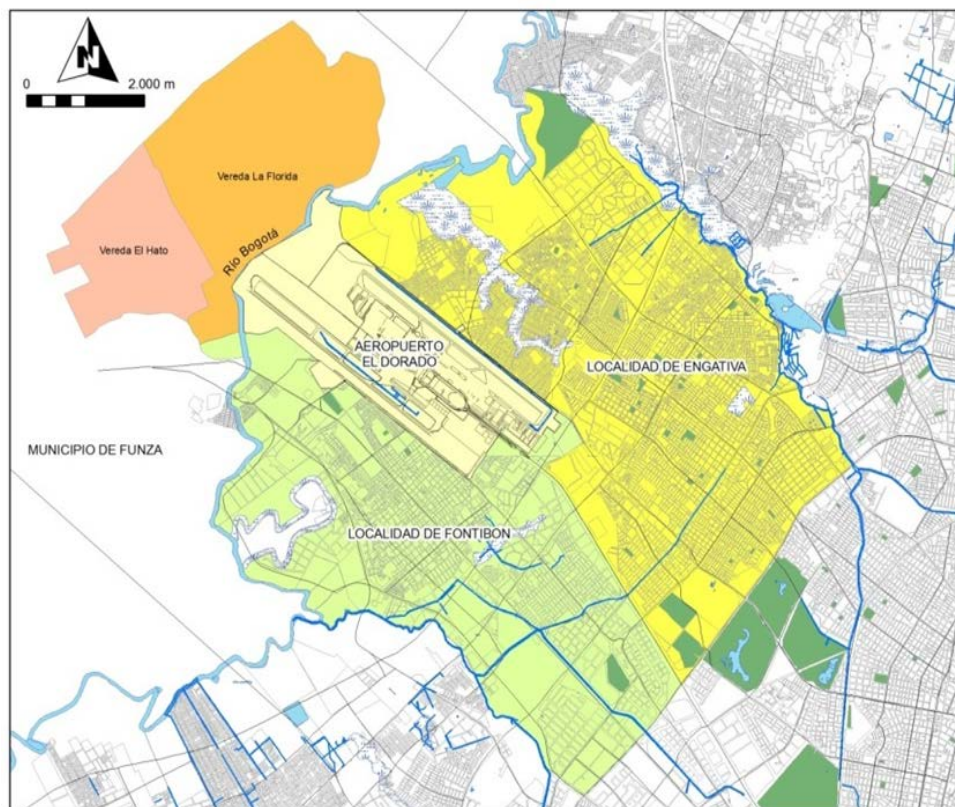


Figura 1. Situación del Aeropuerto El Dorado BOG en la ciudad de Bogotá [28]

3.3 Desarrollo del aeropuerto: evolución y perspectiva futura

BOG ha liderado e impulsado el desarrollo del tráfico aéreo a nivel nacional en las últimas dos décadas y media; desde el año de la liberalización del transporte aéreo en el país (1991) al año 2019 el tráfico total de pasajeros creció cerca del 700% [26]. Este superlativo crecimiento del tráfico, y de la demanda, fue absorbido de forma paulatina en el tiempo, y muy especialmente por las dos últimas ampliaciones del aeropuerto, 2007-2013 y 2015-2018. Ahora bien, estas ampliaciones no implicaron actuación alguna en el sistema de (dos) pistas del aeropuerto.

La capacidad de un aeródromo viene condicionada por la capacidad de su sistema de pistas, y ésta se mide como la cantidad de operaciones (despegues y aterrizajes) por hora que el sistema puede absorber o gestionar dentro de aquellos límites que garantizan la seguridad operacional [32-34]. Entonces, la capacidad declarada del sistema de (dos) pistas de BOG es de 82 operaciones/hora [35]. Por otro lado, la demanda no siempre es la misma a toda hora (y todos los días) sino que existen horas picos (de máxima demanda) y horas valle (de mínima demanda).

Al año 2019 la demanda en horas picos (con respecto a la capacidad declarada) es de 125% para operaciones de despegue y del 110% para operaciones de aterrizaje [26]. Proyecciones de demanda y capacidad requerida, realizadas en la última actualización del Plan Maestro del aeropuerto (iniciada a finales del año 2011 y finalizado en 2014), se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Pronóstico de tráfico aéreo [36]

Año	Pax totales (millones)	Carga total (millones Tn)	Operaciones totales (miles)
2026	45,8	1,2	597
2031	53,2	1,5	682
2036	60,9	1,8	759
2041	69,2	2,1	846

Tabla 2. Previsiones de demanda de tráfico y capacidad requerida [36]

Periodo	Demanda de operaciones (hora pico)	Capacidad requerida	Pistas necesarias
2021-2026	120	118-124	2-3
2026-2031	137	136-154	3-4
2031-2041	154	186-196	4-5

Como se aprecia en las proyecciones de la Tabla 2, a partir de 2021 sería necesaria la construcción de una nueva pista para poder dar respuesta a la demanda proyectada, e incluso más pistas (hasta disponer de un sistema de 5 pistas) en el largo plazo (2041) si se pretende no frenar el crecimiento del aeropuerto. Ahora bien, la factibilidad de expandir el actual número de pistas es inviable, principalmente por razones políticas, ambiental, social y espacial (casi no-disponibilidad de suelo) [36], por lo que esta situación conduce, inevitablemente, al desarrollo de un nuevo aeropuerto.

Por ello, en 2016 la autoridad pública aeronáutica de Colombia aprueba el Plan Maestro del Aeropuerto Eldorado II, con el cual se da inicio al proyecto de desarrollo de un nuevo aeropuerto que servirá a la ciudad de Bogotá y región anexa [37]. Los estudios situaron al nuevo aeropuerto fuera de la ciudad de Bogotá, aproximadamente a 15 km (hacia el oeste) del actual aeropuerto, entre los municipios de Madrid y Facatativá en la región administrativa de Cundinamarca (la ciudad de Bogotá se encuentra en el corazón de esta región, pero no forma parte del mismo desde el punto de vista político-administrativo, ya que tiene estatus de Distrito Especial).

Posteriormente, en 2017, la Agencia Nacional de Infraestructura (ente público que gestiona todas las concesiones en infraestructuras, incluidas las aeroportuarias) inició el desarrollo de los estudios de prefactibilidad y factibilidad de este nuevo aeropuerto, garantizando la definición de la viabilidad financiera, técnica y jurídica que permitan la posterior construcción de este aeropuerto, el cual será complementario al actual aeropuerto. No hay aún una fecha exacta de inicio de operaciones del nuevo aeropuerto, pero se estima para 2028.

3.4 Evolución del desarrollo urbano en el entorno del aeropuerto

El 10 de diciembre de 1959 se inauguró el Aeropuerto El Dorado de Bogotá. Por entonces, el aeropuerto estaba totalmente aislado de la ciudad. En la década de 1960 se presentó un crecimiento urbano incipiente en el entorno al aeropuerto, tanto formal como informal (es decir sin obedecer a ningún tipo de planificación ordenada del territorio). De hecho, en algunas zonas aledañas se empezaban a conformar pequeños núcleos de actividades principalmente residenciales, que no seguían la línea de una ciudad planificada. Simplemente se entenderían como decisiones de localización particulares y dispersas sobre el territorio.

Entrada la década de 1970 el entorno aeroportuario continuaba consolidándose de manera acelerada, el desarrollo urbano importante empezó en el lateral sur del aeropuerto, el desarrollo urbano informal seguía siendo persistente. Entrada la década de 1980 el desarrollo urbano seguía intenso en el lateral sur del aeropuerto, pero también contagió su dinámica tanto en el lateral norte como oriental. Para mediados de la década de 1990 el desarrollo urbano, tanto formal como informal, había, literalmente, cercado totalmente el aeropuerto en sus tres laterales, sur, norte y oriental (recordar que el lateral occidental del aeropuerto no tiene desarrollo urbano (Figura 1)). Destacar que incluso en el presente sigue en curso una urbanización de las zonas antes mencionadas y con un importante porcentaje de informalidad. Este modelo de ocupación, con un relevante índice de informalidad, y nunca oportunamente controlado, ha restringido, en todo este tiempo, el margen de planificación y de acción del aeropuerto y de la misma ciudad [38].

La ejecución del proyecto de la segunda pista del aeropuerto (año 1995) requirió de una licencia ambiental (que se expidió el 7 de noviembre de 1995, mediante la Resolución 1330). Esta normativa definió algunas restricciones de operación con el fin de salvaguardar los intereses de los residentes que se encontraban ubicados en el territorio aledaño. Sin embargo, estas medidas fueron paliativas, pues el problema nunca se resolvió de la manera adecuada. El proceso de mitigación del ruido fue ineficaz, y además se afectó sustancialmente el punto óptimo de utilización del aeropuerto, y por ende su productividad y competitividad. En otras palabras, se redujo la calidad de vida de los habitantes por cuenta del problema de salud ocasionado y se dejaron de percibir utilidades y beneficios en el sector aeronáutico y los demás sectores de la economía que se ven beneficiados por la actividad aeroportuaria [39, 40].

En 1999 la administración local expide un decreto (Decreto Distrital 765 de 1999) mediante el cual se define el área de influencia aeronáutica y aeroportuaria. En esta normativa se restringen los usos residenciales en las inmediaciones del aeropuerto con base a los impactos de la operación aeronáutica en materia de contaminación acústica y presión sonora. No obstante, a pesar de las restricciones en el modelo de ocupación, la conurbación producida en esta zona de la ciudad se entendía como un fenómeno tangible y concreto sobre el territorio, por lo que dicho marco normativo no contó con la aplicabilidad requerida. Esta situación ha dejado en entredicho la capacidad de planificar tanto de la ciudad como de la autoridad pública aeronáutica (propietaria del aeropuerto) bajo un proceso concertado entre los diferentes actores involucrados que permitiera incrementar tanto los niveles de calidad de vida de los residentes vecinos del aeropuerto como el nivel de competitividad del mismo [38].

Entrada la década del 2000, y durante la misma, las diferentes administraciones de la ciudad de Bogotá empezaron a formular estrategias urbanísticas con el objetivo de adelantar intervenciones sobre las áreas del entorno del aeropuerto para configurar espacios de gran accesibilidad y calidad ambiental que incentivaran el desarrollo de actividades empresariales, de servicios aeroportuarios y logísticos, aprovechando las ventajas comparativas de esa localización. Pero ninguna de dichas estrategias logró materializarse. Múltiples conflictos de intereses impidieron desarrollar un instrumento que armonizara y articulara la operación aeroportuaria con el territorio aledaño.

En 2007 el estado nacional, a través de un ente delegado y coordinando intenciones e intereses a nivel local, regional y nacional, expidió una norma [41] mediante la cual se establecía la estrategia institucional para el desarrollo de lo que se denominó Macroproyecto Urbano-Regional del Aeropuerto El Dorado de Bogotá [42], cuyo objetivo era promover el desarrollo armónico y planificado del área de influencia del aeropuerto a través de acciones y actuaciones público-privadas concertadas. En otras palabras, con dicha iniciativa se pretendía sentar las bases para el desarrollo del entorno del aeropuerto bajo el concepto de ciudad aeroportuaria o aerotrópolis. Sin embargo, y debido a conflictos de intereses entre todos los actores implicados, este proyecto no se logró desarrollar ni materializar.

En 2011, la administración local de la ciudad de Bogotá formula un nuevo documento técnico de soporte para la operación estratégica del entorno urbano del aeropuerto. Sin embargo, en esta ocasión la viabilidad financiera de la operación fue limitada, pues no se cuantificaron los costos de las alternativas de solución que se plantearon, y por tanto tampoco se definió un plan de intervenciones e inversiones a corto, mediano y largo plazo, con su respectiva fuente de financiación [38].

3.5 Características del impacto del aeropuerto en el desarrollo urbano de su entorno

Este modelo de desarrollo urbano ciudad-aeropuerto se analiza aquí a partir de cinco dimensiones: 1) usos del suelo (haciendo especial énfasis en la diferenciación de actividades productivas y residenciales), 2) actividades económicas (entendidas desde la perspectiva de localización de empresas y la generación de empleo), 3) renta del suelo, 4) movilidad, y 5) medioambiente.

3.5.1 Usos del suelo

En la Figura 2 se presentan las zonas con el uso del suelo permitido en el área de influencia del aeropuerto. Los usos de suelo identificados obedecen, en primer lugar, a la regulación sobre los niveles máximos

permisibles por ruido ambiental (Resolución 627 del 7 de abril de 2006 expedida por la Autoridad Ambiental Nacional [43]) y, en segundo lugar, a un Esquema de Ordenamiento Territorial EOT para el municipio de Funza, y al esquema de Unidades de Planeamiento Zonal UPZ para las dos localidades (Engativá y Fontibón) pertenecientes, administrativamente, a la ciudad de Bogotá.

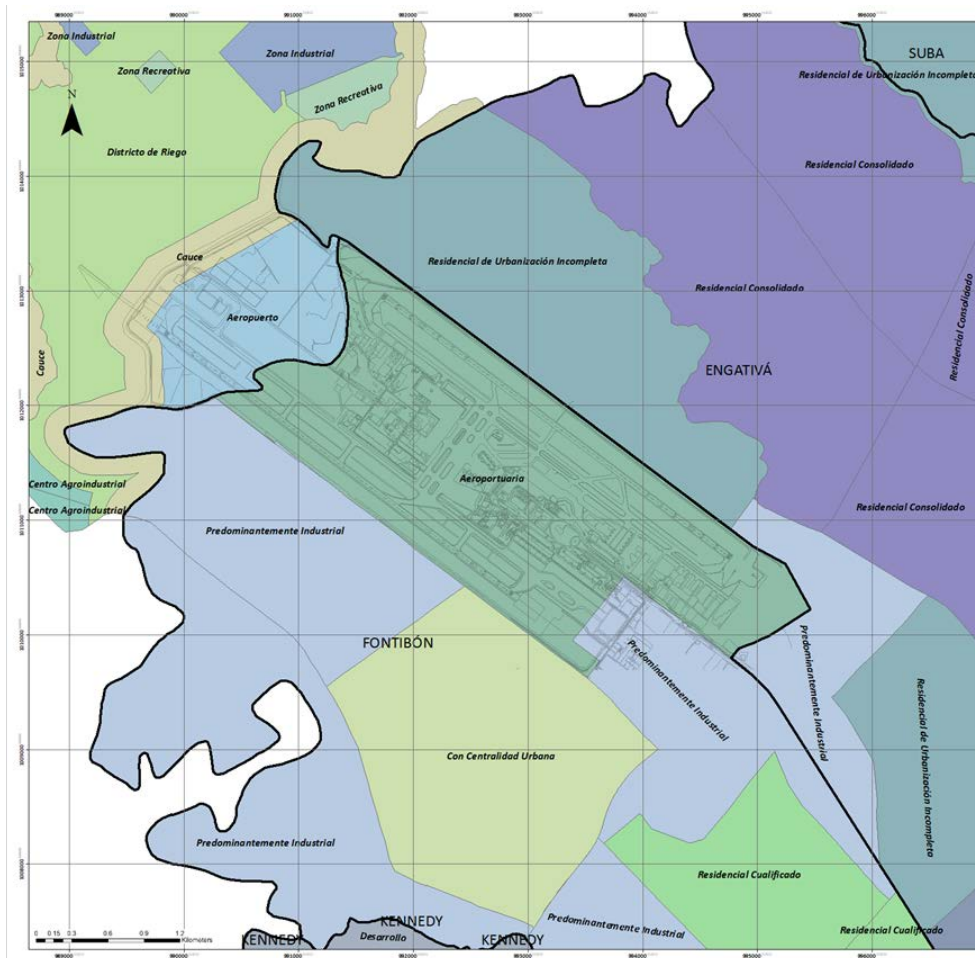


Figura 2. Usos de suelo permitidos en el área de influencia del aeropuerto [51]

A pesar de lo recién mencionado, el desarrollo del uso del suelo en el próximo entorno del aeropuerto ha seguido la siguiente tendencia en el periodo 2004-2016 (los porcentajes son valores medios en el periodo analizado) [38]:

- Residencial: 23,25%
- Industrial: 8%
- Comercial: 11,75%
- Dotacional: 27,75%
- Otros usos (incluido suelo no urbanizable): 29,25%

Ya para 2005 la población en las localidades de los laterales sur y norte del aeropuerto estaban habitados por 297.736 y 795.105 habitantes respectivamente, en otras palabras, más de 1 millón de personas residían en el entorno próximo del aeropuerto [29] (Figura 1). Esta estadística se corresponde con la siguiente: en el año 2008, del total de construcciones existentes en el área de influencia inmediata del aeropuerto, el 90% corresponde a usos residenciales, de los cuales 18% son usos mixtos de vivienda más otros usos, por tanto, se genera un conflicto evidente, puesto que el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Bogotá (del 2004) establecía que en esta zona debía priorizarse solo el uso comercial e industrial del suelo [40, 44].

El desarrollo predominantemente residencial del entorno próximo del aeropuerto evidencia una total ausencia de articulación territorial de la ciudad con el aeropuerto, y presenta un sub aprovechamiento del potencial productivo que podría obtenerse en este especial sector de la ciudad. Además, este no es el único

perjuicio para la ciudad. La localización de zonas residenciales en torno al aeropuerto afecta las condiciones de vida de los residentes, quienes se exponen especialmente a factores de ruido y estrés general derivados de la actividad aeroportuaria [39]. De esta manera la ineficiencia del modelo de ocupación representa un doble daño para la ciudad y la ciudadanía.

En definitiva, la configuración del tejido urbano en torno al aeropuerto ha condicionado su margen de maniobra, en tanto que no refleja parámetros de planificación territorial ordenada. Por el contrario, el crecimiento desordenado ha sido una constante en su entorno, y la concentración de actividades contradictorias a la operación aeronáutica desaprovecha la instalación aeroportuaria como un potencial catalizador de la productividad y la competitividad de la ciudad.

3.5.2 Actividades económicas

La evaluación de la actividad económica parte de identificar las empresas que se localizan en el área de influencia del aeropuerto y los empleos que se generan allí. Entonces, en el periodo 2009-2016 se instalaron en la zona de análisis 49.664 empresas (entre micro pymes, pymes y grandes empresas). De entre todos los sectores industriales se destacan seis que más participación han tenido en el área de diagnóstico, los cuales se relacionan con: comercio; industria manufacturera; transporte y almacenamiento; alojamiento y comida; información y comunicaciones; y actividades científicas y técnicas. Estos grupos representan el 80% del total registrados en el año 2016 [31, 38].

Respecto a las dinámicas de empleo, a partir del Censo de 2005 se registraron aproximadamente 102.000 empleos en el área de estudio que representaron el 7% del total de empleos registrados por este instrumento en toda la ciudad. Del total de empleos registrados, el 48% se asoció con las actividades de comercio y servicios, 32% con actividad industrial y 20% con otros sectores [38, 45].

3.5.3 Renta del suelo

El análisis de precios del suelo tiene como propósito identificar cómo se ha comportado el fenómeno de renta del suelo en el área de estudio. Las estadísticas señalan, entre 2011 y 2017, que para el año 2011 los suelos con precios más altos se localizaron alrededor de la Av. Calle 26 (también conocida como Av. El Dorado, principal vía que conecta el centro de la ciudad con el aeropuerto (Figura 3)), seguido de las áreas comerciales y de servicios de la localidad de Fontibón (en el lateral sur del aeropuerto) y en algunas zonas residenciales de Engativá (en el lateral norte del aeropuerto) (ver Fig. 1). En contraposición, los suelos con precios más bajos se localizaron especialmente en la zona industrial y comercial de la localidad de Fontibón (Figura 1). Para 2017, se identificaron patrones similares a los antes citados [38].

Conforme con lo anterior, a pesar de la localización estratégica de esta zona de la ciudad y su cercanía al aeropuerto, los suelos con vocación económica no se han favorecido por su proximidad con la terminal aérea, por lo cual hoy no se observan áreas económicas que sirvan de soporte a la actividad aeronáutica y se beneficien por su aglomeración y proximidad con el aeropuerto. Este escenario no es deseable pues pone en evidencia que las autoridades locales no han conseguido implementar estrategias de planificación que aprovechen, desde el punto de vista productivo, los potenciales del entorno del aeropuerto. Esta reflexión es fundamental pues señala que la ciudad no ha encontrado la forma de articularse y aunar esfuerzos para posicionar el entorno del aeropuerto como un eje estratégico en el mercado global, desde el punto de vista de la competitividad y la valorización de suelos para actividades productivas.

Esta falta de visión se refleja en la ausencia de implementación de estrategias orientadas al mercado por parte del sector público para garantizar que actividades afines a la operación aeroportuaria pretendan localizarse en esta zona. Es importante reflexionar en torno a esto, pues este tema ha estado ausente en la agenda pública local-municipal, con lo que actualmente el desarrollo urbano de esta área de la ciudad desconoce las posibilidades y potencialidades del primer aeropuerto del país, y el tercero más importante de Latinoamérica por volumen de pasajeros transportados y primero por carga aérea [46], como elemento detonante de crecimiento económico urbano-regional.

3.5.4 Movilidad

En términos de movilidad, la Av. Calle 26, o también conocida como Av. El Dorado, es la única vía principal de acceso al aeropuerto. Esta importante arteria vial fue construida de forma simultánea con el aeropuerto (inicia servicio en el año 1958, un año antes que el aeropuerto), y tiene una longitud de 13,3 km y nace en el centro de la ciudad y termina en el mismo aeropuerto (Figura 3). Para 2015 el área de influencia del aeropuerto es el destino de por lo menos 1,17 millones de viajes en día hábil, y 719 mil en día no hábil [47].



Figura 3. Identificación de las diferentes localidades y red de vías arteriales de la ciudad de Bogotá (a partir de [48])

El aeropuerto tiene un solo modo de accesibilidad, el vial, y durante cinco décadas los medios de accesibilidad, de transporte público, fueron el bus convencional (de línea) y el taxi. Es recién en el año 2012 cuando entra en operación una línea troncal (a lo largo de la Av. Calle 26) del sistema Bus Rapid Transit BRT de la ciudad de Bogotá. Y asimismo el sistema BRT no llega al terminal aéreo, sino que termina en una gran estación de intercambio a 3 km del aeropuerto. De allí, buses alimentadores del sistema llevan a los usuarios al aeropuerto y viceversa, usando los carriles de uso mixto de las vías que conducen al aeropuerto [27].

Una investigación realizada a principios de 2017 [27, 49], sobre la accesibilidad al aeropuerto en estudios, determinó, entre otras cosas, que el 72,6% de las personas que acceden al aeropuerto, ya sean trabajadores/empleados del aeropuerto (e instalaciones anexas) o viajeros (pasajeros aéreos), utiliza el transporte público masivo (es decir, el sistema BRT).

El relevante crecimiento del tráfico aéreo que gestiona el aeropuerto, sumando a ello el dinámico desarrollo urbano en el entorno del mismo (como ya se ha explicado en una sección anterior) conduce a concluir que la situación actual de conectividad ciudad-aeropuerto, a través de una única vía principal (y de un solo modo de transporte, el vial), se presenta como un serio limitante, tanto para el mismo crecimiento del aeropuerto (generando un verdadero cuello de botella) como para los potenciales productivos de la zona de influencia del aeropuerto.

3.5.5 Medioambiente

Las estrategias y acciones en materia de mitigación del ruido en el aeropuerto en estudio dieron comienzo recién en el año 1998 cuando la autoridad pública aeronáutica de Colombia desarrolló el Manual de Procedimientos para Abatimiento de Ruido del Aeropuerto Internacional El Dorado (posteriormente actualizado 2008) [50]. Por lo que hasta el año 1998, y muy en especial en la década de 1990, donde el crecimiento del tráfico empezó a ser relevante, la contaminación acústica en el entorno próximo del aeropuerto no tenía ningún tipo de plan para su mitigación ni control, por lo que afectación (en la salud y bienestar) en los vecinos del entorno empezaba a ser importante [39].

La puesta en práctica de las estrategias de mitigación de la contaminación acústica dio sus buenos resultados, ya que en el periodo 2002-2014, a medida que aumentaban las operaciones aéreas en el aeropuerto (120% en el periodo) el número de personas expuestas disminuía (en un 40% en el mismo periodo), mientras en el mismo periodo la población de las localidades que rodean el aeropuerto aumentaba en aproximadamente un 180% [39]. En la Figura 4 se presenta la comparación de las curvas de 65 dB(A) Ldn de los años 1998, 2003, 2004, 2008 poniendo en evidencia los resultados de la puesta en práctica de las estrategias de mitigación de la contaminación acústica en el aeropuerto en estudio [28, 51].

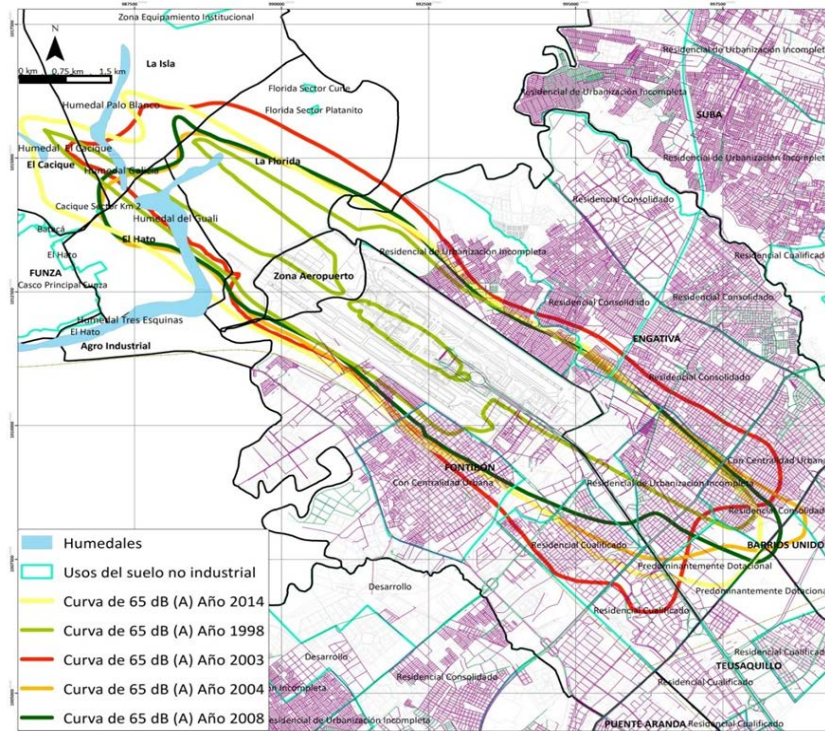


Figura 4. Comparativa de curvas 65 dB(A) en diferentes años sobre la zona de influencia directa del Aeropuerto El Dorado [28]

4. CONCLUSIONES

El Aeropuerto El Dorado se localizó originalmente en zona prácticamente rural, alejada del centro de la ciudad. Con el tiempo el desarrollo urbano fue creciendo desde el centro de la ciudad hacia al aeropuerto y viceversa, y sobre todo en su inmediato entorno. Ante esta evolución el aeropuerto debería haber servido como articulador de la ciudad (Bogotá) y la región (Departamento de Cundinamarca) pero el análisis aquí presentado acusa que su desarrollo ha estado casi totalmente desligado de su entorno inmediato. Hace aproximadamente cinco décadas, poco tiempo después de la entrada en operación del aeropuerto, en las dos localidades que circundan el aeropuerto, dio inicio una ocupación masiva (mayoritariamente informal y no controlada) del territorio por una población en constante crecimiento y con actividades muy diversas.

El Aeropuerto El Dorado ha evolucionado desde una pequeña y modesta infraestructura a una gran instalación que hoy en día conecta la ciudad de Bogotá con el resto del país y el mundo, por lo tanto, con el correr del tiempo ha impactado de manera determinante en el desarrollo económico de la ciudad y su región. En este sentido, el área de influencia directa del aeropuerto ha tenido (y aún lo tiene) un gran potencial urbano pero que sin la presencia de estrategias y escenarios de planificación regional y de concertación público-privadas no se han logrado resolver problemas para los cuales se necesita una visión holística e integrada del territorio, como el aprovechamiento eficiente del suelo, la disponibilidad y calidad del espacio público y la infraestructura de servicios públicos domiciliarios.

En el modelo aquí analizado, Aeropuerto El Dorado, el concepto de ciudad-aeropuerto ayudó a explicar la dinámica de consolidación de este nodo, inicialmente localizado en zona suburbana en los intersticios entre municipios vecinos para luego convertirse en una centralidad que afecta la relación entre metropolización,

desarrollo económico regional, fragilidad ambiental y vulnerabilidad de asentamientos y economías locales. La comprensión de estas condiciones y la toma de decisiones en un marco que reconozca la complejidad de actores e intereses que confluyen en este espacio es, en consecuencia, el primer criterio que debería orientar la gestión presente y futura sobre el entorno del aeropuerto.

REFERENCIAS

- [1] Conway, M. *The Airport City: Development Concepts for the 21st Century*, Atlanta: Conway Publications, 1980.
- [2] Freestone, R. "Planning, Sustainability and Airport-led Urban Development", *International Planning Studies*, vol. 14, pp. 161-176, 2009.
- [3] Walker, A. and Baker, D. "A planning support system for airport city development," *14th Air Transport Research Society Conference*, Porto, Portugal, 2010.
- [4] Kasarda, J. "Aerotropolis: Airport-Driven Urban Development," in *ULI on the Future: Cities in the 21st Century*, pp. 32-41. Washington, D.C.: Urban Land Institute, 2000.
- [5] Freestone, R. and Baker, D. "Spatial Planning Models of Airport-Driven Urban Development," *Journal of Planning Literature*, vol. 26, pp. 263-279, 2011.
- [6] Lindsay, G. and Kasarda, J. *Aerotropolis: The way we'll live next*, New York: Farrar, Straus and Giroux, 2013.
- [7] Appold, S. and Kasarda, J. "The airport city phenomenon: Evidence from large US airports," *Urban Studies*, vol. 50, pp. 1239-1259, 2013.
- [8] Callanan, J. (2016). "Impact of aerotropolis on urban growth and related commercial activity," *22nd Annual Pacific-RIM Real Estate Society Conference*, Sunshine Coast (Australia), 2016.
- [9] Banai, R. "The aerotropolis: Urban sustainability perspectives from the regional city," *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 10, pp. 357-373, 2017.
- [10] Hubbard, J., Mitrib, S. and Miller, C. "Analyzing human capital as a component of the aerotropolis model," *Journal of Air Transport Management*, vol. 78, pp. 63-70, 2019.
- [11] Barros, A. "Sustainable integration of airports into urban planning - a review," *International Journal of Urban Sciences*, vol. 17, pp. 226-238, 2013.
- [12] CCB. *Estrategias e instrumentos de gestión público-privada y de atracción de inversión para el entorno del Aeropuerto El Dorado de Bogotá*, Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, 2009.
- [13] Güller, M. and Güller, M. "La ciudad aeropuerto: de la terminal heroica al manifiesto urbano," *Ingeniería y Territorio*, vol. 83, pp. 48-61, 2008.
- [14] Díaz Olariaga, O. (2017). "Políticas de privatización de aeropuertos. El caso de Colombia," *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal*, vol. 29, pp. 7-35, 2017.
- [15] Díaz Olariaga, O. "Análisis del desarrollo reciente del transporte aéreo en Colombia", *Revista Transporte y Territorio*, vol. 14, pp. 122-143, 2016.
- [16] Ashford, N., Mumayiz, S. and Wright, P. *Airport Engineering*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] Scholl, B. and Nebel, R. "Urban Transformation in Airport Regions," *disP - The Plan. Rev.*, vol. 50, pp. 65-75, 2014.
- [18] de Neufville, R. and Odoni, A. *Airport Systems, Planning, Design, and Management*, New York: McGrawHill, 2013.
- [19] Knippenberger, U. and Wall, A. *Airports in Cities and Regions*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2010.
- [20] Díaz Olariaga, O. "Relevancia actual de los ingresos comerciales aeroportuarios," *Estudios Gerenciales*, vol. 31, pp. 393-402, 2015.
- [21] Stevens, N., Baker, D. and Freestone, R. "Airports in their urban settings: towards a conceptual model of interfaces in the Australian context," *Journal of Transport Geography*, vol. 18, pp. 276-284, 2010.
- [22] Boquet, Y. "From airports to airport territories: expansions, potentials, conflicts," *Human Geographies-Journal of Studies and Research in Human Geography*, vol. 12, pp. 137-156, 2018.
- [23] GaWC. Globalization and World Cities Research Network. Recuperado: <https://www.lboro.ac.uk/gawc/>, 2021.
- [24] GaWC. The World According to GaWC 2020. Recuperado: <https://www.lboro.ac.uk/gawc/world2018t.html>, 2021.
- [25] AIP. *AIP SKBO-Bogotá El Dorado*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2019.
- [26] Aerocivil. Recuperado: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas>, 2021.
- [27] Díaz Olariaga, O., Gavilán, A. y Ortíz, C. "Accesibilidad vial al aeropuerto. El caso del Aeropuerto de Bogotá-El Dorado," *XX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística*, Medellín (Colombia), 2018.
- [28] Aerocivil. *Estudio de impacto ambiental para la modificación de la licencia ambiental el Aeropuerto Internacional El Dorado de la Ciudad de Bogotá*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2014.
- [29] DANE. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado: <http://www.dane.gov.co/>, 2021.
- [30] Banco de la República - Colombia. Estadísticas. Recuperado: <http://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>, 2019.
- [31] CCB. *Balance de la economía de la región Bogotá-Cundinamarca 2018*, Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, 2019.
- [32] Kazda, A. and Caves, R. *Airport design and operations*, Bingley: Emerald, 2015.
- [33] Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W. and Young, S. *Planning and Design of Airports*, New York: McGrawHill, 2010.

- [34] Janic, M. *Airport analysis, planning and design: demand, capacity and congestion*, New York: Nova Science Publishers, 2009.
- [35] AIP. *Organización de la afluencia de tránsito aéreo (ENR 1.9)*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2013.
- [36] Aerocivil. *Actualización del Plan Maestro del Aeropuerto Internacional El Dorado*. Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2014a.
- [37] Aerocivil. *Análisis técnico de la viabilidad operacional y elaboración del plan maestro aeroportuario para el proyecto de infraestructura El Dorado II*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2016.
- [38] Alcaldía de Bogotá. *Aeropuerto El Dorado, retos y oportunidades. Perspectiva urbana y regional*, Bogotá: Alcaldía de Bogotá, 2018.
- [39] Díaz Olariaga, O. "Análisis de mitigación de ruido aeroportuario. El caso del Aeropuerto Internacional de Bogotá-El Dorado (Colombia)," *Ciudad y Territorio*, vol. 197, pp. 557-576, 2018.
- [40] CCB. *Caracterización urbanística, social y ambiental del entorno del Aeropuerto Internacional El Dorado*, Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, 2008a.
- [41] DNP. *CONPES 3490-Estrategia institucional para el desarrollo del macroproyecto urbano - regional del Aeropuerto El Dorado de Bogotá*, Bogotá: Dirección Nacional de Planeación, 2007.
- [42] CEDINS. *Macroproyecto Urbano Regional Aeropuerto El Dorado - MURA. Componentes, impactos y propuestas sociales*, Bogotá: CEDINS, 2011.
- [43] MinAmbiente. Resolución 627 del 7 de abril de 2006. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia), 2019.
- [44] CCB. *Aeropuerto El Dorado, una oportunidad para el desarrollo regional*, Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, 2008b.
- [45] Sánchez, G.A. "Incidencia del aeropuerto Eldorado en la estructura espacial de la ciudad de Bogotá, periodo 1990-2010," *Perspectiva Geográfica*, 16, 173-196. 2011.
- [46] Díaz Olariaga, O. and Ávila, J. (2015). "Evolution of the airport and air transport industry in Colombia and its impact on the economy," *Journal of Airline and Airport Management*, vol. 5, pp. 39-66, 2015.
- [47] "SDM. *Informe de Indicadores Encuesta de Movilidad de Bogotá*, Bogotá: Secretaria Distrital de Movilidad, Alcandía de Bogotá, 2015.
- [48] IDECA. *Infraestructura de datos espaciales para el Distrito Capital*. Recuperado: <https://www.ideca.gov.co/es>, 2019.
- [49] Díaz Olariaga, O., Rodríguez, Y. y Muñoz, C. "Análisis de perfil de usuario y de accesibilidad al aeropuerto," *XX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística*, Medellín (Colombia), 2018.
- [50] Aerocivil. *Manual de atenuación de ruido de las aeronaves para el Aeropuerto Internacional El Dorado*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2008.
- [51] Aerocivil. *El uso de suelos en áreas aledañas a aeropuertos*, Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia, 2009.
- [52] Graham, A. *Managing Airports*, New York: Routledge, 2014.

Tecnologías y enfoques para el aprovechamiento de la energía regenerativa en el transporte ferroviario: Una revisión sistemática

Jesús Arauz Sarmiento¹

Félix Henríquez²

Juan de Dios Sanz Bobi³

Aránzazu Berbey-Álvarez⁴

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá

En este capítulo se presenta una revisión sistemática sobre las tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía y sobre los enfoques para un mejor aprovechamiento. La revisión se divide en dos vías: tendencias más desarrolladas (horarios de operación de los trenes, almacenamiento de energía y subestaciones reversibles) y los enfoques de investigación sobre el aprovechamiento del frenado regenerativo en los sistemas de transporte ferroviario (sistemas híbridos, algoritmos de optimización y técnicas de control, e integración de la generación distribuida).

¹ Contacto: Jesus.arauz@utp.ac.pa

² Contacto: Felix.henriquez@utp.ac.pa

³ Contacto: Juandedios.sanz@upm.es

⁴ Contacto: Aranzazu.berbey@utp.ac.pa

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años ha sido del interés de innumerables grupos de investigación alrededor del mundo el estudio de la tecnología del ferrocarril debido a su gran participación en el consumo energético, generación de dióxido de carbono y contribución al desplazamiento humano dentro y fuera de las ciudades [1]. Consecuente a dicho interés, se ha profundizado el estudio enfocado en la eficiencia de los sistemas de transporte ferroviarios, desde el material rodante, considerando las características eléctricas y mecánicas, hasta el sistema de electrificación y todo lo subyacente a éste [2].

Por lo tanto, la eficiencia energética en el ferrocarril es un campo bastante estudiado y con una gran cantidad de estudios compilatorios en donde se procura mostrar todos los avances a lo largo del tiempo, distinguiendo las tecnologías y enfoques esenciales para su realización y los resultados de la implementación de nuevos sistemas en sistemas ferroviarios existentes a lo largo del mundo.

Sin embargo, no todas las investigaciones ni las revisiones bibliográficas han procurado destacar la situación energética ferroviaria con el mismo alcance. Muchas han dedicado sus esfuerzos por determinar en un espectro general, aspectos como:

- La naturaleza del suministro eléctrico del ferrocarril [3].
- La interoperabilidad a través del Internet de las Cosas (IoT) y Redes Inteligentes (Smart Grid) [4-6].
- El avance de la electrónica de potencia y su rol decisivo en el mejoramiento de la operación y optimización de sistemas [7, 8].
- El estudio del frenado regenerativo para su óptimo aprovechamiento, a través de tecnologías de almacenamiento o sistemas reversibles, con miras a la reducción de consumo energético y aumento de la estabilidad y calidad del sistema de electrificación ferroviario en corriente continua o alterna [9-15].

En [3] se destaca la importancia del desarrollo de los sistemas de suministro de potencia en los sistemas ferroviarios, relacionando directamente la necesidad en el aumento de la capacidad de éste ante la evolución de la demanda sin imposibilitar la rentabilidad económica. Estos autores clasifican los sistemas de alimentación en dos grandes grupos (estaciones transformadoras y convertidoras) y comparan las características técnicas y las exigencias económicas.

En [5] los autores analizan las últimas investigaciones referentes a mantenimiento predictivo, estructuras inteligentes, monitoreo y evaluación de parámetros avanzados, sistemas de video de vigilancia, operaciones de transporte de carga y pasajeros, sistemas de control, ciber seguridad, eficiencia energética, sistemas de señalización, etc. El objetivo general del artículo es proveer un estado del arte detallado de las nuevas tecnologías y servicios de la industria del ferrocarril.

En [15] se simula la línea 8 del Metro de Madrid con fin de simular el comportamiento energético respecto a la circulación y a la demanda de pasajeros, en función a estimar la cantidad de energía regenerada aprovechada en el frenado y seleccionar supercapacitores capaces de almacenar esta energía y usarla en los sistemas auxiliares de las estaciones. Este estudio se hace simulando la dinámica de los trenes y estableciendo como referencia el consumo actual de las estaciones del Metro de Madrid.

Además, se realiza una revisión profunda del concepto de Redes Inteligentes y Micro Redes Inteligentes aplicadas al entorno ferroviario, en el cual se destacan proyectos como Sócrates [16], Sistema Inverfer [17], Merlin [18], E-Lobster [19], Ferrosmartgrid, Osiris [20] y Ferrolinera [21]. El proyecto Sócrates tiene como objetivo desarrollar un prototipo que supervise la calidad de la energía intercambiada entre la red de transmisión y la catenaria de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. El Sistema Inverfer consiste en un inversor conectado en paralelo a una subestación rectificadora de tracción de la línea entre Málaga Fuengirola. El Proyecto Merlin fue una iniciativa interinstitucional cuyos partícipes fueron Alstom, Siemens, CAF, etc. que tenía como objetivo reducir el consumo energético en un 10% anual, mediante el desarrollo de un sistema de gestión que permitiese la optimización del ferrocarril europeo. El proyecto E-Lobster pretende diseñar un sistema avanzado de interconexión ferrocarril-red, que reduzca las pérdidas en ambas

infraestructuras reflejándose en un ahorro del 20% del consumo energético. Ferrosmartgrid consistió en la elaboración de redes inteligentes para la gestión de la energía eléctrica del sector ferroviario. El proyecto Osiris es un esfuerzo conjunto por 17 socios (universidades, fabricantes, operadores, etc.) que ha proporcionado herramientas de cálculo eléctrico y térmico, un sistema de ciclo de trabajo modular e innovaciones técnicas y operativas, como un convertidor auxiliar para trenes de metro (Alstom), un sistema de almacenamiento abordo basado en baterías de ion-litio CAF y un sistema de enfriamiento que utiliza el agua subterránea (Ansaldo STS). La Ferrolinera de Adif aprovecha el frenado regenerativo de los trenes para servir de suministro a vehículos eléctricos a través de estaciones de carga diseñadas con supercapacitores.

Relacionado a la simulación del último autor citado hay muchas investigaciones realizadas, como se mostró con anterioridad. Esto es debido al gran potencial de la recuperación de la energía del frenado regenerativo, que de acuerdo con distintos autores puede variar del 30% al 40% dependiendo de las tecnologías aplicadas y de la calidad del diseño del material rodante [22, 23].

Consecuente a dicha realidad, el objetivo de esta recopilación es ilustrar algunos de los enfoques más recientes relacionados al aprovechamiento del frenado regenerativo, partiendo de las bases establecidas y ya comentadas en otras publicaciones y así aportar una guía a apropiada para incursionar en nuevas tendencias y áreas de investigación dentro de la tecnología del ferrocarril, que demanda la aplicación de competencias transversales como Machine Learning, técnicas de control, técnicas de inteligencia artificial (lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos), generación distribuida, modelado y optimización de sistemas híbridos de almacenamiento.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Tendencias más desarrolladas

En esta sección se resalta el resultado de otras investigaciones, señalando el enfoque investigativo seleccionado, esquematización del procedimiento, conclusiones y líneas de futuras de trabajo. Como no es parte de los objetivos realizar una recopilación de tecnologías de frenado regenerativo, solamente se mencionará lo necesario de dichos trabajos para contextualizar y crear un punto de inicio suficiente para profundizar en los enfoques investigativos contemporáneos.

2.1.1 Horario de operación

Uno de los enfoques de aprovechamiento del frenado regenerativo está en la coordinación de los tiempos de operación de los trenes basados en el principio intrínseco del frenado regenerativo, en donde si una máquina eléctrica de tracción opera en sentido contrario al movimiento actual, se comporta como un generador; por lo tanto inyecta energía al sistema de electrificación y otros trenes en aceleración pudieran usar dicha energía en vez que requerir energía de una red exterior [14]. De acuerdo con el método implementado, se puede obtener ahorros energéticos del 4% [24] al 38.6%[25].

Usualmente, se presentan dos objetivos a optimizar: reducción de la potencia demandada pico y maximización del aprovechamiento del frenado. Dichos objetivos pueden alcanzarse desplazando la aceleración a momento sin pico de demanda, acelerando trenes sin simultaneidad, variando el tiempo de espera en las estaciones, etc. En [14] se presenta una recopilación de diversos métodos de optimización orientados al tiempo en las estaciones: algoritmo genético [26], modelo dinámico de programación [27], modelos heurísticos [28], optimización del consumo en subestaciones [25] y mucho más.

2.1.2 Almacenamiento de energía

Cuando no es posible sincronizar la operación de los trenes, sea por poca cantidad de trenes circulantes o una demanda de movilización de pasajeros muy basta, es aceptable considerar almacenar la energía para luego gestionarla en beneficio de la calidad del sistema. La implementación de estos sistemas de almacenamiento puede estar dirigidos a ahorrar energía [29, 30], operación sin catenaria [31], minimizar fluctuaciones de tensión [32, 33] y reducción de picos de consumo [10, 34].

Los dispositivos más ampliamente usados para sistemas de almacenamiento son las baterías, los supercapacitores y los volantes de inercia. De acuerdo con [2, 11, 12, 35], para control de tensión son más apropiados los supercapacitores y volantes de inercia por su rápida respuesta y su alta densidad de potencia, pero para recuperación de energía y sistemas de energía son más apropiadas las baterías debido a la alta densidad de energía y a la poca corriente de auto-descarga que poseen.

La misma tendencia de selección de dichos equipos de acuerdo con sus capacidades técnicas establece la tendencia en otras soluciones tecnológicas como los vehículos eléctricos híbridos y autónomos. Éstos constan de sistema de alimentación formado por baterías y supercapacitores, en donde las primeras desarrollan el rol principal de suministrar la energía demandada por el motor para realizar el trabajo en cuestión, mientras que los últimos manejan las altas exigencias de potencia que puedan ocurrir. En [36] se comenta sobre este modo de operación previamente comentado, en donde es importante conseguir un intercambio óptimo de potencia, por el cual se implementan convertidores DC-DC para lograr el acople controlado al bus de continua. El uso de supercondensador en las potencias pico aumenta la vida útil de la batería y reduce el costo total de la instalación.

En [37-39] se caracterizan los dispositivos previamente mencionados junto a variantes de éstos de acuerdo con la densidad de potencia y energía, eficiencia de ciclo, auto-descarga diaria, ciclos de vida y tiempo promedio de almacenamiento. En [11] se presentan los datos técnicos de dichas características, en donde se puede señalar la superioridad de las baterías en cuanto densidad energética al oscilar en valores entre 30 Wh/Kg y 250 Wh/Kg dependiendo si son Ni-Cd, Ni-MH, NaS, Li-ion y Lead-Acid. Asimismo, se aprecia que la densidad de potencia de los volantes de inercia y de los supercapacitores puede ser hasta 100 veces superior.

Atendiendo a la ubicación de dichos dispositivos, pueden clasificarse en soluciones a bordo o soluciones estacionarias. Las primeras suelen colocarse en techo o el suelo de los trenes, con más frecuencia en techo debido a que no hay un espacio en el suelo del tren establecido para estos, por lo que es necesario una adaptación [14]. La eficiencia de estos sistemas depende fuertemente de las características del vehículo en el cual está instalados. Según [40] los sistemas a bordo pueden poseer prestaciones superiores a otros sistemas próximamente mencionado respecto al costo de infraestructura, mantenimiento y a la independencia de la operación de la catenaria. En cuanto disponibilidad, seguridad, recuperación de la energía y eficiencia de la transmisión de esta posee aptitudes iguales a los demás sistemas.

Las soluciones a bordo han sido ampliamente estudiadas e implementadas a lo largo del mundo [2]. En los ferrocarriles de Bruselas y Madrid se han obtenido ahorros de energía desde 18.6% hasta 35.8% [41, 42]. En [14] se resume una serie de investigaciones distintas en donde se han implementado baterías (Ni-MH, Li-ion), supercapacitores y volantes de inercia por distintos propósitos [43].

La tecnología de supercapacitores a bordo de la empresa Bombardier, MITRAC Energy Saver, que ha sido instalado en el tren ligero de Mannheim en Alemania representando ahorros energéticos del 30% [44] además de reducir los picos de demanda en un 50%, proporcionando una reducción en los huecos de tensión del sistema; el sistema ACR de CAF basado en supercapacitores instalados en el tranvía de Sevilla [45].

Por parte de la empresa Alstom hay supercapacitores a bordo STEEM instalados en el tranvía de París [45] en donde se consiguió reducción del consumo energético del 10% al 18% y operación sin catenaria en tramos entre estaciones de 300 m [46], baterías a bordo de Ni-MH Salft en el tranvía de Niza [45] y volantes de inercia en el techo del tranvía de Rotterdam [47, 48] para lograr la nivelación de la carga y la operación sin catenaria; y la empresa Siemens tiene sistemas basados en supercapacitores como Sitras MES, que ha sido instalado en el tranvía de Innsbruck (Austria) [45], y sistemas híbridos de supercapacitores con baterías Ni-MH como el Sitras HES instalado en el tren ligero de Lisboa [49].

Por otro lado, están las soluciones estacionarias. El concepto general es que una instalación a un lado de la vía absorba la energía del frenado y la regrese a la catenaria cuando sea requerida, mediante el control de una unidad de potencia. Usualmente son utilizadas para estabilización del voltaje en catenaria, ahorrar energía y reducir picos de potencia demandada. De acuerdo con la tecnología implementada y al fabricante,

se han registrado ahorros de consumo energético del 20% al 30% [14]. Entre las aplicaciones previamente mencionadas, se puede destacar que, pese a la diferencia de las prestaciones entre baterías, volantes de inercia y supercapacitores, todos pueden usarse para lograr los mismos objetivos con más o menos ahorros.

El producto Sitras SES de Siemens, que consiste en supercapacitores, ha sido instalado en los Metros de Madrid, Cologne, Toronto y Beijing con la principal intención de ahorrar energía y estabilizar el voltaje [50]; los supercapacitores Capapost de Meiden, instalados en Hong Kong [51]; la solución de supercapacitores del proveedor Envitech Energy (parte del grupo ABB) Envistore, instalada el metro de Varsovia Philadelphia [51]; en distintas localidades de Japón se instalaron B-CHOP de Hitachi que son baterías de Li-ion, éstas se controlaban directamente por la red y operadas remotamente para regular el voltaje [52]; y en Londres, Nueva York, Los Ángeles y Lyon se han instalado volantes de inercia de Vycon, Kinetic Traction Systems, GTR system y Regen system [14, 51, 53].

2.1.3 Subestaciones reversibles

Finalmente, existen las subestaciones reversibles. Este concepto puede ser comparado a las soluciones estacionarias puesto que se ubican de manera similar y están dispuestos para permitir el flujo de potencia de la catenaria hacia afuera de esta, cuando normalmente no es así. La topología habitual de estos sistemas consisten en poner en paralelo a la etapa de rectificación con diodos que alimenta a la catenaria un inversor o un convertidor DC-DC y un inversor, depende de la instalación [37]. En el mercado existe varios modelos:

- Subestaciones reversibles con un solo convertidor rectificador/inversor HESOP avanzado de Alstom [54].
- Subestaciones reversibles con rectificadores basados en tiristores e inversores en PWM (Harmonic and Energy Saving Optimizer, *HESOP* por Alstom) [55].
- Subestaciones reversibles con rectificadores reversibles basados en tiristores controlados (Enviline TCR por ABB) [56].
- Inversores basados en IGBT conectados en antiparalelo con la subestación rectificadora de diodos (Enviline Energy Recuperation System, ERS de ABB) [2].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores PWM (Sitras por Siemens e INGEBER por INGETEAM Traction Company) [56].
- Subestaciones reversibles con rectificadores de diodos e inversores basados en tiristores controlados (Sitras TCI por Siemens) [57].

Ajeno al tipo de configuración implementada, estos sistemas [2, 54-57] tienen la función de permitir el intercambio natural de la energía del frenado entre trenes como prioridad, minimizando el nivel de armónicos para asegurar una buena calidad de suministro de energía en el lado AC y DC [58, 59].

2.1 Enfoques investigativos contemporáneos

Como se presentó en la sección anterior, los avances tecnológicos referentes al aprovechamiento del frenado regenerativo llevan al menos una década alrededor del mundo. Por lo tanto, la investigación del impacto de éstos en los sistemas está bastante desarrollada y ya hay cientos de casos reales de aplicación en sistemas ferroviarios. Sin embargo, es notable que la factibilidad de los dispositivos ha sido evaluada en la mayoría de los casos sin considerar la interoperabilidad entre éstos y sin aplicar técnicas modernas de control ni algoritmos de aprendizaje. Debido a esto, los próximos estudios intentan demostrar algunas de las nuevas tendencias y los nuevos enfoques de estudio sobre el aprovechamiento del frenado regenerativo que exige al investigador poseer más competencias de distintas áreas del conocimiento.

1.2.1 Sistemas de almacenamiento híbrido, algoritmos de optimización y control

En [34] se plantea optimizar el frenado regenerativo de un camión volquete que, debido a su naturaleza de aplicación, tiene transitorios extremadamente bruscos e inesperados. Los autores consideraron otras

investigaciones aplicadas a líneas ferroviarias, en las cuales se sugería la alteración de las conexiones de un conjunto de supercapacitores, serie y paralelo, para lograr el control óptimo en amplios rangos de voltajes [60]; otro estudio en donde un diseño modular híbrido de motor de combustión con motor eléctrico se alternaban de acuerdo con lo requerido, multifuncionalmente, para reforzar torque [61] y un sistema híbrido batería con supercapacitor en donde éstos se alternan en los procesos de absorción y liberación de energía [62], pero ninguno se acopló a los requerimientos de cambios repentinos de energía.

Por lo tanto, se propuso una combinación en dos etapas de supercapacitor y batería a través de un convertidor DC/DC bidireccional en el cual el supercapacitor opera cuando se frena súbita y tendidamente, así como cuando se acelera para absorber rápidamente la energía, extendiendo el tiempo de vida útil y reduciendo los tiempos de carga/descarga, mientras la batería entra en operación estable para reducir el pequeño rizado de la corriente mientras se carga.

En la Figura 1 se demuestra cómo mediante cuatro IGBT y tres contactores se logra proporcionar etapas absorción y liberación de energía, en el cual el convertidor actúa como BOOST cuando se libera la energía al supercapacitor o de éste al sistema, pero opera como BUCK cuando la batería está absorbiendo el rizado de la corriente demandada por el bus DC en estado estable.

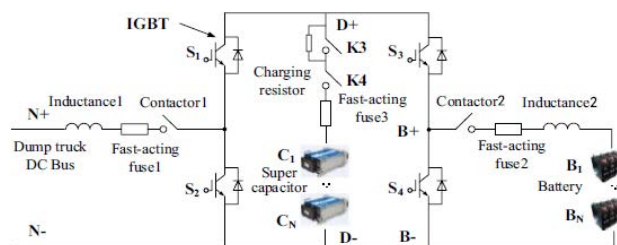


Figura 1. Topología del sistema híbrido [34]

Esta topología propuesta fue experimentada mediante modelos dinámicos en un laboratorio, usando todos los dispositivos mostrados en el esquema junto a osciloscopios, fuentes de poder, y en un vehículo real de aproximadamente 5 toneladas en las minas de carbón de Anjialing. La prueba en campo proporcionó una eficiencia máxima de la recuperación del frenado del 59.46% con un promedio de 53.5%, y una reducción del consumo de combustible máximo de 14.17% con un promedio de 10.29%.

En [35] se propone un análisis de las pérdidas energéticas en un sistema híbrido a través de un análisis de sensibilidad de primer orden de Sobol, en el cual los índices de éste representan la influencia del sistema. El análisis de sensibilidad requiere puntos obtenidos del algoritmo quasi-Monte Carlo para evaluar los índices; es ampliamente usado para determinar la influencia de parámetros sobre una función no-lineal dada [63].

Esta investigación pretende aportar en el estudio del impacto de la carga en los sistemas de almacenamiento, debido a que la mayoría se centra en el impacto de éstos al sistema o basan el comportamiento de éstos en las características del vehículo.

En [64] se comenta la utilidad de un sistema de control optimizado para un sistema híbrido compuesto por baterías y supercapacitores, en donde la eficiencia se evalúa basada en la resistencia equivalente y en la corriente pulsante de la carga; [65] también estudia las pérdidas en vehículos eléctricos a través del enfoque a la resistencia equivalente y la corriente pulsante de la carga, pero minimiza las pérdidas implementando la relación de las resistencias internas de la batería y del supercapacitor; [66] sugiere un control en tiempo real de un sistema híbrido de almacenamiento optimizando las fluctuaciones de corriente y estimando el estado de carga de la batería y del supercapacitor en un vehículo eléctrico en el cual se considera su dinámica para implementar los ciclos de carga-descarga, variaciones de temperatura y comportamiento general de los almacenadores en el modelo.

La Figura 2 muestra el modelo implementado al cual se le realiza el análisis de pérdidas. Éste consiste en una carga (tren) que es alimentado, en paralelo, por la subestación de tracción, un conjunto de baterías y

un conjunto de capacitores. Estos últimos están conectados mediante convertidores DC-DC que consisten en inductores serie, IGBTs y diodos en antiparalelo. El estudio solamente considera el flujo de energía hacia los almacenadores, por lo que el convertidor solamente opera en modo BUCK. La agrupación de baterías se modela como una fuente de tensión controlada por el estado de carga de ésta en serie con una resistencia también dependiente del estado de carga; la agrupación de supercapacitores se describe como una fuente de tensión en serie con una resistencia, en donde la primera representa su voltaje a circuito abierto y la segunda la resistencia interna.

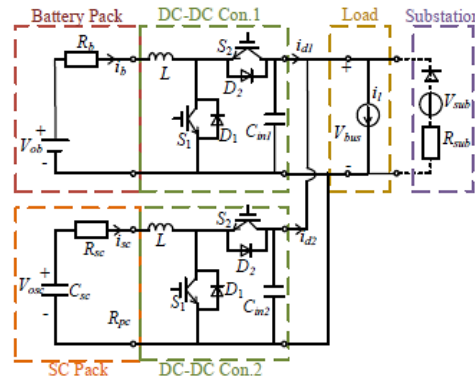


Figura 1. Topología del sistema híbrido de almacenamiento estudiado [35]

El análisis de sensibilidad se desarrolla considerando que la potencia de la carga, representada en el diagrama anterior, depende total de la potencia regenerada que será absorbida por los almacenadores. Dicha potencia está en función de la curva operativa del tren y, en el caso de las respectivas potencias de la batería y del supercapacitor, de la tensión el bus DC que se aproximará a valores constantes. Además, se establece que la potencia de carga del sistema híbrido es casi constante, junto a otros límites operativos considerados como el rango de sensibilidad de las variables (potencias, estado de carga y tensión).

La Figura 3 ilustra los resultados del análisis de sensibilidad de primer orden de Sobol, en donde se aprecia que las pérdidas del sistema de almacenamiento dependen mayormente de la potencia de la carga, así como el supercapacitor. Sin embargo, las pérdidas en la batería dependen de su potencia y estado de carga inicial. En todos los casos se puede desprestigiar la influencia de la tensión en el bus DC, por lo que es apropiado estudiar nuevamente el sistema considerando la tensión constante. Como resultado de la última optimización, se obtiene que las pérdidas en la batería son más dependientes del estado de carga a potencias nominales menores, comportamiento que también posee el convertidor DC-DC menos acusado.

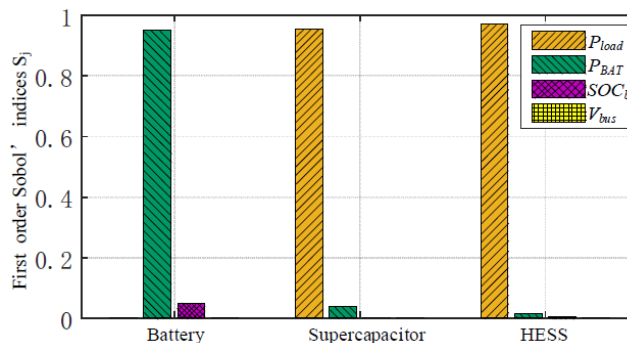


Figura 2. Resultados del análisis de sensibilidad [35]

En [67] se presenta un control novedoso para los sistemas de almacenamiento híbrido en busca de aprovechar las ventajas de cada una de las tecnologías sin que se interpongan unas en el desempeño de las otras. Se comenta sobre el modo de controlar un supercapacitor y una batería para minimizar el flujo de energía hacia la red durante el frenado de un tren debido a que en el control jerárquico la rápida velocidad del supercapacitor limitaría la participación de la batería, lo que implica que el supercapacitor es el que aporta más energía y participa en los ciclos de carga/descarga, siendo este más costoso y volviendo la solución insostenible económicamente.

Se pretende establecer un control cooperativo en donde las respuestas de baja frecuencia son atendidas por la batería y las de alta por el supercapacitor. La batería recibe la consigna de potencia por parte de la red, establece una rampa de respuesta de acuerdo con su potencia, la referencia de potencia del supercapacitor se calcula considerando la consigna de potencia de la batería y la rampa de respuesta, y, en situaciones de operación estable, la batería controla el estado de carga del supercapacitor.

De acuerdo con la variación de la potencia de la batería, se calculan las consignas de potencia y de estado de carga del supercapacitor, aplicando en todo momento la variación de potencia de la red y actualizando el resultado en el algoritmo hasta que la referencia de potencia por aportar del sistema híbrido sea nula. En la Figura 4 se muestran los flujos de potencia resultante, en donde la batería participa mayormente en el intercambio de energía para suplir la demanda y el supercapacitor interviene cuando la variación de potencia es muy brusca. La curva azul ilustra el prácticamente nulo intercambio de potencia por parte de la red, que presenta un leve rizado.

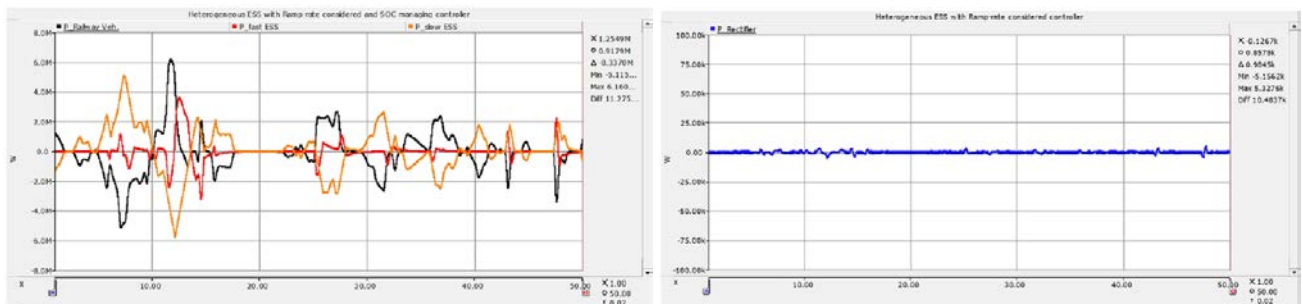


Figura 3. Flujos de potencia del tren, de la batería y del supercapacitor, y potencia a través de la red ante la intervención del control cooperativo [67]

1.2.2 Enfocados en técnicas de optimización

En [68] se estudia la operación de un sistema de almacenamiento estacionario de supercapacitores basado en redes neuronales. Los autores proponen este dispositivo por su buena relación calidad-precio y por el gran desempeño que se ha visto en distintas instalaciones, como en el Metro de Varsovia en donde se logra ahorrar más de 2 MWh en una semana [69] y en el Metro de Washington se logra duplicar el ahorro energético al colocar los supercapacitores entre dos estaciones [70].

Se propone la solución a un algoritmo de redes neuronales que determine el estado de carga (SOC) mínimo del sistema de almacenamiento para su óptima operación. En la actualidad, pocos estudios consideran el voltaje mínimo de operación de los paquetes de supercondensadores y optan por establecer valores constantes que rondan en 25% y 50% [71]. Para determinar el SOC mínimo primero se determinan las pérdidas del supercapacitor [72] y por separado las del convertidor DC-DC; dicho cálculo de pérdidas permite estimar la corriente del supercapacitor en función de la eficiencia del convertidor y obtener una relación que describa la variación de la tensión en las terminales del supercapacitor. Asimismo, para determinar la dirección del flujo de potencia, se utiliza algoritmos del grupo *rule-based determined strategies*. Luego de tener todo relacionado, se aprecia en los resultados la gran influencia del SOC en las pérdidas, en lo cual se nota doble pérdidas para un SOC del 40% respecto a uno de 60%.

Luego se procedió a realizar simulaciones similares a SOC constante, pero variando el SOC de 20% a 70% para relacionar la potencia de salida y, de entrada, en donde aquel SOC que posibilita la máxima potencia de salida es considerado el máximo. Para efectos de comparación, se realizó otra simulación en donde el SOC cambiaba cada 20 min durante 24 h.

Dicho resultado se presenta del artículo, aquí se presenta que los valores mínimos para la óptima operación rondan entre 30% y 90% (Figura 5) dependiendo de la carga instantánea. Con estos resultados, se entrenó una red neuronal con 1200 entradas, una capa escondida y 61 salidas activadas con la función de Sigmoid. Dicha red se entrenó con otros perfiles de carga supuestos y se logró a un porcentaje de precisión del 23%. Los resultados señalan que operar manteniendo el óptimo SOC proporcionaría un incremento del 10% en el aprovechamiento del frenado.

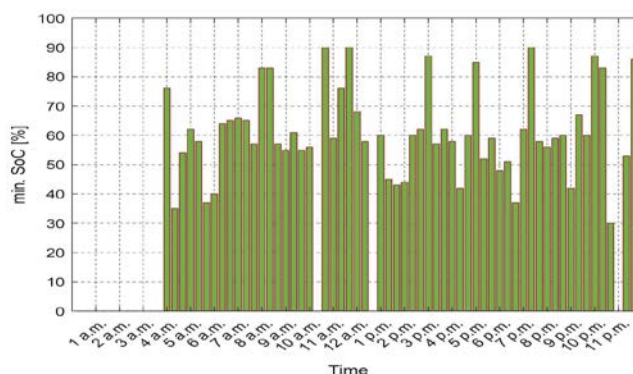


Figura 4. SOC mínimos a los distintos tiempos de operación [68]

En [23] se desarrolla un entorno de optimización de dos etapas para determinar las combinaciones óptimas entre distintas tecnologías de almacenamiento (baterías, supercapacitores y volantes de inercia) considerando parámetros como ahorro de energía, regulación de voltaje, reducción de pico de demanda, período de retorno de la inversión y la resiliencia del sistema.

La primera etapa consiste en el modelo matemático de cada uno de los dispositivos operando solo o en combinación con los demás. Se consiguen las expresiones que representa el SOC, la energía total, el tiempo de descarga mediante la ecuación de Peukert [73] y el voltaje respectivo. Cada una de las naturalezas de los dispositivos es descrita detalladamente. Seguido, se consideran las restricciones lineales y no lineales de las ecuaciones desarrolladas para guiar el proceso de optimización no lineal (algoritmo genético).

La segunda etapa consiste en el modelo de simulación que utiliza los resultados de la etapa de optimización. Esta etapa modela la subestación como dos etapas en paralelo de un transformador y un rectificador basado en diodos; un transformador posee una configuración estrella-delta y el otro delta-delta para evitar el error de fase. La catenaria y su carril de retorno se modelan como dos resistencias variables: una que procura representar el movimiento del tren entre las estaciones y otra que representa la resistencia del riel por unidad de longitud. El tren se simula con las ecuaciones de Newton para relacionar las fuerzas resistentes y el par generador por el motor [73].

Luego de completar las dos etapas, se simula todo el sistema para lograr recuperación de la energía del frenado del 15%, 25%, 35% y 45%. En la simulación al 15% se obtiene que la solución más cara y la más barata son baterías y supercapacitores, respectivamente, así como la combinación de baterías con supercapacitores es más barata que con volante de inercia. Los resultados frente a otros porcentajes de ahorro de energía proporcionan resultados similares, pero el comportamiento de cada uno de éstos en un perfil de potencia de 24 h sí permite sugerir una guía de aplicación:

- Recuperación del frenado menor al 25%
 - Control de carga: supercapacitores.
 - Resiliencia: ninguno
 - Solo ahorro energético: supercapacitores.
- Recuperación del frenado mayor al 30%
 - Control de carga: volantes de inercia.
 - Resiliencia: baterías con supercapacitores.
- Recuperación del frenado entre 25% y 45%
 - Solo ahorro energético: baterías con supercapacitores.
- Recuperación del frenado mayor a 45%
 - Solo ahorro energético: baterías.

De esta manera, se observa que la aplicación de sistemas híbridos solamente es viable para valores mayor al 30% de la recuperación del frenado regenerativo. En [74] se propone resolver el problema del dimensionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento a bordo mediante la aplicación de algoritmos de programación lineal de enteros mixtos, basado en la ley de la conservación de la energía y en

flujo de potencias. Solamente se consideran supercapacitores, volantes de inercia y baterías de ión-litio, comparándolos con la aplicación real de éstos en casos reales de la línea Chang-ping Beijing. Previamente, ya se ha investigado modelos de optimización integrados dirigidos al aumento tasas de ahorro energético con el estudio de los perfiles de velocidad y el tiempo en estaciones de los trenes [75], así como se ha estudiado el dimensionamiento de dispositivos de almacenamiento de energía estacionarios y abordó sin restricciones de volumen ni peso, mediante simulaciones [76] y algoritmo genético para minimizar la energía a través de la catenaria y la inversión inicial [77].

Pero la mayoría de los autores aún necesitan un método de optimización que considere las características físicas de los dispositivos de almacenamiento y la operación del material rodante, por lo que este estudio propone una solución en donde se determine el tamaño óptimo de los almacenadores que minimizaría el consumo de energía por parte de la catenaria, implementando los datos reales de operación de la línea Beijing Chang-ping.

Luego de establecer la función a minimizar, que es la diferencia entre la energía de tracción y la descarga de los dispositivos de almacenamiento, se introducen parámetros como volumen, masa y costo mediante la densidad energética y el costo por kWh mostrados en la tabla 2 del artículo. Los resultados indican que, sin restricciones, como las antes mencionadas, el supercapacitor posee las mejores relaciones de ahorro energético por capacidad, costo y volumen, estableciendo una relación del 18.2% y 0.5% respecto del volante de inercia de la batería, respectivamente, en relación con su energía almacenada. Sin embargo, los tres dispositivos (volante de inercia, supercapacitor y baterías) logran reducir el consumo de la catenaria en 23.7%, 23.6% y 22.9%, respectivamente. Si se aplican restricciones de costo y de volumen, el supercapacitor y el volante de inercia son las mejores opciones (Figura 6). La batería resulta totalmente impráctica ante las restricciones de \$10 000.00 y 0.25m³, en donde exige el mayor consumo por parte de la catenaria y un mínimo aporte de energía en su descarga.

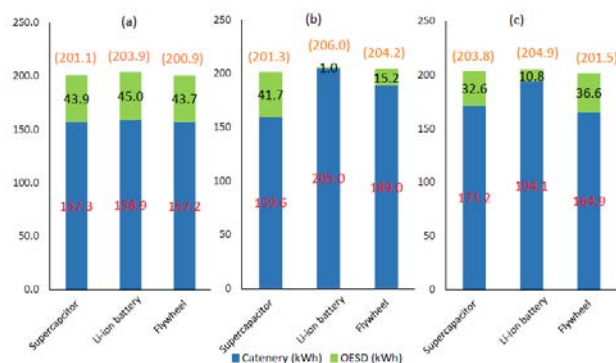


Figura 5. Resultado de la optimización del mínimo consumo de energía por parte de la catenaria: a) sin restricciones, b) restricción de costo máximo de \$10000.00, y c) restricción de volumen máximo = 0.25m³ [74]

[78] también enfoca su estudio en el óptimo dimensionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía, pero se enfoca únicamente en líneas en DC y en dispositivos a un lado de ésta. Se aplica optimización por nube de partículas, dirigida a maximizar los beneficios económicos a través de maximizar el valor presente neto de la inversión y minimizar el periodo de retorno. Dicho método de optimización ha sido ampliamente usado: [79] optimiza el tamaño del dispositivo de almacenamiento minimizando su costo, sin encontrar la mejor ubicación; [80] determina la mejor posición y tamaño para un supercapacitor, estableciendo como objetivo a minimizar la energía demandada de la red; [81] también propone optimizar mediante la minimización del costo anual de la energía para establecer la óptima posición y el óptimo tamaño, haciendo una aproximación económica-técnica, pero considerando otros parámetros distintos de los de [78].

La novedad de este artículo está en centrarse en desarrollar una metodología apta para estimar los óptimos dimensionamientos de los dispositivos de almacenamiento al centrarse en maximizar los beneficios económicos en vez de reducir el consumo de energía. Esto se realiza en un simulador dinámico desarrollado por los autores en donde se consideran las pendientes, curvas, túneles, límites de velocidad, características aerodinámicas y motrices del vehículo, puntos kilométricos de las subestaciones, tipo de rectificadores,

características de la catenaria, frecuencia de trenes, etc. Para obtener los flujos de carga por aportar de las subestaciones y fluyentes en la catenaria, así como la variación de voltaje y las pérdidas en la línea. Los resultados finales de energía se traducen en flujos de caja a través de la representación de la potencia instalada, energía aportada y energía recargada por parte del medio de almacenamiento, para representar el valor presente neto y el periodo de retorno. Luego se maximiza el valor presente neto de acuerdo con la potencia nominal, energía aportada y la posición del dispositivo considerando límites técnicos como intensidad, tensión, estado de carga y otros.

Al considerar una línea de 72 km con seis subestaciones eléctricas de 5.4 MW de potencia nominal, ubicadas cada 15 km, en la cual un tren de 500 toneladas, 360 km/h de velocidad máxima y eficiencia del motor de 85% desarrolla un ciclo de 16 horas con 3 picos de demanda, se encuentra que el tamaño óptimo del almacenador de energía es 0.4 MWh, ubicado en el kilómetro 55 (entre la estación 4 y 5 de la Figura 7) con un retorno de 2 años, 9 meses con un costo de 0.015 euros/kWh.

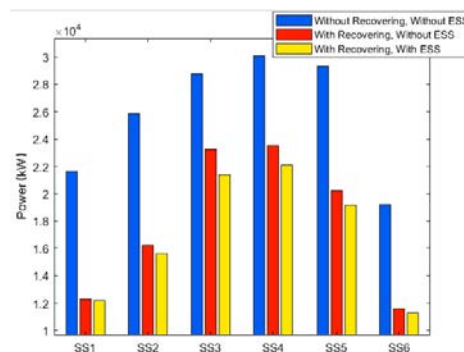


Figura 6. Resultados de la potencia suministrada por la red de la optimización con un almacenador de energía [78]

En [82] se propone un nuevo método basado en la implementación de un estabilizador activo a bordo del tren que atienda la dinámica de la tensión de continua en el bus DC de los sistemas de tracción. Los niveles bajos de tensión pueden provocar la inestabilidad del sistema y, asimismo, fallas en los dispositivos, reducción de la vida útil e incumplimiento del servicio de transporte masivo a la ciudadanía; dicha problemática puede ocasionarse por huecos de tensión en la red de distribución, caídas de tensión en los alimentadores de la red y por la naturaleza de carga constante de los convertidores. [83] optimiza el tamaño de un banco de capacitores y la gestión de la energía a través de algoritmo genético, así logra mitigar considerablemente las variaciones en la tensión; [84] resuelve los problemas de fluctuaciones de tensión de un estación de tracción débil instalando una estación de supercapacitores al final de la línea; [85] propone un sistema de optimización enfocado en reducir las pérdidas generales del sistema en pro de asegurar eficiencia y estabilidad. Se plantea encontrar las características necesarias de una subestación de almacenamiento basada en supercapacitores para una línea de tracción DC.

Este sistema consiste es un supercapacitor (Figura 8) conectado a través de un convertidor DC-DC operando en modo BOOST que desarrolla dos algoritmos por separado, atendiendo a la naturaleza de carga constante de los convertidores.

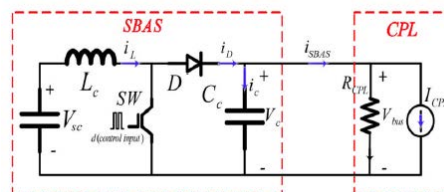


Figura 7. Circuito representativo del Supercapacitor Based Active Stabilizer [82]

El primer algoritmo (Figura 9) pretende desarrollar un control efectivo del valor de la capacitancia equivalente del bus DC, mediante el control de la corriente de estabilizador, que se regula a través de un control predictivo. Luego de que la estabilidad está asegurada, el segundo algoritmo establece las desviaciones necesarias para controlar el voltaje del bus, esto se realiza variando el voltaje de salida del

estabilizador. La lógica del primer algoritmo está fundamentada en [86] donde, aunque cada convertidor (lado de red y lado de carga) están operando en estabilidad, la estabilidad del sistema en cascada puede eliminarse si la impedancia de salida del convertidor del lado de red coincide con la impedancia de entrada del convertidor del lado de la carga. Debido a esto, el primer algoritmo solamente actúa cuando no se está cumpliendo la capacitancia mínima del bus. Usualmente, se selecciona el valor de la capacitancia considerando la peor situación de tensión, por lo que se instalaría un valor bastante alto, pero esto reduciría la eficiencia y la respuesta del sistema.

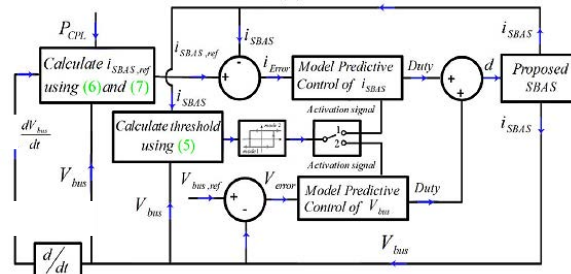


Figura 8. Sistema de control de dos modos de estrategia de control predictivo orientadas al cálculo de la capacitancia y a la tensión en el bus [82]

Los resultados proporcionaron estabilidad y una caída de tensión máxima del 2% frente a ambos escenarios planteados: un ciclo de trabajo en donde se acelera a 80 km/h, se mantiene y luego se frena, en 30 s y 80s, respectivamente; y un hueco de tensión en el lado hace del 50% de la tensión nominal.

[32] se enfoca en mejorar la eficiencia energética de un tren en frenado mediante la integración de un inversor en paralelo con la estación rectificadora de potencia. La línea en estudio contempla tres estaciones rectificadoras de 12 pulsos en una línea de 1750 V en DC. En la estación central se instala un inversor trifásico, con un rango de potencia de 1MW a 2.25MW, que pretende recuperar la mayor cantidad de energía del frenado e inyectarla a la red, mantener la tensión de la catenaria en el punto de conexión a la estación y no permitir el flujo de potencia de la red hacia la catenaria en condiciones normales de operación.

El estudio propone dos metodologías de control distintas para el inversor (Figura 10). La primera es el control de la caída de tensión: éste funciona considerando un coeficiente de caída que se determina como el cociente de la diferencia de la tensión máxima con la tensión deseada en catenaria, con la corriente máxima proporcionada por el inversor. Al haber diferencias de tensión, la corriente suministrada por el inversor a la red sigue una característica proporcional al anterior coeficiente para compensar dicha desviación. Este método fue implementado por [87] y logró recuperar el 22.5% de la potencia de frenado, limitado por las características del control y por la estrategia de frenado del tren.

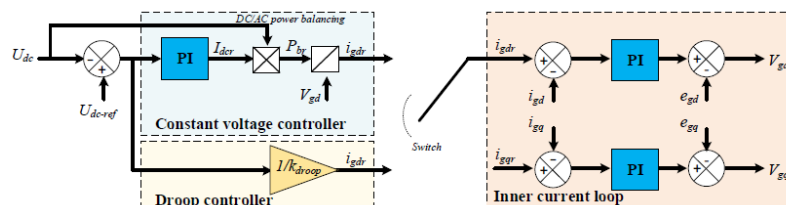


Figura 9. Esquema de control sugerido por los autores [32]

Debido a dicho límite, se propone la segunda metodología a tensión constante, que usualmente se usa en micro-grid en continua [88] y en generación distribuida con energía renovable [89]. Consiste principalmente en un regulador proporcional integral que anula la diferencia entre la tensión en catenaria existente y la deseada. La salida del regulador proporciona, a través de relaciones proporcionales debido a la naturaleza eléctrica del sistema, la corriente de referencia de la red en coordenadas dq ubicadas en la red. La corriente de la red de referencia se compara con la corriente real y se introduce a otro regulador proporcional integral que considera las ecuaciones de tensión de red en coordenadas dq de la red. Posterior al recorrido de la señal, se realizan las transformadas inversas de Park (implementando un PLL para conseguir el ángulo de referencia) y de Clarke y crear los pulsos que debe proporcionar el inversor.

Para validar el control sugerido, un tren realiza una trayectoria de 5.825 km a largo de las tres estaciones en un periodo de 175 s alcanzando la velocidad crucero de 120 km/h al segundo 70 hasta el 120. Con el control basado en la caída se consigue una desviación máxima de 175 V en el tren y 75 V en la estación, y con el control basado en tensión constante se consigue una desviación máxima de 100 V en el tren y -50V en la estación. Además, se consigue mejorar la tasa de recuperación de energía de frenado al 32.89% y al 54.45% con el control basado en caída y en tensión constante, respectivamente.

1.2.3 Integración de la generación distribuida

En [90] se atiende el problema del control de la calidad de suministro en los sistemas de alimentación de los ferrocarriles mediante la integración de generación renovable y un control Tensión-Potencia Reactiva. La generación considerada es la fotovoltaica, que es integrada al suministro ferroviario mediante un *inversor inteligente* y un medio de almacenamiento. El estudio implica un análisis de sensibilidad para obtener la cantidad de reactiva por inyectar, un método de reserva de energía adaptativo para conducir los excesos de generación y almacenarnos en el dispositivo de almacenamiento escogido y se formula el problema del decremento de las pérdidas del sistema y establecimiento de un buen perfil de tensión mediante una optimización multi objetivo.

Se toma de referencia la previa utilización de la generación distribuida para la regulación de tensión en líneas de distribución de [91], donde también se utiliza análisis de sensibilidad con algoritmos de optimización por enjambre partículas, pero sin considerar las pérdidas; y [92], donde se emplea un control óptimo de un inversor mediante la potencia reactiva para mitigar las fluctuaciones de tensión debido a la alta penetración de energía fotovoltaica, considerando una sola unidad generadora. Basado en los enfoques de ambos, se propone una estrategia multi-agente (Figura 11) compuesta por agentes definidos por centros de bases de datos, un implementador del algoritmo y un controlador; conjunto batería y paneles solares para la acumulación de energía; y un inversor inteligente como el actuador de la gestión de la energía.



Figura 10. Diagrama de topología propuesta [90]

La solución final del control es la determinación de la optimización global del problema planteado, realizando inicialmente un análisis de sensibilidad económico Tensión-Potencia Reactiva para estimar la inyección ideal de reactiva que cada unidad de generación distribuida ha de aportar. Además, la energía de la instalación fotovoltaica es apropiadamente transformada mediante la etapa de control adaptativo para las reservas. La optimización global pretende conseguir la potencia ideal para mantener el perfil de voltaje dentro del rango considerado aceptable. Luego se comprueba la efectividad del método en una red de 6 nudos: tres subestaciones de tracción (Nudos carga), dos generadoras fotovoltaicas y una acometida de la red. En los resultados se aprecia el ascenso de la tensión de 0.96 pu a 1.00 pu en el mismo nudo inspeccionada ante la misma demanda por parte del ferrocarril.

[93] y [94] estudiaron la óptima planeación de generación fotovoltaica a lo largo de una línea de alta velocidad. [94] propone un método cuantitativo que estudia las características espaciales de la generación fotovoltaica y la demanda eléctrica del tren de alta velocidad, que integra un análisis matemático *costo beneficio* para evaluar la rentabilidad del acople de la generación distribuida con sistemas de almacenamiento mientras que consigue la óptima planificación y gestión de la energía. Los resultados proporcionan la capacidad de suplir el 32.5% de la demanda de los trenes y un ahorro de 40 mil dólares

anuales. Ambos autores consideran un sistema similar al de la Figura 12, en donde la energía puede almacenarse, inyectarse a la catenaria o a la red, considerando que al inyectarse a la red también puede redirigirse a otra sección de la catenaria.

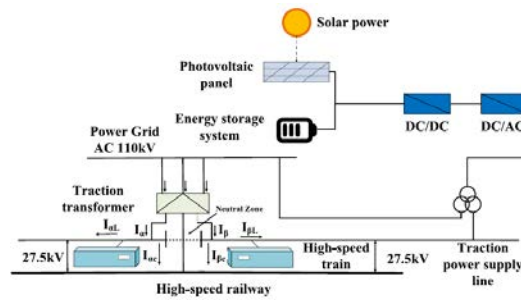


Figura 11. Esquema de conexión propuesto por [94]

[93] parte del modelo general propuesto por [94], pero profundiza en los criterios de evaluación para ubicar las instalaciones fotovoltaicas a lo largo de la línea de alta velocidad. Dentro del modelo multi-objetivo se consideran la irradiancia global, la temperatura promedio, la topografía de los posibles sitios de instalación, la distancia de la red de transmisión o distribución, la demanda periódica de los trenes de alta velocidad, la posible afección a la red por la segura fluctuación de generación, la posible afección a las subestaciones de tracción que se reflejará en alteraciones de tensiones en la catenaria y otros factores sociales y políticos. Ambos autores se enfocan en la integración de la energía solar debido a su costo en constante decremento, bajos costos de O&M y con el propósito de mejorar las finanzas de las líneas de alta velocidad chinas que están en constante expansión, mientras se consigue reducir las emisiones de dióxido de carbono.

[95] propone la utilización de micro redes para abastecer la demanda de las estaciones de los ferrocarriles, en vez de enfocarse en suministrar energía para la tracción. A diferencia de algunas autores que también han propuesto implementar micro redes para el abastecimiento de la energía en estaciones [96], éste se enfoca en las características de la demanda eléctrica de la estación y propone un control efectivo, comprobando su efectividad con simulaciones, para cuatro modos de operación distintos en donde se categoriza la carga, se gestiona la generación y el exceso de esta. El sistema estudiado es como el de la Figura 13, en donde se aprecia la utilización de una batería conectada al mismo enlace de continua que la generación solar para aportar estabilidad; ambos conectados a la red de baja tensión de la subestación mediante un inversor y un transformador.

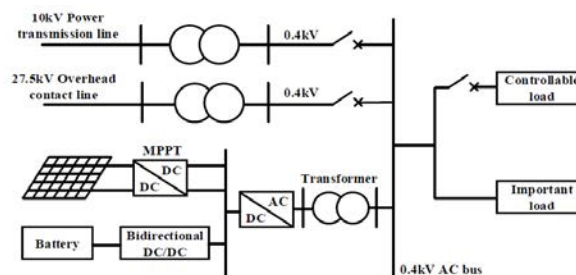


Figura 12. Estructura del sistema de potencia de una estación ferroviaria basada en micro redes [95]

También es apreciable la representación de interruptores para desligar la línea de suministro externo, el hilo de contacto de la catenaria y carga prescindible de la estación. Dichos elementos definen los modos de operación:

- Modo 1: se prioriza la generación solar para abastecer la demanda y si hay energía sobrante se reserva en la batería, que está en modo de recarga trabajando cerca al punto de máxima potencia.
- Modo 2: se prioriza la generación solar para abastecer la demanda y si hay energía sobrante, pero la batería ya está cerca de saturarse, se reduce la producción de energía para solo satisfacer la carga y mantener el balance en la red. Cuando el estado de carga de la batería reduzca por debajo del 90% se regresa al modo 1.

- Modo 3: la cantidad de energía fotovoltaica no es suficiente para suplir la demanda, por lo que la batería apoya al abastecimiento de la carga hasta que el estado de carga sea inferior al 20%, en donde cambia al modo 4.
- Modo 4: La generación fotovoltaica ni la batería pueden seguir la carga, por lo tanto, la red externa suplir la energía mientras que la batería se carga aisladamente con la generación fotovoltaica. Una vez sobrepasado en 20% del estado de carga, se procede al modo 3.

El control también considera la posibilidad de operar en modo isla cuando la red externa tiene algún fallo y debe desconectarse. El control usado para la generación del PWM del inversor controlado por corriente es *Deadbeat*, por su carencia de retardo en estado estable, buena respuesta dinámica y posibilidad de seguimiento de corriente. De acuerdo con los resultados, la micro red es capaz de suplir los requerimientos de la estación ferroviaria rápidamente, tanto en condiciones de falla como en los modos de operación descritos.

[97] examina la aplicación de *energy routers* para el acople de la generación renovable al suministro de una línea en corriente alterna. La Figura 14 presenta la integración de generación fotovoltaica y micro hidroeléctrica mediante el *energy routers*. Este consiste en varias etapas de convertidores con 2 enlaces de continua y acoplados mediante transformadores de alta frecuencia. La generación solar se conecta directamente en un enlace de continua mientras que la microhidroeléctrica al enlace de baja tensión AC. Dichos enrutadores son considerados como la mejor opción para acoplar generación renovable a un sistema con usuarios y no usuarios de la subestación de tracción por la reducción de los problemas de calidad de energía, además del óptimo control de los flujos de potencia.

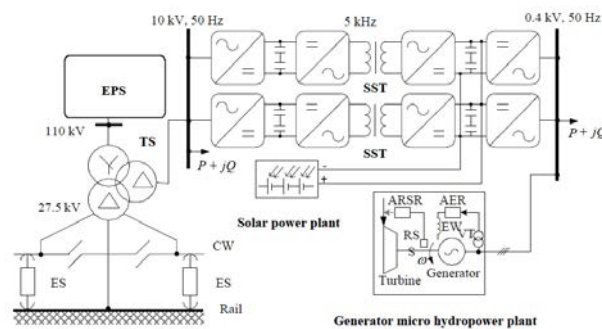


Figura 13. Utilización de un energy router en un sistema de potencia [97]

El sistema en cuestión fue probado con el paquete de Simulink SimPowerSystems, en donde la generación solar posee una capacidad de 215 kW, la hidroeléctrica 250 kW, la demanda es de 4.66 MVA y los dos enrutadores de energía, SST, de 3 MVA cada uno. Los resultados muestran poca distorsión en la tensión del bus de 0.4 kV y, además, se sometió ante cortocircuitos monofásicos, bifásicos y trifásicos y se compararon los resultados de las corrientes de falla del sistema propuesto respecto a un transformador tradicional y se logró reducir la magnitud de la falla en un promedio de 14%.

[98] estudia la arquitectura del control debido para lograr la resiliencia de micro redes, en el cual se busca balancear los intercambios de energía entre la aceleración y frenada del tren, la unidad de almacenamiento, la generación distribuida y el aporte de la red. La Figura 15 es el esquema, en donde se distingue el bloque MGCC que es en donde se generan las consignas de potencia que deben suministrar la generación eólica y solar. Las ordenes hacia los convertidores están basadas en encontrar el punto de menos costo de operación, en donde se considera la posibilidad de inyectar energía a la red o suministrarla directamente a la carga, así usando los *breakers* del esquema.

Aunque en el modelo no esté el medio de almacenamiento, el estudio contempla la utilización de un volante de inercia debido a su razonable densidad de energía y potencia, y respuesta dinámica, pero que solo se acoplaría dependiendo del escenario de costos iniciales y costos de la energía de la red. El control, además de velar por el intercambio a menos costo de energía, procura proveer un perfil de voltaje aceptable, por lo que implementa una estrategia de control de dos fases en el inversor de la generación solar. Los resultados

presentan tiempos de retorno de 4.47 y 2.146 años para los paneles solares y la turbina eólica, respectivamente, respecto a las finanzas, y confirman la capacidad del control en seguir prudentemente la demanda de los trenes con la generación renovable, confirmando la efectividad del control.

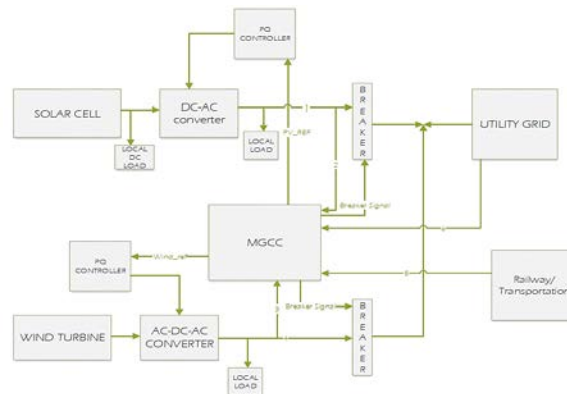


Figura 14. Arquitectura de la micro red [98]

[99] contempla la posibilidad de usar subestaciones de tracción totalmente energizadas por generadores eólicos y estabilizadas por dispositivos de almacenamiento. En este caso se contempla alimentar una catenaria de 25 kV en alterna de 300 km de extensión con circulación de trenes de mercancía y pasajeros. La Figura 16 ilustra distintos flujos de potencia posibles en la catenaria para completar la demanda de los trenes E. De acuerdo con las direcciones de las flechas, se distinguen cinco regímenes de operación:

- En ausencia de trenes y generación eólica, carga directa del almacenador.
- En ausencia de trenes y carencia de generación eólica, carga por parte de la red y del generador eólico al almacenador.
- En presencia de trenes frenando y que no se logre la coordinación de otros acelerando, carga del almacenador mediante el frenado regenerativo.
- En presencia de trenes, abastecimiento por parte del generador eólico.
- En presencia de trenes y excediendo la potencia eólica disponible, abastecimiento por parte del generador eólico y la batería.

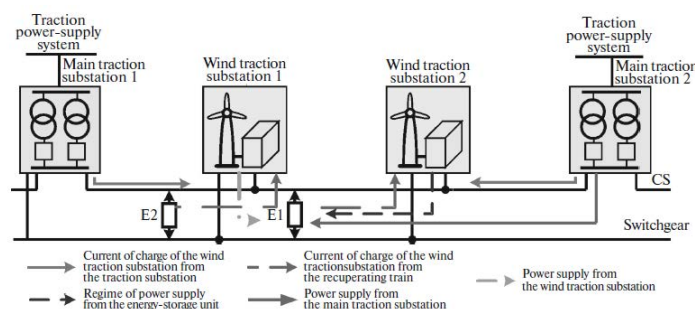


Figura 15. Catenaria con subestaciones de tracción convencionales y eólicas [99]

La estimación del tamaño de las subestaciones eólicas, su disponibilidad y los regímenes de operación contemplan una distribución de la velocidad del viento en el emplazamiento, así como el aumento de las pérdidas en la catenaria al cargar el almacenador con la red externa. La subestación eólica está compuesta por un generador eólico que emplea un generador asíncrono, un rectificador unidireccional, un convertidor DC-DC acoplado entre el enlace de continua y el almacenador, un convertidor bidireccional DC-AC y un transformador para conectarse a la catenaria. Los resultados finales sugieren el empleo de 4 a 6 subestaciones eólicas y 2 subestaciones convencionales en las esquinas del trayecto, en las cuales cada subestación eólica posee 3 unidades de 2300 MW, bajo la suposición de vientos de 7 a 9 m/s. Los tamaños de los generadores podrían no considerarse generación distribuida, pero es notable la gran extensión del trayecto y los modos de funcionamiento en donde se espera suplir la mayor cantidad de la demanda con las subestaciones eólicas.

[100] recopila las topologías para ferrocarriles en corriente continua y alterna de acuerdo con las características técnicas de éstos y cómo delimitarían el alcance de la implementación de micro redes.

Las micro redes en baja tensión de corriente continua pueden estructurarse mediante la conexión directa a la catenaria o con una derivación de la subestación de tracción. Estos sistemas poseen enlaces de continua a los mismos niveles de tensión que la catenaria (1500V-3000V) en donde, mediante convertidores DC-DC y DC-AC se conectaría generación renovable, dispositivos de almacenamiento y otras extensiones para cargas particulares. Debido a la propia composición de la electrificación, la energía del frenado regenerativo puede ser aprovechada por cualquier otro tren a lo largo de la línea o regresarse en las subestaciones a la red, alimentar auxiliares de las estaciones o almacenarse; para realizar las dos primeras alternativas es necesario adaptar las subestaciones unidireccionales o bidireccionales con la instalación de otro dispositivo en paralelo o modificando todo el sistema.

La limitación de suministro y demanda de potencia por parte de la micro red está condicionada por los niveles de tensión, que establece los máximos flujos extras admisibles para no comprometer la operación del ferrocarril. Por lo tanto, en sistemas baja tensión en corriente continua se sugiere la conexión de generadores y cargas de baja o mediana potencia (hasta 150 kW). Para permitir mayor explotación en las micro redes en corriente continua, se prefieren sistemas de 7.5 kV a 24 kV, en donde todo lo mencionado se acoplaría igual, pero dando oportunidad a mayores flujos de potencia (mayor generación y demanda) y a la interconexión con otros sistemas ferroviarios en menor tensión.

En la corriente alterna, explotada en mayores niveles de tensión debido a la necesidad de redes de transporte más extensas y con mayores requerimientos de potencia, es más fácil implementar generación distribuida de alta potencia. Sin embargo, al no haber conexión entre todas las zonas de la catenaria debido a las distintas fases de la red que la alimentan, el aprovechamiento del frenado regenerativo junto a la generación distribuida y la implementación de estaciones de carga super rápidas se reduce. Para esto, se puede implementar convertidores como interfaz entre la catenaria y un enlace de media tensión en corriente continua, que además ayuda a reducir el contenido de armónicos en la red; la topología de micro redes que acoplen líneas en continua y en alterna se denomina híbrida.

Aún con dicha implementación, la separación de zonas mediante zonas neutras restringe el aprovechamiento del frenado regenerativo y la generación distribuida en toda la línea; para esto se conectan las dos zonas de la catenaria en alterna mediante convertidores AC-DC aislados, en cuyo enlace de continua se conectaría la generación distribuida, dispositivos de almacenamiento y cargas especiales. Dicha solución resuelve el problema de la interconexión, pero reduce la inyección de potencia por las características intrínsecas de los tiristores de los convertidores. Para solventar esa restricción, es posible desarrollar varios niveles de tensión con la conexión de varias etapas de convertidores en paralelo, que mediante acoplamiento magnético definirían un mismo enlace de tensión en donde se conectaría la generación distribuida y demás elementos considerados.

Todas las topologías de micro redes comentadas son aguas debajo de la subestación de tracción, pero en los sistemas de corriente alterna también se podría instalar un transformador de tracción de tres devanados para acoplar los convertidores de interfaz entre el secundario y terciario del transformador, mientras forman un enlace de continua donde se conectaría la generación distribuida, medios de almacenamiento, suministro a cargas específicas o auxiliares, etc.

La Figura 17 contiene un resumen detallado de las topologías comentadas, en donde se distingue la capacidad de flujo de potencia, calidad de suministro, utilización del frenado regenerativo, estabilidad del sistema, cantidad de zonas neutras y ubicación de la conexión del sistema, a lo largo de la línea o solamente en subestaciones de tracción.

Supply Type	MG Type	Power Flow Capability	Power Quality Problem	RBE Utilization				System Stability	Number of Neutral Section (NS)	Along With Line Implementation	Substation Implementation
				Supply Adjacent Section	Fed Back to the Grid	Saved in ESSs	Supply Internal Loads of Substation				
DC	LV DRMG	Low	Low	✓	*	✓	✓	High	No NS	✓	✓
	MV DRMG	High	Low	✓	✓	✓	✓	High	No NS	✓	✓
	ARMG	Medium	High	—	✓	✓	**	Low	Full	✓	✓
AC	IFC	High	Medium	—	✓	✓	**	Medium	Full	—	✓
	Hybrid ARMG	Low	Low	✓	✓	✓	**	High	Full	—	✓
	Cophase	Low	Low	✓	✓	✓	**	High	Half	—	✓

* It is possible when using reversible substation.
** If the regenerative train is far from the substation, it is not reasonable to supply internal loads due to the high amount of power loss along the line.

Figura 16. Resumen de implementación de micro redes [100]

3. MÉTODO

La Metodología de este artículo de investigación corresponde a la primera fase del proyecto de fin de master titulado: Metro de Panamá: Estimación y aprovechamiento alternativo de la energía de frenado regenerativo [101]. Este TFM es fruto de la colaboración entre la Universidad Tecnológica de Panamá y la Universidad Politécnica de Madrid (España).

Fases	Materiales y programas	Actividades
Fase 1 Estado del Arte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Archivo Digital UPM ▪ Artículos científicos conseguidos (Science Direct, Elsevier, IEEE, etc) ▪ Mendeley ▪ Google scholar ▪ Researchgate 	<ul style="list-style-type: none"> a) Recopilación de artículos científicos a través de motores de búsqueda (Google Scholar), el archivo digital de la universidad y otras bases de datos. b) Análisis Bibliométrico. c) Compilación de avances logrados y nuevas tendencias. d) Revisión y análisis reflexivo del marco conceptual.

4. RESULTADOS

La Tabla 1 corresponde a un resumen tabular de la revisión de la literatura científica y una clasificación de acuerdo con el tipo de técnica, algoritmo, método, enfoque que ha sido desarrollo en el documento citado. Es una tabla de naturaleza comparativa, que permite tener una síntesis reflexiva sobre la temática tratada.

Tabla 1. Resumen tabular del Estado del arte

1: Dimensionamiento y posicionamiento 2: Revisiones bibliográficas (reviews), estudios de casos 3: Sistemas de almacenamiento (capacitores, baterías, volantes de inercia); 4: Convertidores; 5: Optimización y control; 6: Generación Distribuida 7: Sistemas híbridos									
Autor	Año	1	2	3	4	5	6	7	Instituciones
Popescu et al., [2]	2019	x							University of Craiova
Serrano et al.,[3]	2017	x				x			Universidad Carlos III de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Luleå Tekniska Universitet, (SUECIA)
Train et al.,[4]	2017	x							CRRC Zhuzhou Institute Company, Ltd
Fraga-lamas et al., [5]	2017	x							Universidade da Coruña
Ballesteros et al., [6]	2020			x	x				Universidad Politécnica de Madrid
Villalba et al., [7]	2019	x				x			Universidad Politécnica de Valencia
Hayashiya et al., [8]	2020	x							Railway System Technical Research Institute, Advanced Collab. Research Organization for Smart Society (ACROSS), Waseda University,Japan
Mousavi et al., [9]	2017	x	x	x					Iran University of Science and Technology, Tehran Regional Electric Company (TREC), Tehran, Iran, Islamic Azad University, Tehran, Iran, École de Technologie Supérieure, Canada
Berrueta et al., [10]	2019	x	x						Universidad de Navarra, Belfast Academy
Liu et al., [11]	2020	x	x						University of Leeds
Zhang et al., [12]	2020	x	x						Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation LTD, Beijing Subway Operation Technology Centre, Beijing Jiaotong University Yangtze River De Ita Research Institute
Lu et al., [13]	2017			x					Beijing Metro Operation Co. Ltd, Beijing
Khodaparastan et al.,[14]	2019	x	x	x					City University of New York, USA
Martin et al., [15]	2020			x	x				Universidad Politécnica de Madrid
Dutta et al., [23]	2020	x	x			x	x		The City University of New York,
Albrecht [24]	2004					x			Minia University,Egypt

Tian et al., [25]	2017			x	University of Birmingham,UK
Nasri et al., [26]	2010			x	Sharif University of Technology, Iran
Van Mierlo et al., [27]	2004				Vrije Universiteit Brussels, Brussels
Fournier et al., [28]	2015			x	Inria Paris-Rocquencourt, GE Transportation - Equipe Delta
Brenna et al., [29]	2020	x			Politecnico di Milano, Italy; University of Trieste, Italy; University of Rome Sapienza, Italy
Minaminosono et al., [30]	2019	x			China Academy of Railway Sciences Corporation Limited
Yang et al., [31]	2020	x	x	x	CRRC Zhuzhou Locomotive Co, Beijing Jiaotong University, Beijing Institute of Technology,
Krim et al., [32]	2020			x	University of Monastir, Tunisia Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), Francia
Cui et al., [33]	2019		x		Hunan University, Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd, Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Lim.
Liu et al., [34]	2020		x	x	Wuhan Instit. Technology, China Coal Pingshuo Group Co., Ltd.
Liu et al., [35]	2019		x	x	Beijing Jiaotong University
Abdelhedi et al., [36]	2017		x	x	INSAT - Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie [Tunis]; MIS - Ampère, Département Méthodes pour l'Ingénierie des Systèmes; MMA - INSAT Tunis; Renewable Energy Research Group
Ghaviha et al., c	2017	x	x		Mälardalen University,Suecia, SICS Swedish ICT AB, Suecia
Chatzivasileiadi et al., [38]	2013		x		Cardiff University, UK
Chen et al., [39]	2009	x	x		University of Leeds, Chinese Academy of Sciences
Arboleya et al., [40]	2016	x	x		University of Oviedo, CAF Turnkey and Engineering, CAF Turnkey and Engineering Company
Barrero et al., [41]	2008	x	x		Vrije Universiteit Brussel, Université Libre de Bruxelles
Barrero et al., [42]	2010		x		Vrije Universiteit Brussel
Boizumeau et al., [43]	2011	x	x		STIB (Brussels, Belgium), GMPT (Manchester, UK), moBiel (Bielefeld, Germany), RATP (Paris, France) RET (Rotterdam, The Netherlands).
Steiner et al., [44]	2007		x		Bombardier Transportation, Mannheim, Germany Fachhochschule Amberg-weiden, Amberg, Germany
González-gil et al., [45]	2014			x	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)
Moskowitz et al., [46]	2010		x		Newcastle University
González-Gil et al., [47]	2014			x	Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)
Lacôte et al., [48]	2005	x	x		ALSTOM Transport
González-gil et al., [51]	2013	x	x		Newcastle University
Konishi et al., [52]	2012		x		Railway Technical Research Institute, West Japan Railway Company, Seibu Railway Co., Ltd.
Castro et al., [53]	2007		x		Alstom Transport, USA
Cornic et al., [55]	2010	x	x		Alstom Transport, USA
Gelman et al., [56]	2009			x	VG Controls, Inc.
Lu et al., [58]	2019			x	China University of Mining and Technology, Shenshuo Railway Branch Company of China Shenhua
Hao et al., [59]	2020		x	x	Beijing Jiaotong University
Li et al., [60]	2018			x	University of Kaiserslautern, Germany
Nasari et al., [61]	2019			x	University of Michigan
Rezaei et al., [62]	2017			x	Michigan Technological University, Electrical Engineering Department
Sobol [63]	2001			x	Institute for Mathematical Modelling of the Russian Academy of Sciences,
Yin et al., [64]	2014		x	x	University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University
Zhao et al., [65]	2015		x		University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute
Cao et al., [66]	2016		x		University of Illinois at Urbana Tesla Motors, USA, University of Illinois at Urbana
Lee et al., [67]	2020		x	x	Semyung University Korea Railroad Research Institute
Jefimowski et al., [68]	2020		x	x	Warsaw University of Technology
Radu et al., [69]	2019		x	X	Warsaw University of Technology

Barrero et al., [71]	2008		x	x	Vrije Universiteit Brussel Université Libre de Bruxelles
Devillers et al., [72]	2013	x	x	X	Institut FEMTO-ST
Iannuzzi et al., [73]	2012		x	X	University of Naples Federico II University of Birmingham
Wu et al., [74]	2020	x	x	X	South China University of Technology Xi'an Jiaotong-Liverpool University, University of Liverpool,
Wu et al., [75]	2018		x	X	Xi'an Jiaotong-Liverpool University University of Liverpool, Jiangxi University of Science and Technology,
Ratniyomchai et al., [76]	2014	x	x	x	University of Birmingham
Herrera et al., [77]	2016	x	x	x	IK4-IKERLAN Technology Research Centre Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles
Lamedica et al., [78]	2020	x	x	x	Sapienza University of Rome,
Yoshida et al., [79]	2018	x	x	x	University of South Carolina Columbia University, University of South Carolina
Calderaro et al., [80]	2015	x	x	x	University of Salerno
Graber et al., [81]	2018	x	x	x	University of Salerno
Naseri et al., [82]	2020		x	x	Shiraz University, Aalborg University, Aalborg, Denmark, Grenoble Electrical Engineering Laboratory (G2ELab) France
Xia et al., [83]	2015	x	x	x	Beijing Jiaotong University
Rufer et al., [84]	2004		x	x	Swiss Federal Institute of Technology, SEMER, Passy, France
Iannuzzi et al., [85]	2012		x	x	University of Naples "Federico II"
Zhang et al., [86]	2016		x	x	University of Sheffield (UK)
Almaksour et al., [87]	2019		x	x	Railenium, SNCF Réseau, SNCF- Direction Innovation & Recherche
Cabrane et al., [88]	2017		x	x	x Chungnam National University, Mohammadia School of Engineers
Krim et al., [89]	2018			x	University of Monastir, Tunisia Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI)
Pan et al., [90]	2017		x	x	x University of Florida
Li et al., [93]	2020			x	x North China Electric Power University,
Zhong et al., [94]	2020		x	x	x North China Electric Power University
Xie et al., [95]	2020		x	x	x Lanzhou Jiaotong University China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd.
Bulatov et al., [97]	2018		x	x	Bangladesh University of Engineering and Technology
Gabbar et al., [98]	2017		x	x	x University of Ontario Institute of Technology, Zagazig University, Egypt
Kotel'nikov et al., [99]	2017		x	x	Railway Technical Research Institute, (Japan), Meidensha Corporation
Brenna et al., [100]	2020	x	x	x	Polytechnic University of Milan

El estado del arte corresponde a un total de 85 publicaciones que corresponde a artículos científicos de temáticas como: dimensionamiento y posicionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía con relación a la línea eléctrica, artículos sobre recopilaciones de la literatura científica y estudios de casos, capacitores; sistemas de almacenamiento; convertidores; metodología de optimización y técnicas de control; generación distribuida y sistemas híbridos. Como reflexión inicial, esta revisión documental se cierra en presentar los avances tecnológicos existentes, en dos aristas, primero las tecnologías existentes más desarrolladas y como segundo aspecto, aquellos enfoques de las metodologías de investigación para el modelado, la optimización, el control y su implementación en los sistemas de transporte ferroviarios.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el primero de los aspectos, las tendencias más desarrolladas se presentan: el enfoque de horarios de operación [14, 24-28] almacenamiento de energía [2, 10-12, 14, 29-53] y subestaciones reversibles [2, 37, 54-59]. El enfoque del control de los horarios de los trenes corresponde al aprovechamiento de la energía que se libera con el frenando de los trenes y su aprovechamiento por otro tren que este traccionando u otra entidad eléctrica que requiera ese consumo de energía. De acuerdo con el método implementado, se puede obtener ahorros energéticos del 4% [24] al 38.6% [25]. Bajo el enfoque del control de horarios de las operaciones de los trenes, [14] presentó una recopilación de diversos métodos de optimización en

combinación con técnicas de algoritmo genético [26], modelo dinámico de programación [27], modelos heurísticos [28], optimización del consumo en subestaciones [25], entre otros métodos.

Con respecto a la tendencia tecnológica relacionada con el almacenamiento de energía, se tiene que los dispositivos más ampliamente usados para sistemas de almacenamiento son las baterías, los supercapacitores y los volantes de inercia. Los sistemas o mecanismos de almacenamiento son esenciales para el buen aprovechamiento de la energía sobrante de los sistemas energéticos regenerativos. De acuerdo con [2, 11, 12, 35], para control de tensión son más apropiados los supercapacitores y volantes de inercia por su rápida respuesta y su alta densidad de potencia, pero para recuperación de energía y sistemas de energía son más apropiadas las baterías debido a la alta densidad de energía y a la poca corriente de auto-descarga que poseen estas.

Siguiendo con las tendencias más desarrolladas y la localización de estos dispositivos de almacenamiento de energía, estos se clasifican en soluciones a bordo del tren (techo o suelo) o soluciones estacionarias (al lado de la vía ferroviaria). Por ejemplo, las soluciones a bordo del tren han alcanzado ahorros de energía desde 18.6% hasta 35.8% en los ferrocarriles de Bruselas y Madrid [41, 42]. Otra de las tecnologías a bordo del tren, es decir, los supercapacitores de Bombardier, MITRAC Energy Saver, han representado ahorros energéticos del 30% [44], en el tren ligero de Mannheim en Alemania además de reducir los picos de demanda en un 50%, proporcionando una reducción en los huecos de tensión del sistema; el sistema ACR de CAF basado en supercapacitores instalados en el tranvía de Sevilla [45].

Por parte de la empresa Alstom hay supercapacitores a bordo STEEM instalados en el tranvía de París [45] en donde se consiguió reducción del consumo energético del 10% al 18% y operación sin catenaria en tramos entre estaciones de 300 m [46], baterías a bordo de Ni-MH Salfit en el tranvía de Niza [45] y volantes de inercia en el techo del tranvía de Rotterdam [47, 48] para lograr la nivelación de la carga y la operación sin catenaria; y la empresa Siemens tiene sistemas basados en supercapacitores como Sitras MES, que ha sido instalado en el tranvía de Innsbruck (Austria) [45], y sistemas híbridos de supercapacitores con baterías Ni-MH como el Sitras HES instalado en el tren ligero de Lisboa [49].

Para los casos de las tecnologías estacionarias, dependiendo de la tecnología implementada y del fabricante de esta, se han registrado ahorros de consumo energético del 20% al 30% [14]. Entre las aplicaciones para los sistemas de almacenamiento, se puede destacar que, pese a la diferencia de las prestaciones entre baterías, volantes de inercia y supercapacitores, todos pueden usarse para lograr los mismos objetivos con más o menos ahorros.

Para los casos de tecnologías subestaciones reversibles, independientemente del tipo de configuración implementada, estos sistemas [2, 54-57] tienen la función de permitir el intercambio natural de la energía del frenado entre trenes como prioridad, minimizando el nivel de armónicos para asegurar una buena calidad de suministro de energía en el lado AC y DC [58, 59].

Con respecto a la segunda vía, es decir, los enfoques contemporáneos de líneas de investigación, se presenta: el enfoque basado en sistemas de almacenamiento híbrido [34, 60-67] algoritmos de optimización y control [23, 32, 68-89] e integración de la generación distribuida [90-100]. Por ejemplo, [34, 35, 60-67] y el enfoque relativo a la integración de la generación distribuida [90-100]. En general, se realizan investigaciones sobre la aplicación de técnicas de control, la optimización, técnicas heurísticas, análisis de sensibilidad, simulaciones de vehículos y el cálculo de las pérdidas en sistemas híbridos.

Siguiendo con este primer enfoque, pero más enfocado en las técnicas de optimización se presentó una síntesis de trabajos [23, 32, 68, 69, 71- 89]. Por ejemplo, [89] realiza una combinación de técnicas de control con lógica difusa; [60] presenta un estudio sobre técnicas de control adaptativo; [93] utiliza una función multiobjetivo y [28] presenta un algoritmo heurístico. En el tema de sistemas y vehículos híbridos se recogen las investigaciones de [23, 34-36, 61, 62, 64, 65, 67, 82, 88].

Con respecto al segundo enfoque sobre la integración de la generación distribuida [90- 100] es abordado por autores como [95, 97-100], entre otros.

La recopilación de los casos de éxitos presentados evidencia una relación de compromiso entre las tecnologías disponibles y el enfoque de la aplicación de la investigación dependiendo de los escenarios de generación y el consumo posterior de esa energía de regeneración. Como se ha visto no solo es una combinación de componentes tecnológicos y su aplicación, se añade el análisis de factibilidad económica correspondiente. Esto convierte su puesta en escena en un problema que requiere un análisis multifactorial de naturaleza combinatoria para escoger la solución tecnológica más adecuada tomando muy en cuenta la implementación técnico-económica de esta. A priori pareciera un problema combinatorio, sin embargo, es mas bien de naturaleza permutativa. La diferencia en entre un escenario combinatorio y otro permutativo, es que en la combinación no importa el orden, en la permutación sí. Aquí el orden de la solución importa porque va ligada a restricciones técnico- económica, como se ha podido constatar en esta revisión documental y de allí la necesidad de los análisis de sensibilidad, factibilidad [35, 90, 91, 92].

6. CONCLUSIONES

La recopilación de los casos de éxitos presentados evidencia una relación de compromiso entre las tecnologías disponibles y el enfoque de la aplicación de la investigación dependiendo de los escenarios de generación y el consumo posterior de esa energía de regeneración.

Como se ha visto no solo es una combinación de componentes tecnológicos y su aplicación, se añade el análisis de factibilidad económica correspondiente. Esto convierte su puesta en escena en un problema que requiere un análisis multifactorial de naturaleza permutativa para escoger la solución tecnológica más adecuada tomando muy en cuenta la implementación técnico-económica de esta.

En este sentido, como se ha comentado los análisis de sensibilidad permite la puesta en escena de las simulaciones de los diferentes escenarios tecnológico como mecanismo para encontrar la solución tecnológica más óptima dependiendo del contexto.

En esta síntesis de ideas, la naturaleza permutativa de la solución más optima obedece a su contexto, ya que este tiene restricciones de naturaleza: legal, tecnologías, de absorción de la transferencia tecnológica, económicas, recurso humano, mantenimiento entre otras.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento a la Secretaria Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación SENACYT de la República de Panamá por el otorgamiento de una beca al ingeniero Jesús Arauz Sarmiento bajo el programa de Maestría en Áreas específicas de Conocimiento, que le ha permitido realizar el Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid. También a la Universidad Tecnológica de Panamá, concretamente al Grupo de investigación Panama Railway Engineering Research Group, al Centro de Investigaciones Eléctricas, mecánicas y de la Industria CINEMI y a la Facultad de Ingeniería Industrial. Lo mismo a la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Internacional de Energía (IEA), "Railway Handbook 2017," 2017. [Online]. Recuperado: <https://www.iea.org/reports/railway-handbook-2017>.
- [2] M. Popescu and A. Bitoleanu, "A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems," *Energies*, vol. 12, no. 6, 2019.
- [3] D. Serrano-jiménez, L. Abrahamsson, S. Castaño-solís, and J. Sanz-feito, "Electrical Power and Energy Systems Electrical railway power supply systems : Current situation and future trends," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 92, pp. 181–192, 2017.
- [4] J. Feng, J. Xu, W. Liao, and Y. Liu, "Review on the Traction System Sensor Technology of a Rail Transit Train," *Sensors. MDP*, no. Dc, 2017.
- [5] P. Fraga-lamas, T. M. Fernández-caramés, and L. Castedo, "Towards the Internet of Smart Trains : A Review on Industrial IoT-Connected Railways," *Sensors. MDP*, vol. 17, no. 6, 2017.
- [6] S. Ballesteros, J. de D. Sanz Bobi, and Á. Calvo, "Visión de las Smart Grids y las Micro - Smart Grid en el entorno ferroviario." Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, p. 156, 2020.
- [7] P. Martínez-Fernandez, I. Villalba-Sanchis, V. Yepes, and R. Insa-Francno, "A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption," *J. Clean. Prod.*, vol. 222, no. 10, pp. 153–162, 2019.

- [8] H. Hayashiya and K. Kondo, "Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways," *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 632–645, 2020.
- [9] S. M. G. Mousavi, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-haddad, "A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 477–490, 2017.
- [10] A. Berrueta, A. Ursua, I. S. Martin, A. Eftekhari, and P. Sanchis, "Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50869–50896, 2019.
- [11] X. Liu and K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review," *Transp. Saf. Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 183–201, 2020.
- [12] J. Zhang, Y. Li, H. Xie, and B. Li, "Urban Rail Transit Energy Storage Based on Regenerative Braking Energy Utilization," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1549, no. 4, 2020.
- [13] Y. Lu, Y. Zhao, X. Zhao, G. Li, and C. Zhang, "Status analysis of regenerative braking energy utilization equipments in urban rail transit," *2017 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, 2017.
- [14] M. Khodaparastan, A. A. Mohamed, and W. Brandauer, "Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 8, pp. 2831–2847, 2019.
- [15] C. Martin, J. de D. Sanz Bobi, and Á. Calvo, "Modelo de Aprovechamiento de Energía de Sistemas Ferroviarios para Alimentación de Instalaciones Auxiliares." Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, p. 155, 2020.
- [16] Adif, "Pliego de Prescripciones Técnicas: Plataforma Sócrates," 2018. .
- [17] Adif, "Proyecto Inverfer," 2014. .
- [18] P. Merlín, "Proyecto Merlín," 2015. .
- [19] E-lobster, "e-lobster: Results and public reports," 2020. .
- [20] P. Osiris, "Proyecto Osiris: Objetivos," 2020. .
- [21] Adif, "Ferrolinera," 2014. .
- [22] Siemens, "Increasing Energy Efficiency From virtuality to reality," Munich, Alemania, 2011.
- [23] O. Dutta, M. Saleh, M. Khodaparastan, and A. Mohamed, "A dual-stage modeling and optimization framework for wayside energy storage in electric rail transit systems," *Energies*, vol. 13, no. 7, pp. 1–26, 2020.
- [24] T. Albrecht, "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 74, p. 10, 2004.
- [25] Z. Tian, P. Weston, N. Zhao, S. Hillmansen, C. Roberts, and L. Chen, "System energy optimisation strategies for metros with regeneration," *Transp. Res. Part C*, vol. 75, pp. 120–135, 2017.
- [26] A. Nasri, M. F. Moghadam, and H. Mokhtari, "Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2010, pp. 1218–1221.
- [27] J. Van Mierlo and G. Maggetto, "Innovative Iteration Algorithm for a Vehicle Simulation Program," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–412, 2004.
- [28] D. Fournier, F. Fages, and D. Mulard, "A Greedy Heuristic for Optimizing Metro Regenerative Energy Usage," in *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2015, pp. 0–18.
- [29] M. Brenna *et al.*, "A Review on Energy Efficiency in Three Transportation Sectors : Railways , Electrical Vehicles and Marine," *energies MDPI*, vol. 13, no. 9, pp. 1–19, 2020.
- [30] K. Minaminosono, M. Hashimoto, and T. Yoshinaga, "Study of Potential and Utilization of Regenerative Power in Electric Railway," in *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2019, pp. 164–168.
- [31] Y. Yang, W. Zhang, S. Wei, and Z. Wang, "Optimal Sizing of On-Board Energy Storage Systems and Stationary Charging Infrastructures for a Catenary-Free Tram," *energies MDPI*, vol. 13, no. 6227, p. 21, 2020.
- [32] Y. Krim *et al.*, "Comparative study of two control techniques of regenerative braking power recovering inverter based DC railway substation," *2020 22nd Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2020 ECCE Eur.*, pp. 1–9, 2020.
- [33] G. Cui *et al.*, "Supercapacitor Integrated Railway Static Power Conditioner for Regenerative Braking Energy Recycling and Power Quality Improvement of High - Speed Railway System," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. PP, no. c, p. 1, 2019.
- [34] J. Liu, Y. Wang, Y. Wu, Y. Li, and X. Wang, "Research and implementation of new-type supercapacitor and battery hybrid energy storage system," *J. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1395–1404, 2020.
- [35] Y. Liu, Z. Yang, F. Lin, and H. Yang, "Energy loss analysis of the stationary battery-supercapacitor hybrid energy storage system," *2019 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019.
- [36] R. Abdelhedi, A. C. Ammari, A. Sari, A. Lahyani, and P. Venet, "Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in Electric vehicles," in *2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2016*, 2017, pp. 97–103.
- [37] N. Ghaviha, J. Campillo, M. Bohlin, and E. Dahlquist, "Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4561–4568, 2017.
- [38] A. Chatzivasileiadi, E. Ampatzi, and I. Knight, "Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 814–830, 2013.

- [39] H. Chen, T. Ngoc, W. Yang, C. Tan, and Y. Li, "Progress in electrical energy storage system : A critical review," *ProNat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [40] B. P. Arboleya and U. Armendariz, "Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways," *IEEE Electrifi.*, vol. 4, no. 3, pp. 30–41, 2016.
- [41] R. Barrero and J. Van Mierlo, "Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, no. September, pp. 26–36, 2008.
- [42] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," 2010.
- [43] J. N E Boizumeau and P. Leguay, "Overview of breaking energy recovery technologies in the public transport field," *Workshop Braking Energy Recovery System*. Ticket Kyoto Project, Kyoto, 2011.
- [44] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with Ultracaps on board of railway vehicles," 2007.
- [45] A. González-gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powel, "Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy," in *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, 2014, pp. 374–388.
- [46] J. P. Moskowitz and J. L. Cohuau, "STEEM: ALSTOM and RATP experience of supercapacitors in tramway operation," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*, 2010, pp. 1–5.
- [47] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Convers. Manag.*, vol. 80, pp. 509–524, 2014.
- [48] F. Lacôte, "Alstom-Future trends in railway transportation," *Japan Rail. & Transport Review*. Tokyo, pp. 4–9, 2005.
- [49] M. Meinert, "New mobile energy storage system for rolling stock," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009. Recuperado: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5278736>
- [50] Siemens, "Increasing Energy Efficiency Optimized Traction Power Supply in Mass Transit Systems," Munich, Alemania, 2011.
- [51] A. González-gil, R. Palacin, and P. Batty, "Sustainable urban rail systems : Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374–388, 2013.
- [52] T. Konishi and M. Tobita, "Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation)," in *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2012, p. 6.
- [53] O. Soilis, F. Castro, L. Bukhin, K. Pham, D. Turner, and G. Thompson, "Saving money every day: La metro subway wayside energy storage substation," in *Proceeding of the 2015 Joint Rail Conference*, 2017, pp. 2015–2018.
- [54] Alstom, "RE-USE Layman's Report," 2018. Recuperado: https://life-future-project.eu/ficheros/Informe_Layman_LifeFuture-ENG.pdf
- [55] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010, p. 9.
- [56] V. Gelman, "Energy Savings With Reversible Thyristor Controlled Rectifier," in *Proceeding of the 2009 ASME Joint Rail Conference*, 2009, pp. 1–6.
- [57] Siemens, "Sitras TCI-Thyristor Controlled Inverter for DC Traction Power Supply." Siemens, 2018. Recuperado: <https://dokumen.tips/documents/sitras-tci-siemens-sitras-tci-thyristor-controlled-inverter-for-dc-traction-power.html>
- [58] Q. Lu *et al.*, "An optimized regulation scheme of improving the effective utilization of the regenerative braking energy of the whole railway line," *Energies*, vol. 12, no. 21, 2019.
- [59] F. Hao, G. Zhang, J. Chen, Z. Liu, D. Xu, and Y. Wang, "Optimal Voltage Regulation and Power Sharing in Traction Power Systems with Reversible Converters," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8950, no. c, 2020.
- [60] G. Li and D. Görges, "Ecological Adaptive Cruise Control and Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Heuristic Dynamic Programming," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–10, 2018.
- [61] S. Nazari, J. Siegel, and A. Stefanopoulou, "Optimal Energy Management for a Mild Hybrid Vehicle With Electric and Hybrid Engine Boosting Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 4, pp. 3386–3399, 2019.
- [62] A. Rezaei, J. B. Burl, B. Zhou, and M. Rezaei, "A New Real-Time Optimal Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 27, no. 2, pp. 830–37, 2017.
- [63] I. M. Sobol, "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates," *Math. Comput. Simul.*, vol. 55, no. 1–3, pp. 271–280, 2001.
- [64] H. Yin, S. Member, C. Zhao, S. Member, M. Li, and C. Ma, "Utility Function-Based Real-Time Control of A Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy System," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 3203, no. c, pp. 1–12, 2014.
- [65] C. Zhao, H. Yin, and Z. Yang, "Equivalent Series Resistance-Based Energy Loss Analysis of a Battery Semiactive Hybrid Energy Storage System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1081–1091, 2015.
- [66] Y. Cao, S. Member, R. C. Kroeze, and P. T. Krein, "Multi-timescale Parametric Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations," *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 2, no. 4, pp. 432–442, 2016.
- [67] H. Lee, J. Kim, C. Lee, and J. Kim, "Novel Cooperative Controller Design of Heterogeneous Energy Storages for Economic Applications in Electric Railway Systems," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 979–987, 2020.
- [68] W. Jefimowski, A. Nikitenko, Z. Drążek, and M. Wieczorek, "Stationary supercapacitor energy storage operation algorithm based on neural network learning system," *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 68, no. 4, pp. 733–738.

- [69] P. V. Radu, A. Szlag, and M. Steczek, "On-board energy storage devices with supercapacitors for metro trains-case study analysis of application effectiveness," *Energies*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [70] M. Outtara and Y. Gordon, "WMATA Energy Storage Demonstration Project." Federal Transtir Adm. no 0086, Washington DC, USA, p. 39, 2015.
- [71] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo, V. U. Brussel, and B.-Elsene, "Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, pp. 1–8.
- [72] N. Devillers, S. Jemei, M. Péra, D. Bienaimé, and F. Gustin, "Review of characterization methods for supercapacitor modeling," *J. Power Sources*, vol. 246, pp. 596–608, 2013.
- [73] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 2129–2140, 2012.
- [74] C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and M. Chen, "Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1301–1311, 2020.
- [75] C. Wu *et al.*, "Train Speed Trajectory Optimization With On-Board Energy Storage Device," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. PP, no. Mld, pp. 1–11, 2018.
- [76] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," *IET Electr. Syst. Transp.*, no. September 2013, pp. 9–20, 2014.
- [77] V. I. Herrera, H. Gaztañaga, A. Milo, and A. Saez-de-ibarra, "Optimal Energy Management and Sizing of a Battery - Supercapacitor based Light Rail Vehicle with Multi - objective approach," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, pp. 3367–3377, 2016.
- [78] R. Lamedica, A. Ruvio, L. Palagi, and N. Mortelliti, "Optimal Siting and Sizing of Wayside Energy Storage Systems in a D.C. Railway Line," *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6271, 2020.
- [79] Y. Yoshida, H. P. Figueroa, and R. A. Dougal, "Use of Time Series Load Data to Size Energy Storage Systems," *2018 IEEE Green Energy Smart Syst. Conf. IGESSC 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [80] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, "Optimal Siting and Sizing of Stationary Supercapacitors in a Metro Network using PSO," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 2680–2685.
- [81] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo, and R. Lamedica, "Techno-economic Sizing of Auxiliary-Battery-Based Substations in DC Railway Systems," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 616–625, 2018.
- [82] F. Naseri, E. Farjah, Z. Kazemi, E. Schartz, T. Ghanbari, and J. L. Schanen, "Dynamic Stabilization of DC Traction Systems Using a Supercapacitor-Based Active Stabilizer with Model Predictive Control," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 6, no. 1, pp. 228–240, 2020.
- [83] H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin, and B. Wang, "Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm," *energies MDPI*, vol. 8, no. 10, pp. 11618–11640, 2015.
- [84] A. Rufer, S. Member, D. Hotellier, and P. Barrade, "A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 629–636, 2004.
- [85] D. Iannuzzi, F. Ciccarelli, and D. Lauria, "Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks," *Transp. Res. Part C*, vol. 21, no. 1, pp. 321–337, 2012.
- [86] X. Zhang, "Impedance Control and Stability of DC/DC Converter Systems, Doctoral dissertation," University of Sheffield, 2016.
- [87] K. Almaksour *et al.*, "Mutual impact of train regenerative braking and inverter based reversible DC railway substation," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019*, 2019.
- [88] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: a fuzzy logic management," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 1157–1165, 2017.
- [89] Y. Krim, D. Abbes, S. Krim, and M. Faouzi, "Intelligent droop control and power management of active generator for ancillary services under grid instability using fuzzy logic technology," *Control Eng. Pract.*, vol. 81, no. September, pp. 215–230, 2018.
- [90] W. Pan, S. C. Dhulipala, and A. S. Bretas, "A distributed approach for DG integration and power quality management in railway power systems," *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, 2017.
- [91] B. B. Zad, H. Hasanvand, J. Lobry, and F. Vallée, "Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 68, pp. 52–60, 2015.
- [92] M. Farivar, R. Neal, C. Clarke, and S. Low, "Optimal Inverter VAR Control in Distribution Systems with High PV Penetration," *IEEE*, pp. 1–7, 2012. Recuperado: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6345736>
- [93] C. Li, C. Xu, and X. Li, "A multi-criteria decision-making framework for site selection of distributed PV power stations along high-speed railway," *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124086, 2020.
- [94] Z. Zhong, Y. Zhang, H. Shen, and X. Li, "Optimal planning of distributed photovoltaic generation for the traction power supply system of high-speed railway," *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121394, 2020.

- [95] S. Xie, Y. Gao, M. Tian, and Z. Jia, "A novel power supply method for railway stations in Western China based on microgrid," *Proc. - 2020 5th Asia Conf. Power Electr. Eng. ACPEE 2020*, pp. 1085–1089, 2020.
- [96] K. S. Alam *et al.*, "Modeling and computation of a solar-piezoelectric hybrid power plant for railway stations," *2012 Int. Conf. Informatics, Electron. Vision, ICIEV 2012*, pp. 155–159, 2012.
- [97] Y. Bulatov, A. Kryukov, and G. Arsentyev, "Application of energy routers in railway power supply systems," *MATEC Web Conf.*, vol. 239, 2018.
- [98] H. A. Gabbar, A. M. Othman, and K. Singh, "Control Architecture of Resilient Interconnected Microgrids (RIMGs) for Railway Infrastructures," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 594–603, 2017.
- [99] A. V. Kotel'nikov, M. V. Shevlyugin, and A. A. Zhumatova, "Distributed generation of electric energy in traction power-supply systems of railways based on wind-power plants," *Russ. Electr. Eng.*, vol. 88, no. 9, pp. 586–591, 2017.
- [100] M. Brenna, F. Foiadelli, and H. J. Kaleybar, "The Evolution of Railway Power Supply Systems Toward Smart Microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources," *IEEE Electrif. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 12–23, 2020.
- [101] J. Arauz-Sarmiento, "Metro de Panamá: Estimación y aprovechamiento alternativo de la energía de frenado regenerativo," *SICutp*, 2021. Recuperado: <http://www.investigadores.utp.ac.pa/proyectos/971>

Determinación de la resistencia al fuego de pórticos de concreto reforzado considerando daños previos por sismo en el contexto normativo colombiano

Lina Marcela Guzmán Flórez¹

Carlos Alberto Riveros Jerez²

Universidad de Antioquia

Colombia

Las estructuras de concreto reforzado se deben diseñar para minimizar el riesgo de colapso de la estructura durante las labores de evacuación y extinción del fuego, en un incendio donde las medidas pasivas de protección contra incendios cobran especial importancia ante la ocurrencia de terremotos, por el colapso general a nivel de ciudad que se puede presentar y los problemas de funcionamiento asociados que se pueden presentar en los sistemas activos de protección contra incendios. Estas medidas pasivas de protección dependen en gran medida de las propiedades mecánicas de elementos de concreto reforzado y las normativas o criterios de diseño empleadas para garantizar su resistencia al fuego. Adicionalmente, considerando que la resistencia al fuego que se proporciona a las estructuras de concreto reforzado en el contexto colombiano no contempla daños en los elementos estructurales, al momento de presentarse el incendio cobra importancia el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado, cuando son expuestas al fuego con daños previos. En este capítulo se presenta un análisis de aspectos como el efecto de las altas temperaturas sobre las propiedades mecánicas del concreto reforzado, la incidencia de los daños previos sobre la resistencia al fuego de las estructuras de concreto reforzado y las limitaciones de los criterios de diseño de resistencia al fuego vigentes para eventos de incendio posterior al sismo en el contexto nacional. Finalmente, con base en el análisis de investigaciones recientes y el nuevo enfoque que seguramente será adoptado en la nueva versión del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR, fundamentado en el uso de coeficientes de diseño sismo resistente óptimos, se enfatiza en la necesidad de promover evaluaciones de desempeño estructural a fin de identificar daños durante terremotos que pueden aumentar los costos futuros de la reparación.

¹ Estudiante de la especialización en análisis y diseño de estructuras.

Contacto: lmrcela.guzman@udea.edu.co

² Profesor asociado.

Contacto: carlos.riveros@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El incendio es uno de los riesgos más graves a los que puede estar sometida una edificación y sus ocupantes, ya que las elevadas temperaturas asociadas a este tipo de eventos pueden generar daños importantes en la estructura e incluso comprometer su estabilidad [1]. Estos incendios se generan por diferentes razones y no se consideran graves desde una perspectiva urbana ya que, generalmente, existen sistemas de protección contra incendio apropiados para controlar el fuego, como equipos de rescate y brigadas de bomberos, todos estos factores reducen la posibilidad de que el fuego se extienda en la estructura[2].

Pero además del riesgo de incendio, las estructuras también son susceptibles a eventos sísmicos durante los cuales se pueden presentar diferentes niveles de daño en función de la intensidad del sismo y la importancia de la estructura. Usualmente estos eventos sísmicos en zonas urbanas han sido seguidos por incendios de gran magnitud, cuya ignición se ha asociado a daños producidos por el sismo, como daños en sistemas contra incendio, redes de gas y redes eléctricas[3], adicionalmente, durante el sismo se pueden presentar daños importantes en las líneas de suministro de agua que pueden impedir controlar el fuego, dando paso al desarrollo de incendios prolongados.

Los incendios que se generan después de un sismo se vuelven más críticos si se tiene en cuenta que los daños generados por el sismo, en elementos estructurales y no estructurales, pueden generar aberturas que faciliten la propagación del fuego hacia diferentes zonas de la edificación e incluso a edificaciones vecinas, con efectos devastadores como el desarrollo de incendios a gran escala [4]. El mayor incendio desencadenado por un sismo ocurrió en el año 1906 en San Francisco-California, en el cual cerca de 28,000 edificios fueron consumidos por el fuego [5] y se presentaron daños importantes en las redes de acueducto que, sumadas al desarrollo de incendios simultáneos, dificultaron el control del fuego.

El segundo incendio de gran magnitud desencadenado por un sismo ocurrió en Tokio en el año 1923, este sismo es conocido como el gran sismo de Kanto, en el cual alrededor de 447,000 viviendas fueron destruidas por el fuego [5]. La ciudad de Yokohama fue destruida por los múltiples incendios que se desarrollaron después el sismo. Indudablemente, estos dos sismos representativos marcaron un precedente para el estudio del desarrollo de incendios después de un sismo y sus efectos en la estabilidad estructural de las edificaciones. En el año 1931, en Nueva Zelanda, tuvo lugar el sismo de Napier, considerado el desastre natural más letal al que se ha enfrentado este país. Después de este sismo se presentaron incendios en toda la ciudad durante 36 horas que destruyeron la mayoría de los edificios que no fueron destruidos por el sismo. Otro de los sismos representativos, en cuanto al desarrollo de incendios, es el sismo de Hanshin, el cual se presentó en la bahía de Kobe en el año 1995. Después de este sismo se presentaron alrededor de 148 incendios que afectaron cerca de 6,900 edificios [6].

Es importante resaltar que el sismo de San Francisco (1906) y el sismo de Kanto (1923) tuvieron lugar en épocas en que la mayoría de los edificios estaban contruidos con madera, pero, aunque actualmente en estas ciudades predominan las edificaciones altas de concreto reforzado, su nivel de amenaza sísmica no ha cambiado, ni su susceptibilidad al desarrollo de incendios después de un sismo. De hecho, casi todos los terremotos que se han presentado en California han provocado incendios, como por ejemplo el sismo de Loma Prieta en 1989 y en el sismo de Northridge en 1994, donde en cada uno de ellos se presentaron más de 100 incendios. Adicionalmente, muchos sismos recientes como el de Haití en el año 2010, el de Fukushima en el año 2011 y el de Chile en el año 2014, fueron seguidos por incendios que comprometieron estructuras tan importantes como hospitales [5].

A pesar del potencial catastrófico de los incendios precedidos por sismos, los efectos que estos eventos tienen sobre las estructuras de concreto reforzado no son bien conocidos [4], pero se tiene claridad respecto a las múltiples dificultades que se pueden presentar para controlar el fuego a causa de los daños derivados del sismo, las cuales conllevan a un mayor tiempo de exposición al fuego de las estructuras, demandando así una resistencia al fuego mayor respecto a la resistencia requerida ante un incendio desarrollado en condiciones normales [2]. En el caso particular de las estructuras de concreto reforzado, las metodologías de diseño actuales contemplan la condición de sismo y la condición de fuego para proporcionar un nivel adecuado de resistencia ante estos eventos, pero de manera independiente, es decir,

las estructuras no son diseñadas para soportar una condición de fuego después de un sismo, omitiendo así los efectos que los daños causado por el sismo y la exposición prolongada al fuego, en conjunto, pueden tener sobre la estabilidad de las estructuras [2]. En este orden de ideas, resulta de gran importancia comprender mejor los efectos que el fuego tiene sobre el sistema estructural de las edificaciones después de la ocurrencia de un sismo [4].

El Reglamento Colombiano de Sismo Resistencia (NSR-10) [7] en su Título J, incluye diferentes aspectos que buscan mitigar el riesgo de incendio en las estructuras y, en caso de que se genere un incendio, evitar su propagación y facilitar su mitigación. Adicionalmente, considerando el efecto que las elevadas temperaturas asociadas a incendios tienen sobre las propiedades mecánicas del concreto reforzado y, por tanto, sobre la estabilidad estructural de las edificaciones, esta normativa establece algunos requisitos mínimos que deben cumplir los elementos de una estructura para prevenir su colapso durante las labores de evacuación y extinción del fuego.

En la Figura 1 se presenta de manera general el procedimiento de diseño establecido en el Reglamento NSR-10 [7] para definir y evaluar la resistencia al fuego en estructuras de concreto. De acuerdo con este procedimiento, el potencial combustible de la estructura y la resistencia mínima requerida al fuego se definen en función del tipo de uso y ocupación de la estructura. En la práctica, la resistencia al fuego de los elementos estructurales suele evaluarse principalmente mediante pruebas de fuego estándar [8], en el caso del Reglamento NSR-10 [7], se emplea el fuego normalizado estipulado en la Norma NTC 1480 [9], para el cual se permite verificar la resistencia al fuego de elementos estructurales por medio de: 1) determinación experimental mediante pruebas de fuego estándar, 2) determinación analítica, o 3) dimensiones y recubrimientos mínimos.

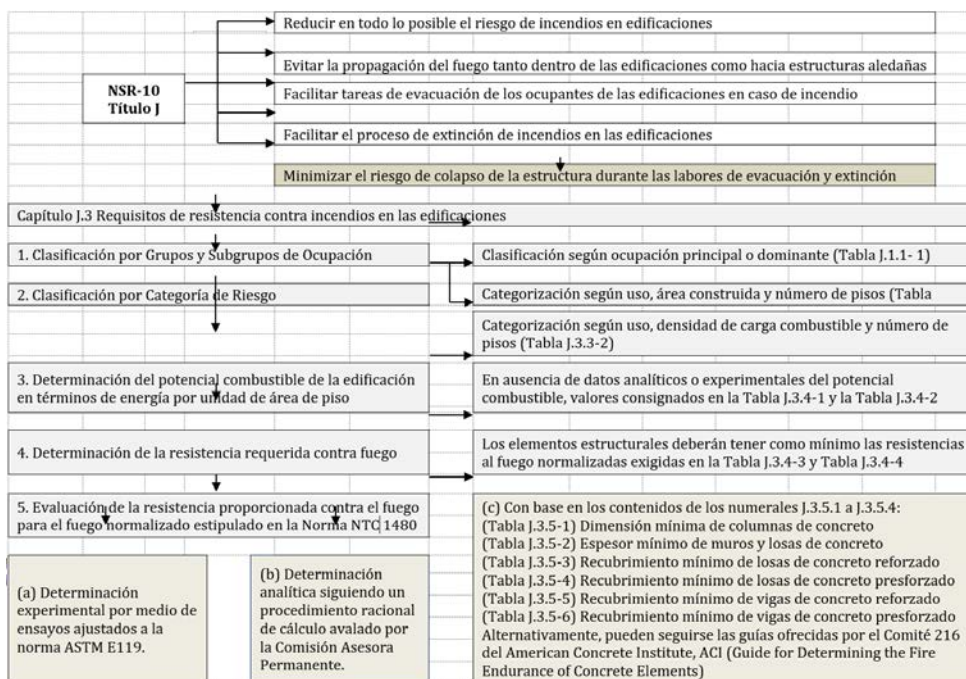


Figura 1. Resistencia contra incendios en edificaciones según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR 10) [7]

La determinación experimental de la resistencia al fuego para la curva normalizada requiere que se representen todas las condiciones de apoyo y carga del elemento estructural a ensayar. Debido a las dificultades para efectuar este tipo de ensayos en el país por falta de quipos, se permite el uso de tablas de dimensiones y recubrimientos mínimos en función del tipo de elemento estructural, que satisfacen los requisitos impuestos en la NTC 1480 [9]. En general, la definición de la resistencia al fuego en elementos estructurales se ha fundamentado en ensayos simplificados que consideran un único elemento estructural sometido a una curva estándar de tiempo-temperatura, que no necesariamente representa las condiciones reales de un incendio, y que han dado lugar a guías de diseño simplificadas que se fundamentan en el recubrimiento del refuerzo y que no tienen en cuenta la interacción entre los diferentes elementos que

componen el sistema estructural [10]. Con base en lo anteriormente expuesto, es posible evidenciar que las previsiones de diseño proporcionadas por el Reglamento NSR-10 [7] para determinar la resistencia al fuego de estructuras de concreto reforzado se limitan a la definición de resistencias del concreto, dimensiones y recubrimientos mínimos de los elementos y no contemplan el efecto de los daños generados durante un sismo en la resistencia al fuego de las estructuras, lo que conlleva a un diseño que puede comprometer la estabilidad de las estructuras en condición de incendio posterior a un sismo. La motivación para el desarrollo de este artículo se fundamenta en la necesidad de establecer un panorama general sobre el estado del arte asociado a este tema, el estado normativo nacional y las posibles recomendaciones para asegurar un mejor desempeño de las estructuras en estas circunstancias derivados de estudios numéricos y experimentales desarrollados en este campo que permitan complementar las previsiones proporcionadas por el Reglamento NSR-10 [7].

2. MÉTODO

El primer paso consiste en analizar la variación de las propiedades mecánicas del concreto reforzado a altas temperaturas para posteriormente, en el contexto de respuesta sísmica, analizar el efecto de degradación estructural que se puede presentar durante el evento sísmico.

El concreto reforzado es uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a sus numerosas ventajas en relación con otros materiales, como lo son su resistencia, durabilidad, facilidad de construcción y su resistencia al fuego [8]. Esta resistencia al fuego se define como el período de tiempo durante el cual un elemento estructural sometido al fuego conserva su integridad para resistir las cargas impuestas sobre el [2]. Numerosos estudios han comprobado que el concreto tiene una resistencia al fuego aceptable en comparación con materiales como el acero o la madera [1]. Esta resistencia al fuego está dada por los materiales que lo conforman, ya que la combinación química del cemento y los agregados forma un material con baja conductividad térmica, alta capacidad calórica y una degradación de la resistencia más lenta en función de la temperatura [8].

A pesar de estas características, al igual que otros materiales, las propiedades termo-físicas, mecánicas y de deformación del concreto reforzado cambian sustancialmente dentro del rango de temperaturas que se pueden presentar durante incendios y estas variaciones dependen tanto de las características del concreto como del acero de refuerzo, siendo más complejas las variaciones que se presentan en el concreto debido a la migración de humedad y a la variedad de materiales que pueden conformar un concreto [8]. En la Figura 2 se presentan las principales propiedades que influyen en la resistencia al fuego del concreto. Dentro de las propiedades mecánicas se encuentran la resistencia del concreto a compresión, la resistencia del concreto a tensión, el módulo de elasticidad y la respuesta esfuerzo-deformación a compresión, siendo esta última la expresión más común para comprender la respuesta mecánica del material [8].

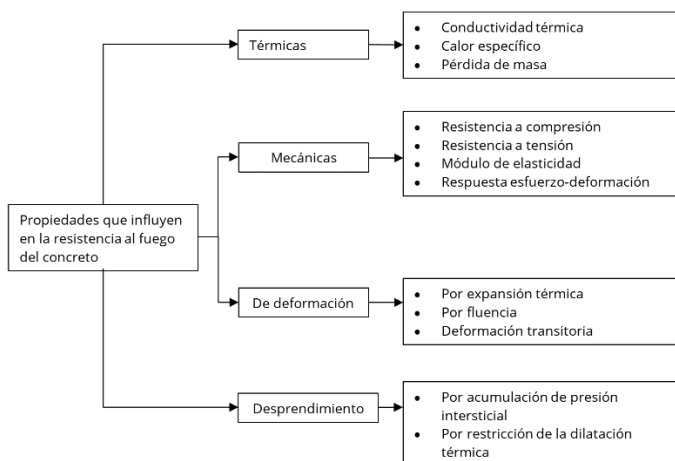


Figura 2. Propiedades que influyen en la resistencia al fuego del concreto, adaptado de [8]

Las deformaciones que se presentan en el acero de refuerzo a altas temperaturas comprenden: 1) una deformación por el esfuerzo inducido; 2) una deformación asociada a la expansión térmica, la cual se

recupera después del enfriamiento del elemento; y 3) una deformación por fluencia, que se puede presentar cuando el elemento es expuesto a altas temperaturas y altos esfuerzos a lo largo del tiempo, aunque este tipo de deformación resulta insignificante para temperaturas entre 400-500°C, a mayores temperaturas se presentan incrementos representativos en la deformación, incluso si la temperatura y el esfuerzo aplicados permanecen constantes [9].

En el caso del concreto reforzado, cuando un elemento es expuesto a altas temperaturas en condiciones similares a las que se pueden presentar en un incendio, se genera un desprendimiento del concreto que incrementa la tasa de transmisión de calor a las capas internas del elemento. El desprendimiento del recubrimiento en columnas de concreto reforzado debe ser analizado en el contexto de concreto con resistencia normal o concreto de alta resistencia. Como se puede observar, [11] con base en datos experimentales determinaron que una columna con concreto de alta resistencia presenta un mayor desprendimiento de recubrimiento que una columna con concreto de resistencia normal. Por lo tanto, para el uso de concretos de alta resistencia debe tenerse especial cuidado al momento de evaluar su comportamiento frente al fuego [8]. Aunque el desprendimiento del recubrimiento es un daño de tipo superficial, cuando el desprendimiento se extiende puede tener consecuencias importantes en términos de integridad y estabilidad, asociadas a la exposición del acero de refuerzo al fuego, que conducen a una disminución de la resistencia del acero y, por lo tanto, al deterioro de las propiedades mecánicas del elemento estructural que afecta directamente su resistencia al fuego y la estabilidad de la estructura [12].

Los daños que se pueden presentar en el sistema estructural de una edificación como resultado de un sismo pueden llevar a un colapso rápido de la estructura durante un incendio, ya que los estándares y códigos de diseño para la resistencia al fuego de estructuras de concreto reforzado, no consideran el efecto que los daños asociados a un sismo puede tener sobre su resistencia al fuego [2], por lo tanto, los requerimientos mínimos exigidos por reglamentos de construcción como el Reglamento NSR-10 [7] pueden resultar insuficientes para garantizar el correcto desarrollo de las labores de rescate y mitigación del fuego en caso de que estas actividades se deban llevar a cabo después de un sismo.

Si se considera el fenómeno de descascaramiento que se presenta en los elementos de concreto reforzado expuestos a altas temperaturas, es posible identificar una dependencia de la resistencia al fuego con el recubrimiento del acero de refuerzo, y en el caso particular en el que un elemento estructural sea sometido a condiciones de carga de sismo, su recubrimiento puede presentar daños en forma de: 1) fisuras por tensión, 2) aplastamiento, o 3) remoción completa del recubrimiento [13] y este tipo de daños afecta directamente la resistencia al fuego de los elementos estructurales, en relación con aquellos cuyo recubrimiento no presenta daños al momento de un incendio. En general, la pérdida de recubrimiento del concreto reforzado genera una mayor propagación térmica que penetra los elementos a una tasa mucho más rápida que en elementos sin este tipo de daños.

Evidentemente, esta transferencia de calor hacia el interior del elemento es mucho más rápida si el elemento tiene daños mayores [2]. Estas condiciones particulares hacen más complejo el análisis estructural del sistema debido a las deformaciones laterales y los esfuerzos residuales que se presentan en los elementos estructurales, e incrementan la vulnerabilidad al fuego de la estructura [14]. Por lo tanto, considerando que la resistencia al fuego del concreto reforzado después de un sismo depende de factores asociados al nivel de daño que se presente en la estructura [13], es esencial tener claridad respecto al tipo y magnitud de daños que se pueden presentar en una estructura durante un sismo particular, de manera que sea posible establecer la resistencia al fuego del sistema estructural después del sismo.

Actualmente existen diferentes indicadores o índices de daño que permiten cuantificar el daño local y global que se puede esperar en una estructura debido a la ocurrencia de un sismo particular y, adicionalmente, el estudio de la respuesta de elementos estructurales ha permitido establecer que estos elementos son sensibles principalmente a la deriva de piso. Precisamente, los índices de daño local no acumulativos están relacionados con la ductilidad y la deriva de piso de la estructura, la definición de estos índices comprende la aplicación de cargas monotónicas crecientes que permiten definir relaciones de fuerza-deformación y momento curvatura. Si se asume que los elementos de concreto reforzado tienen un comportamiento dúctil, una relación típica momento-curvatura para una sección de concreto reforzado puede idealizarse

como se presenta en la Figura 3, donde en la primera etapa se tiene un comportamiento elástico que alcanza el agrietamiento de la sección; en la segunda etapa la sección esta fisurada y se alcanza la fluencia del acero a tensión; y en la tercera etapa, el acero ha superado su esfuerzo de fluencia a tensión y se alcanza la deformación límite útil del concreto a compresión [15].

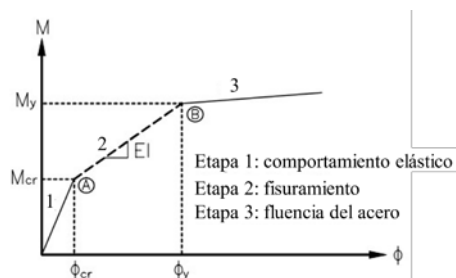


Figura 3. Relación idealizada momento-curvatura de una sección de concreto reforzado [15]

En el caso de la primera etapa se ha logrado establecer que las fisuras por tensión asociadas no tienen un efecto representativo en la propagación térmica a través del concreto y las barras de refuerzo experimentan temperaturas similares a las que se pueden presentar en una sección intacta, por lo tanto, estas no tienen un efecto representativo sobre la resistencia al fuego después del sismo [13]. Por su parte, agrietamientos mayores que den como resultado la pérdida de recubrimiento de las barras de refuerzo y el aplastamiento del concreto, pueden reducir drásticamente la resistencia al fuego después de un sismo [2]. En la Figura 4 se presenta la consolidación de los aspectos expuestos en relación con los posibles daños que se pueden presentar en el recubrimiento del refuerzo de elementos estructurales y el nivel de afectación a la resistencia al fuego del elemento correspondiente.

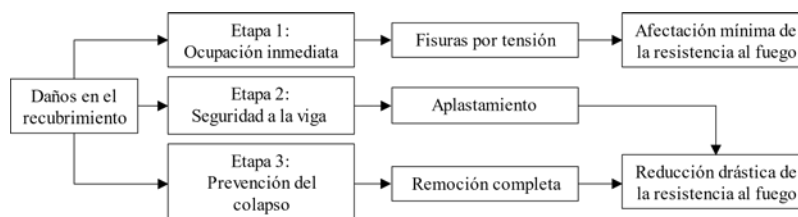


Figura 4. Efecto del tipo de daño en el recubrimiento sobre la resistencia al fuego

Considerando la poca eficiencia de las metodologías de diseño sísmico vigentes para controlar los daños causados por sismos de intensidad baja y moderada, la cual fue evidenciada por los daños causados por diferentes eventos sísmicos que tuvieron lugar en ciudad de México entre 1957 y 1985 y los daños que se presentaron durante el sismo de Loma Prieta en 1989 y de Northridge en 1994, se ha identificado la necesidad de desarrollar metodologías para el diseño de estructuras con un desempeño sísmico predecible con una tendencia a cambiar la filosofía de diseño del concepto de resistencia física al concepto de desempeño estructural [16]. En la filosofía de diseño basada en desempeño, los elementos estructurales se diseñan para diferentes niveles de desempeño que se definen en función de los efectos que un sismo puede tener sobre la capacidad de la estructura para cumplir sus funciones, estos niveles de desempeño son: 1) operacional, 2) ocupación inmediata, 3) seguridad a la vida, y 4) prevención del colapso [2].

Los daños asociados con el nivel de desempeño de ocupación inmediata no tienen un efecto significativo en la resistencia al fuego; en el nivel de desempeño de seguridad a la vida se presentan daños extensivos en vigas y columnas dúctiles que implican la pérdida de recubrimiento del refuerzo; y en estructuras con un nivel de desempeño para prevención del colapso, se presentan daños sustanciales en vigas y columnas superiores a los que se pueden presentar en un nivel de desempeño de seguridad a la vida [2]. Mientras mayor sea el número de elementos dañados y cuanto mayor sea el daño en estos elementos, menor será el tiempo entre el inicio del incendio después del sismo y el colapso de la estructura, es decir, la resistencia al fuego de la estructura será menor [2], de hecho, el colapso de estructuras de concreto reforzado ha predominado en algunos sismos seguidos por incendios, como lo son el sismo de Hanshin (1995) y el sismo de Mármara (1999), en este último se presentaron incendios en edificios e instalaciones industriales clasificados como incontrolables, y se identificó que muchos pórticos de concreto reforzado, no dúctiles y de mediana altura, sufrieron grandes daños durante el sismo y resultaron más afectados por el fuego [5].

3. RESULTADOS

El método empleado en el presente artículo aborda en primera instancia los efectos del fuego en las propiedades mecánicas del concreto reforzado y el estudio de los tipos de afectaciones que sufren las estructuras de concreto reforzado durante un evento sísmico. Con estos dos aspectos definidos se procede a realizar el análisis de estos dos efectos combinados, es decir una estructura que es afectada por un sismo y posteriormente por un incendio. Como la acción de estos efectos combinados no se contempla en el Reglamento NSR-10 [7] se realiza el análisis de resultados utilizando resultados de estudios experimentales y numéricos reportadas en la literatura que consideran la acción de estos dos efectos con el objetivo de presentar una serie de recomendaciones a tener en cuenta durante la etapa de diseño de estructuras de concreto reforzado considerando los procedimientos de diseño de estructuras de concreto reforzado proporcionados por el Reglamento NSR-10 [7].

El análisis del comportamiento estructural de edificaciones de concreto reforzado en condiciones de incendios posteriores a sismos resulta incluso más complejo que el análisis de los dos fenómenos presentados anteriormente, ya que la resistencia al fuego después del sismo debe considerar aspectos como el nivel de daño, el agrietamiento por tracción, el aplastamiento por compresión y la pérdida de recubrimiento del refuerzo [2]. Esto ha llevado al desarrollo de pruebas en modelos a escala real y modelos numéricos que buscan comprender mejor el comportamiento de las estructuras sometidas a incendio después de un sismo. A pesar de esto, de acuerdo con [5], las investigaciones sobre el comportamiento de las estructuras de concreto reforzado en incendios posteriores a sismo se encuentran en etapas iniciales y se requieren estudios experimentales para estimar la respuesta estructural de los pórticos de concreto reforzado en estas condiciones.

Dentro de las investigaciones registradas en la literatura reciente, se encuentran investigaciones basadas en modelos numéricos y, en menor medida, investigaciones con modelos experimentales a escala real de pórticos de concreto reforzado. [2] realizaron una serie de investigaciones numéricas considerando un análisis secuencial no lineal, para identificar el efecto de los daños por sismo sobre la resistencia al fuego de pórticos de concreto reforzado. Los análisis se realizaron sobre cuatro pórticos de concreto reforzado diseñados según el código ACI 318-08 [17], considerando daños en la estructura asociados a los niveles de desempeño especificados en el código FEMA356 [18][19]: 1) pórtico con nivel de desempeño de ocupación inmediata, 2) pórtico con nivel de desempeño de seguridad a la vida, 3) pórtico con nivel de desempeño de prevención del colapso, y 4) pórtico sin daños, este último se tomó como referencia para el análisis de los resultados en los tres pórticos con daños. Para la simulación del incendio se empleó la curva estándar temperatura-tiempo definida en la norma ISO 834 [19], considerando tres casos de fuego: 1) fuego solo en las vigas, 2) fuego solo en las columnas, y 3) fuego en todos los elementos del pórtico. Los análisis secuenciales de sismo y fuego se realizaron con los programas SAP2000 y SAFIR respectivamente.

La primera etapa del estudio consistió en la simulación de cargas de gravedad, estáticas y uniformes, y carga sísmica de acuerdo a un análisis estático no lineal *push-over*, retirando la carga después de alcanzar la deriva asociada al nivel de desempeño de cada pórtico, para esto se utilizó una distribución vertical de cargas proporcional a la forma del modo fundamental de la estructura en la dirección de análisis. La segunda etapa consistió en la simulación de fuego desde el interior del pórtico, por lo tanto, los lados exteriores de las columnas no fueron expuestos directamente al fuego, adicionalmente, la distribución de temperatura en los elementos del pórtico se definió según el nivel de daño preestablecido para cada pórtico. Los resultados obtenidos indican que, en el nivel de desempeño de ocupación inmediata, el efecto de los daños sobre la resistencia al fuego es mínima, en comparación con la resistencia al fuego del pórtico sin daños previos, esto se debe a que los daños que se presentan en la estructura en este nivel de desempeño son mínimos y por tanto la reducción de rigidez y resistencia de la estructura también.

En el caso de los pórticos con daños asociados a los niveles de desempeño de seguridad a la vida y prevención del colapso, la reducción de la resistencia al fuego es representativa con relación al pórtico sin daños previos, presentándose una reducción en la resistencia al fuego de aproximadamente el 30% [2]. En el caso de ocupación inmediata, se identificó que la resistencia al fuego de la estructura, cuando se expone toda la estructura al fuego, es similar al caso en que solo se considera fuego en las vigas, por lo tanto, la

resistencia al fuego del pórtico tiende a depender principalmente de la resistencia de las vigas y la falla que se presenta en la estructura es de tipo local. Por su parte, en los casos de seguridad a la vida y prevención del colapso, se presentan deformaciones permanentes importantes en la estructura y el tipo de falla que se presenta es global [2].

Los resultados obtenidos por [2] apuntan a que el fortalecimiento de las vigas en inmediaciones de las columnas podría ser prioritario para mejorar la resistencia al fuego de pórticos de concreto reforzado con daños previos por sismo, asociados a niveles de desempeño de seguridad a la vida y prevención del colapso. Partiendo de esta premisa, [20] proponen un método para el fortalecimiento de las uniones viga-columna utilizando láminas de polímero reforzado con fibra de carbono CFRP para desplazar las rótulas plásticas que se puedan presentar en los nodos hacia el interior de la viga, aumentando así la capacidad a carga lateral del pórtico e incrementando su ductilidad, lo que representaría una reducción en los daños causados por el sismo y permitiría el desarrollo de fallas de tipo local en las vigas y no de fallas de tipo global durante el incendio, mejorando así la resistencia al fuego de las estructuras después del sismo.

El método propuesto por [20] solo considera el aporte de las láminas de CFRP en el desempeño sísmico de la estructura con el objeto de limitar los daños durante el sismo, mientras que durante la simulación del incendio se desprecia su aporte, eso debido a que este material pierde rápidamente rigidez y resistencia a altas temperaturas, lo que lleva a la descomposición de las láminas y la pérdida de adherencia a la unión viga-columna. Los análisis numéricos realizados [20] en un pórtico de concreto reforzado con nivel de desempeño de seguridad a la vida, evidenciaron un incremento en la rigidez del pórtico por la inclusión de las láminas de CFRP que redujo su desplazamiento lateral alrededor de un 14%, y el desarrollo de las rótulas plásticas tuvo un comportamiento similar al identificado para pórticos con nivel de desempeño de ocupación inmediata, lo que representa una reducción en los daños durante el sismo y por lo tanto una menor afectación de la resistencia al fuego del pórtico.

Los resultados de estos análisis indican que el reforzamiento de las uniones viga-columna con láminas de CFRP permite desplazar las rótulas plásticas de las caras de las columnas hacia el interior de las vigas, lo que representaría una reducción en la magnitud de los daños que se podrían presentar en las uniones viga-columna durante un sismo y, por lo tanto, mejoraría la resistencia al fuego de las estructuras después del sismo. En el caso del pórtico analizado se identificó que la resistencia al fuego del pórtico sin daños previos pasó de 4 horas a 2 horas en el pórtico con daños, mientras que esta reducción de la resistencia al fuego fue de solo 1 hora en el pórtico reforzado con láminas de CFRP.

[21] y [22] realizaron pruebas experimentales de sismo y fuego en pórticos de concreto reforzado a escala real con las mismas características, excepto por el detallado de refuerzo. Con el fin de establecer la influencia del detallado de refuerzo dúctil en el comportamiento de los pórticos de concreto reforzado, [22] realizó pruebas en un pórtico con detallado de refuerzo no dúctil y comparó estos resultados con los obtenidos por [21], quien realizó pruebas en un pórtico con detallado de refuerzo dúctil. Cada una de las pruebas se realizó en tres etapas en las cuales se buscó garantizar las mismas condiciones de prueba en los dos pórticos. El pórtico analizado pertenece a un vano intermedio del segundo piso de una estructura de cuatro pisos, con 4 pórticos en la dirección corta y 5 pórticos en la dirección larga, espaciados cada 3 metros. Este sub-pórtico fue construido con 4 columnas de 300x300 mm, 4 vigas superiores e inferiores de 230x230 mm y una losa de 120 mm de espesor. El diseño de los pórticos se realizó con base en el Código Estándar Indio, cumpliendo con el criterio de columna fuerte-viga débil.

En la primera etapa de la prueba se simularon las cargas de gravedad por medios mecánicos y para la simulación del sismo se indujo una carga lateral creciente cuasi estática usando gatos hidráulicos. Esta carga lateral se aplicó considerando un nivel de desempeño de prevención del colapso, al cual se asocia una deriva del 4%, es decir, un desplazamiento lateral máximo del pórtico de 152 mm. De acuerdo con el código FEMA356 [18], este nivel de desempeño representa un daño sustancial de la estructura, que incluye degradación de la resistencia y la rigidez del sistema de resistencia a cargas laterales, altas deformaciones permanentes y reducción de la resistencia a cargas verticales [21]. En el pórtico con detallado de refuerzo dúctil se presentaron grietas en los diferentes elementos, siendo más severas las grietas en las uniones viga-columna, donde también se presentó pérdida de recubrimiento en los ciclos de mayor desplazamiento,

pero sin pandeo del acero de refuerzo, y se registró un desplazamiento lateral residual de 19 mm. Por su parte, en el pórtico sin detallado de refuerzo dúctil, se registró un desplazamiento lateral residual de 41 mm y la magnitud de las grietas, el desprendimiento de concreto y la delaminación, fueron mucho mayores.

En el pórtico con detallado de refuerzo no dúctil se generaron una gran cantidad de grietas de cortante en diferentes elementos, al igual que grandes deformaciones verticales que conllevaron a una pérdida importante de adherencia y al deslizamiento del refuerzo. El deslizamiento entre estos materiales generó rotaciones permanentes que se reflejan en el estrangulamiento de las curvas histeréticas de elemento. Después de generar daños en el pórtico asociados a una deriva del 4%, se procedió con la segunda etapa de la prueba, en la cual cada pórtico fue puesto en un compartimento fabricado en sitio, donde fueron expuestos a condiciones de fuego muy similares durante una hora.

Para la prueba de fuego no se consideraron curvas de fuego estándar o experimentales, en su lugar, se buscó mantener una temperatura constante entre 900 y 1000°C durante una hora. Los daños que se presentaron en el pórtico con detallado de refuerzo dúctil consistieron en desprendimientos de concreto, microfisuras térmicas, deterioro del concreto y pérdida de adherencia entre las barras de refuerzo y el concreto que llevaron a una pérdida importante de resistencia y rigidez sin signos de colapso [21]. Para los dos tipos de detallado de refuerzo, los elementos que presentaron mayores daños durante la prueba de fuego fueron también los que tuvieron mayores daños durante la prueba de carga lateral, estos daños corresponden a descascaramiento, grietas, desprendimientos en las esquinas de las columnas, entre otros.

Después de la prueba de fuego se pasó a la tercera etapa de la prueba, en la cual el marco se sometió a una carga lateral cíclica para evaluar su capacidad de carga lateral residual. El comportamiento general de ambos pórticos fue similar en esta prueba. Para el pórtico con detallado dúctil se generó una reducción en la capacidad de carga de solo el 5%, con un desplazamiento máximo de 150 mm, mientras que para el pórtico no dúctil la reducción en la capacidad de carga lateral fue de aproximadamente el 35% para el mismo desplazamiento máximo. Los resultados de estas pruebas reflejan un mejor comportamiento del pórtico con detallado dúctil, lo que permite concluir que las consideraciones de diseño generalmente aplicadas en el diseño sísmico de estructuras, son también fundamentales para mejorar la resistencia al fuego de las estructuras después de un sismo [22].

Uno de los daños identificados tanto durante sismo como durante incendio es el descascaramiento de los elementos de concreto reforzado, este tipo de daño expone las barras de refuerzo directamente al fuego según la magnitud de descascaramiento, lo que resulta en una rápida disminución de la capacidad de carga. Al ser un daño que se puede presentar tanto bajo cargas sísmicas como térmicas, puede afectar de manera importante la resistencia al fuego después de un sismo y comprometer la estabilidad de la estructura por la superposición del descascaramiento por cargas sísmicas y el descascaramiento por cargas térmicas [23].

Para comprender el efecto del descascaramiento por cargas térmicas en la resistencia al fuego de pórticos de concreto reforzado con daños previos por sismo, [23] desarrolló una serie de análisis numéricos en tres pórticos diferentes (diseñados según el código ACI 318 08 [17]) considerando dos escenarios en particular; en uno se consideró el descascaramiento mecánico seguido del descascaramiento térmico y en el segundo solo se consideró el descascaramiento mecánico. En cuanto a los elementos estructurales del pórtico, las columnas se analizaron con una distribución de acero en la sección transversal típica, mientras que para las vigas se consideraron dos variaciones en el acero de refuerzo longitudinal inferior, la primera configuración fue una sola capa de refuerzo y la segunda, dos capas de refuerzo, donde cada capa corresponde al 50% de las barras de acero requeridas.

Estos análisis se desarrollaron en tres etapas: 1) análisis sísmico de las estructuras, en el que se simularon las cargas por gravedad y las cargas sísmicas llevando el modelo al nivel de desempeño de seguridad a la vida, para esto se controlaron la deriva de piso, las rotaciones plástica de las vigas y la relación demanda-capacidad de las columnas, de acuerdo con lo definido por el código sísmico FEMA356 [18] para este nivel de desempeño; 2) definición de la curva de fuego, para la cual se emplearon las curvas estándar de temperatura tiempo especificadas en el Eurocode 1 para cada pórtico; y 3) simulación del fuego, con los

resultados obtenidos de las primeras etapas, se definió un modelo para la simulación del fuego en el programa de elementos finitos no lineal SAFIR, simulando el fuego en los pisos inferiores de las estructuras, considerando que son estos los que mayor daño presentan durante el sismo.

Las fronteras de fuego para la simulación de cada escenario fueron definidas con base en resultados experimentales de estudios secundarios, en los cuales se identificó que cuando una estructura se encuentra entre los niveles de desempeño de seguridad a la vida y prevención del colapso, el recubrimiento del concreto en la longitud de las rotulas plásticas se desprende y el acero de refuerzo queda expuesto [2]. Para la simulación del fuego esto significa que sobre la longitud de la rótula plástica las barras de refuerzo están directamente expuestas al fuego, por lo tanto, cuando solo se considera el descascamiento mecánico en los elementos de la estructura, solo las barras de refuerzo en la rótula plástica están expuestas directamente al fuego, y el acero en la longitud restante de la viga está protegido con el recubrimiento de concreto; por su parte, cuando se considera tanto el descascamiento mecánico como el térmico, el acero en la rótula también es expuesto directamente al fuego mientras que el acero longitudinal en el resto de la viga se ve expuesto al fuego paulatinamente, a medida que se presenta el descascamiento del concreto por el incremento de la temperatura.

Estos análisis numéricos mostraron que, aunque no se considere el descascamiento térmico en el análisis, los daños previos por el sismo reducen significativamente la resistencia al fuego de la estructura pero no se presenta el colapso de la estructura, por otra parte, cuando se considera el descascamiento térmico, el efecto sobre la resistencia al fuego de la estructura varía para las dos configuraciones de refuerzo propuestas: para la distribución de una sola capa de refuerzo, las tres estructuras colapsaron rápidamente, mientras que con la distribución del refuerzo en dos capas, no se presentó colapso de las estructuras debido a que, aunque las barras externas pierden su resistencia rápidamente, estas actúan como capa protectora de las barras internas, prolongando su resistencia durante la simulación del incendio. De acuerdo con lo anterior, el descascamiento mecánico y térmico que se puede presentar en un evento de incendio posterior a un sismo, reduce la resistencia al fuego de la estructura y compromete su estabilidad, por lo tanto, un ajuste en el arreglo de las barras de refuerzo inferiores de las vigas puede incrementar significativamente la resistencia al fuego de los pórticos de concreto reforzado después de un sismo [2].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El Reglamento NSR-10 [7] presenta de forma independiente los requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente en el título A y los requisitos para protección contra incendios en el título J, en el contexto nacional se aplican estos procedimientos de forma independiente, pero los enfoques más recientes y que seguramente serán incorporados en las nuevas versiones del reglamento NSR implica el uso coeficientes de diseño sismo resistente óptimos [24]. Este enfoque se fundamenta en un diseño que busca optimizar los costos iniciales de construcción y los costos asociados a pérdidas futuras por terremotos. En el reglamento NSR-10 [7], las incertidumbres asociadas a la ocurrencia de terremotos se obtienen a partir de evaluaciones probabilistas de la amenaza sísmica con el objetivo de obtener las tasas de excedencia de intensidades asociadas a las aceleraciones relacionadas con cualquier período de retorno [24]. El enfoque de diseño sismo resistente óptimos considera mapas de amenaza y zonificación sísmica con coeficientes que no tienen asociado el mismo período de retorno donde se tienen periodos de retorno menores para zonas de amenaza sísmica alta y períodos de retorno mayores para zonas de amenaza sísmica baja.

Los procedimientos de diseño actualmente vigentes en el país para el diseño de edificaciones de concreto reforzado se basan en el uso del cortante basal obtenido del espectro elástico de diseño que a su vez se construye de dos coeficientes de diseño sismo resistente A_a y A_v obtenidos para un período de retorno fijo aproximadamente igual a 500 años, es importante mencionar también que se deben considerar en la construcción del espectro elástico de diseño el análisis de efectos locales y el coeficiente de importancia de la edificación. La principal limitante que se tiene con el enfoque actual propuesto por el reglamento NSR-10 [7] radica en la imposibilidad de la inclusión de un modelo de costos como el propuesto por [24]. Adicionalmente, el uso del coeficiente de disipación de energía R según el sistema estructural y el grado de disipación de energía asume una ductilidad para la estructura que en la práctica no se verifica porque

implica el uso de modelos de respuesta inelástica. En ese sentido, los métodos más ampliamente usados en el contexto nacional son el método de la fuerza horizontal equivalente y el método modal espectral, estos dos métodos utilizan modelos lineales por lo que el nivel de ductilidad de la estructura queda supeditado a la adecuada selección del coeficiente de disipación de energía R , este enfoque presenta una gran limitación en el contexto real asociada a los diferentes niveles de ductilidad que en realidad tienen los diferentes elementos de una estructura, pero que normativamente se asumen iguales mediante el uso de un solo valor asignado a la estructura de coeficiente de disipación de energía R .

Es evidente que es necesario definir el nivel de desempeño de una estructura con el objetivo de evaluar la resistencia al fuego de estructuras de concreto reforzado previamente afectadas por un sismo, este es el primer paso para lograr incluir los costos relacionados con incendios post sismo en el enfoque de coeficientes de diseño sismo resistente óptimos. Por tal motivo el análisis de ductilidad de la estructura es necesario, no solamente para evaluar el mecanismo de colapso de una estructura por medio de plastificaciones progresivas en elementos estructurales utilizando por ejemplo el método de análisis no lineal estático *push-over* recomendado en reglamento NSR-10 [7] en el apéndice A-3, sino también para evaluar afectaciones estructurales que se pueden presentar durante un posible incendio post sismo con el objetivo de proporcionar un modelo de costos para pérdidas futuras por terremotos más acorde con lo que se ha evidenciado en sismos recientes e incluir estos costos en el enfoque de coeficientes de diseño sismo resistente óptimos.

5. CONCLUSIONES

El análisis presentado en este artículo se desarrolla alrededor de diferentes aspectos relacionados con el comportamiento del concreto reforzado a altas temperaturas y sus implicaciones en la resistencia al fuego de estructuras de pórticos de concreto reforzado con daños por sismo.

La resistencia al fuego de elementos de concreto reforzado está directamente relacionada con las características de cada uno de los materiales que lo conforman, las cuales incluyen propiedades térmicas, mecánicas y de deformación. El incremento de la de temperatura en el concreto simple reduce de manera significativa la resistencia a compresión, la resistencia a tensión y el módulo de elasticidad del material. La respuesta del acero de refuerzo a las altas temperaturas depende de múltiples variables, ya que sus propiedades mecánicas de resistencia, ductilidad y dureza dependen en gran medida del tipo de aleación y composición del propio acero. A pesar de esto, es posible concluir, de manera general, que el esfuerzo de fluencia del acero y la resistencia última disminuyen con la temperatura, mientras que la deformación aumenta considerablemente.

La exposición al fuego de un elemento de concreto reforzado genera daños de tipo superficial como el desprendimiento o descascaramiento del concreto en las etapas iniciales del incendio, que puede incluso presentarse de manera explosiva. Este desprendimiento del concreto genera un incremento en la tasa de transmisión de calor al interior del elemento, que puede generar un desprendimiento continuo de capas de concreto hasta exponer el acero de refuerzo al fuego, generando una reducción de la resistencia del elemento.

En estructuras de concreto reforzado que han sido sometidas a excitaciones sísmicas se presentan deformaciones laterales que provocan diferentes tipos de daños, en función de la intensidad del sismo y la ductilidad de la estructura, que van desde fisuras menores a tensión, por pequeñas deformaciones, hasta la pérdida de recubrimiento y el aplastamiento del concreto causados por grandes deformaciones. Estos daños hacen que la estructura sea más vulnerable al fuego, debido a que se incrementa la transferencia de calor hacia el interior de los elementos.

Las previsiones de diseño actualmente empleadas en el contexto nacional para proporcionar resistencia al fuego en estructuras de concreto reforzado presentados en el reglamento NSR-10 [7] en el título J se limitan al análisis de la resistencia del concreto y la definición de dimensiones y recubrimientos mínimos de los elementos estructurales y no contemplan el efecto de los daños generados durante un sismo en la resistencia al fuego de las estructuras, por lo que se requiere complementar los diseños estructurales

desarrollados en el país mediante métodos de análisis como el de fuerza horizontal equivalente o modal espectral con el uso de metodologías de análisis no lineal estático *push-over* como la propuesta en reglamento NSR-10 [7] en el apéndice A-3 con el objetivo de analizar daños que se pueden presentar durante un sismo que puedan incrementar las pérdidas económicas por un incendio post sismo y que finalmente puedan llevar al colapso o demolición de la estructura.

En el caso de estructuras de concreto reforzado, la resistencia al fuego después de un sismo dependerá tanto de los daños locales como de los globales que se presenten en el sistema de resistencia a cargas verticales y horizontales, por lo tanto, para su análisis, es necesario caracterizar los tipos de daños que se pueden presentar durante el sismo y para esto se recurre a la filosofía de diseño basada en desempeño. En estructuras de concreto reforzado diseñadas para un nivel de desempeño de ocupación inmediata los daños son mínimos y no tienen efecto sobre la resistencia al fuego de la estructura después del sismo, mientras que en estructuras diseñadas para un nivel de desempeño de seguridad a la vida o de prevención del colapso, la magnitud y la cantidad de daños se reducen drásticamente su resistencia al fuego.

Análisis numéricos desarrollados en estructuras con daños asociados al nivel de desempeño de ocupación inmediata han permitido identificar que su resistencia al fuego depende principalmente de la resistencia al fuego de las vigas, por lo tanto, limitar los daños en las vigas, principalmente en inmediaciones de las columnas, en estructuras con nivel de desempeño de seguridad a la vida y prevención del colapso, podría mejorar su resistencia al fuego después de un sismo.

El reforzamiento de las uniones viga-columna con láminas de polímero reforzado con fibra de vidrio, en estructuras con daños asociados al nivel de desempeño de seguridad a la vida, se ha evaluado por medio de análisis numéricos, considerando el desplazamiento de las rótulas plásticas al interior de la viga. Se ha demostrado que este reforzamiento logra reducir el efecto de los daños sobre la resistencia al fuego de la estructura, evidenciándose una resistencia al fuego similar a la de estructuras con daños para el nivel de desempeño de ocupación inmediata.

Las consideraciones de diseño sísmico de estructuras de concreto reforzado son fundamentales para mejorar la resistencia al fuego de las estructuras dañadas durante un sismo, ya que se ha identificado que en pórticos no dúctiles se presentan mayores daños en los diferentes elementos de la estructura, en comparación con los daños que se presentan en pórticos dúctiles, y a mayores daños mayor será la afectación de la resistencia al fuego de la estructura.

La resistencia residual a carga lateral en pórticos que han sufrido daños por sismo sometido al fuego es mayor en pórticos dúctiles que en pórticos no dúctiles, lo cual indica que la probabilidad de recuperación de la estructura es mayor para las estructuras dúctiles.

REFERENCIAS

- [1] M. Ureña and G. Alvarado, "Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado," *Gac. Técnica*, vol. 19, no. 2, pp. 7–18, 2018.
- [2] H. R. Ronagh and B. Behnam, "Investigating the effect of prior damage on the post-earthquake fire resistance of reinforced concrete portal frames," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 6, no. 4, pp. 209–220, 2012.
- [3] J. Taylor, A. Buchanan, and M. Spearpoint, "Post earthquake fire in tall buildings and the New Zealand building code," University of Canterbury, 2003.
- [4] H. Vitorino, H. Rodrigues, and C. Couto, "Evaluation of post-earthquake fire capacity of reinforced concrete elements," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 128, 2020.
- [5] P. Kamath *et al.*, "Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame," *Fire Saf. J.*, vol. 73, pp. 1–19, 2015.
- [6] R. Chung, "January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) earthquake: Performance of structures, lifelines, and fire protection systems," *Natl. Inst. Stand. Technol.*, no. 901, 1996.
- [7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10." Bogotá D.C., 2010.
- [8] V. Kodur, "Properties of concrete at elevated temperatures," *ISRN Civ. Eng.*, pp. 429–432, 2014, Recuperado: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/468510>.

- [9] ICONTEC, "NTC 1480 - Elementos de construcción. Ensayo de resistencia al fuego," *Inst. Colomb. Normas Técnicas y Certificación*, 1979.
- [10] A. H. Shah *et al.*, "Influence of ductility on the behaviour of RC frames in post earthquake fire," in *8th International Conference on Structures in Fire*, 2014.
- [11] V. Kodur and T. Harmathy, "Properties of building materials," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Third Edit., National Fire Protection Association, Ed. Quincy, Massachusetts, 2002, pp. 1–155.
- [12] S. Iffat and B. Bose, "A review on concrete structures in fire," *Int. J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–128, 2016.
- [13] A. Ervine, M. Gillie, T. J. Stratford, and P. Pankaj, "Thermal propagation through tensile cracks in reinforced concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 516–522, 2012.
- [14] S. Mousavi, A. Bagchi, and V. K. R. Kodur, "Review of post-earthquake fire hazard to building structures," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 35, no. 7, pp. 689–698, 2008.
- [15] H. Kwak and S. Kim, "Nonlinear analysis of RC beams based on moment – curvature relation," *Comput. Struct.*, vol. 80, pp. 615–628, 2002.
- [16] L. E. Maraboto, "Diseño sísmico basado en desempeño: tendencias y retos," *Rev. Ing. Sísmica*, no. 63, pp. 36–54, 2001.
- [17] American Concrete Institute, "ACI 318-08: Building code requirements for reinforced concrete." Detroit, 2008.
- [18] American Society of Civil Engineers, "FEMA-356: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," Washington, DC, USA, 2000.
- [19] ISO 834, "Fire resistance tests-elements of building constructions," *International Stand. ISO 834*, 1999.
- [20] B. Behnam, P. J. Lim, and H. R. Ronagh, "Plastic hinge relocation in reinforced concrete frames as a method of improving post-earthquake fire resistance," *Structures*, vol. 2, pp. 21–31, 2015.
- [21] P. Kamath, "Response of RC framed structures subject to post-earthquake fire," Indian Institute of Technology Roorkee, 2014.
- [22] A. H. Shah, U. K. Sharma, P. Kamath, P. Bhargava, G. R. Reddy, and T. Singh, "Effect of ductile detailing on the performance of a reinforced concrete building frame subjected to earthquake and fire," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, no. 5, 2016.
- [23] B. Behnam, "Effects of thermal spalling on the fire resistance of earthquake-damaged reinforced concrete structures," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, pp. 1–18, 2019.
- [24] M. A. Salgado-gálvez, M. Ordaz, and D. Cardona, "Coeficientes de diseño sismo resistente óptimos para Colombia," in *Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica AIS*, 2017.

Análisis comparativo de requisitos y procesos de diseño para apoyos elastómeros reforzados de puentes

Carolina Castaño Agudelo¹
Carlos Alberto Riveros Jerez²
Universidad de Antioquia
Colombia

Los puentes son estructuras que demandan grandes inversiones y son vitales para el desarrollo económico del país, por lo que su adecuado desempeño, durante y después de un sismo de magnitud considerable, es clave para atender emergencias derivadas y garantizar una rápida recuperación económica de las zonas afectadas. En el contexto nacional, los apoyos elastómeros reforzados son los elementos de conexión más usados entre la superestructura y la subestructura, debido a su bajo costo en comparación con otros sistemas disponibles. No obstante, los requerimientos vigentes en la normativa nacional consideran exclusivamente cargas muertas y vivas verticales en estado de servicio, sin que se presente requerimientos adicionales de evaluación del desempeño sísmico de este tipo de apoyos. Cuando se produce un sismo de magnitud considerable se presentan altas demandas de desplazamientos laterales en los apoyos elastómeros, que pueden llevar a su reemplazo. Este tipo de procedimiento de reemplazo requiere equipos de altas especificaciones, con costos elevados por temas de logística y transporte, además de requerimientos de alta precisión que garanticen que la superestructura continúe en óptimas condiciones luego del izaje y reposicionamiento. En este sentido, en este trabajo se presenta aspectos normativos de diseño de apoyos elastómeros reforzados con láminas de acero contenidos en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes LRFD – CCP 14, el Eurocódigo y el Estándar Australiano – AS 5100.4, con el objetivo de realizar un análisis comparativo de requisitos y procesos de diseño contenidos en cada una de las normativas mencionadas a la luz de un adecuado desempeño sísmico. Adicionalmente, en el análisis comparativo se incluye aspectos como requerimientos de verificación en condiciones de servicio o últimas, que permitan garantizar el adecuado desempeño sísmico de este tipo de apoyos. Finalmente, se analiza los chequeos requeridos, prescritos en cada normativa, que permiten aceptar los diseños de este tipo de apoyos.

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería.
Contacto: carolina.castanoa@udea.edu.co

² Profesor asociado.
Contacto: carlos.riveros@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras indispensables para el desarrollo de las comunidades, estos dan continuidad a las vías, salvando accidentes geográficos que interrumpen el flujo vehicular. Longitudinalmente los puentes están conformados por estribos y apoyos, los primeros son elementos necesarios para garantizar la continuidad y transición entre la vía sobre terreno y estructuras más rígidas como los puentes y los segundos son elementos intermedios cuya finalidad es la de dar apoyo y controlar las longitudes de las luces. Los primeros siempre deben estar presentes y los segundos tienen la posibilidad de existir o no dependiente de la configuración y longitud del puente. A su vez, los puentes están conformados por 3 componentes principales, la superestructura, la subestructura y los elementos de conexión. La superestructura es aquel componente que resiste directamente la acción de las cargas vivas vehiculares y/o peatonales, la subestructura es el componente que genera la cimentación de la estructura y la conexión es el vínculo que permite la adecuada transferencia de cargas entre los dos componentes descritos.

Específicamente, respecto a los elementos de conexión entre superestructura y subestructura, estos son dispositivos mecánicos que permiten la transferencia de cargas, la elección del elemento dependerá de su aplicabilidad, ventajas y variará dependiendo de las solicitaciones, rotaciones y movimientos que el sistema deba soportar. Los tipos de uniones actualmente disponibles son: apoyo de balancín, apoyos de placa deslizante, apoyos tipo POT, apoyos de disco, apoyo deslizante esférico y apoyos elastómeros. En el último medio siglo, el uso de apoyos hechos con elastómero se ha vuelto más popular, en las especificaciones de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés), las especificaciones para el diseño de los apoyos elastómeros reforzados aparecen por primera vez en 1961 [1].

Los apoyos elastómeros reforzados se fabrican uniendo láminas de almohadillas de elastómero (natural o sintético) y acero, estas capas se vulcanizan con calor y presión buscando generar una estructura sólida y sin huecos. Esta configuración está concebida para soportar movimientos horizontales y verticales absorbiendo la traslación de la superestructura mediante cizallamiento [2]. Según la CCP 14 [3] las cargas verticales son soportadas por compresión del caucho y los movimientos-rotaciones por deformación. Las normas CCP 14 y AASHTO [3-4] proporcionan métodos para diseñar los cojinetes elastómeros, procedimientos que tienen en cuenta los requisitos de cargas en servicio sin impacto, traslación, rotación y gradientes de temperatura a los que estará sometido el conjunto durante sus condiciones de servicio.

La CCP 14 [3] en su artículo 14.6.5.3 especifica *El diseño de los apoyos debe ser consistente con la respuesta de todo el sistema del puente ante el evento sísmico u otro evento extremo bajo consideración. Si se usan, deben diseñarse para soportar las cargas sísmicas u otras cargas horizontales de evento extremo, o, si no se requiere que el apoyo elastómero mantenga su funcionamiento después del evento, debe proporcionarse otros medios tales como retenedores, STU, amortiguadores, o zonas de apoyo más anchas para prevenir la salida de la superestructura de su zona de apoyo.* Lo que deja en evidencia, como la norma exige un comportamiento sísmico adecuado, a pesar de que el método propuesto en la normativa no las considera en el diseño.

Respecto al comportamiento esperado de estos dispositivos la tabla 14.6.2-1 de la CCP 14 [3] describe que los apoyos elastómeros reforzados con acero poseen un adecuado desempeño ante movimientos transversales y longitudinales, rotaciones alrededor del eje del puente tanto longitudinal como transversal y ante cargas verticales. No obstante, para rotaciones alrededor del eje del puente y resistencia a cargas longitudinales y transversales solo es adecuado para aplicaciones limitadas. Cuando se aclara *adecuado para aplicaciones limitadas*, se hace referencia a que puede trabajar apropiadamente si los requerimientos de cargas y rotaciones son los adecuados, no obstante, con el método presente en la guía de diseño, la resistencia a cargas longitudinales y transversales debe ser asumida: longitudinalmente por los estribos del puente y transversalmente por topes sísmicos conocidos en la literatura como llaves de cortante.

Las llaves de cortante o topes sísmicos son elementos de concreto que se ubican en los extremos de las vigas cabezales de los puentes y cuya función es limitar los desplazamientos transversales de los puentes y por ende evitar deslizamientos excesivos de la superestructura con respecto a su zona de apoyo. Así, la

capacidad de deformación del cojinete elastómero bajo cargas de sismo no está definido en los códigos de diseño de puentes actuales, en estos se requiere que la deformación a cortante del apoyo elastómero para condiciones de servicio no exceda el 50% de la altura de las capas de elastómero (14.7.5.3.2 de la CCP 14), con el fin de evitar el vuelco en los bordes y la delaminación debido a la fatiga. No obstante, la capacidad de deformación estática no debe compararse con las demandas sísmicas, y es posible describir, además, como la mayoría de los códigos de diseño solo cuantifican claramente los estados de daño permisibles para las columnas, y dejan de lado estas especificaciones para los demás elementos del puente que componen el puente [5], lo que es una constante en la mayoría de las normas de diseño.

En esta misma dirección, en la CCP 14 se exige que el elastómero se fije cuando las fuerzas laterales en servicio excedan una quinta parte de la máxima carga muerta vertical de diseño, al considerar un factor de fricción entre elastómero-concreto de $\mu=0.20$ (C14.8.3.1 de la CCP 14). Sin embargo, las restricciones descritas anteriormente se deben únicamente a las fuerzas y deformaciones inducidas por las cargas verticales en servicio, no obstante, debido a que los puentes de carretera constituyen las partes más críticas de las redes de transporte, se deben diseñar para garantizar su adecuado funcionamiento durante sismos, es decir cargas mayoradas o en estados límites [6].

Considerando las falencias descritas anteriormente, en años recientes investigadores de diferentes países se han interesado en caracterizar las propiedades de amortiguación de estos dispositivos, indagando en sus propiedades dinámicas al intentar caracterizarlos como aisladores sísmicos. Los aisladores sísmicos se caracterizan por brindar una disminución de las fuerzas a las que estará sometida la estructura, por medio del cambio del periodo natural de vibración, lo que se logra utilizando las propiedades de amortiguación del caucho. Estas propiedades de amortiguación son aquellas que poseen algunos materiales para disipar energía cinética al convertirla en otra clase de energía, en nuestro caso específicamente se disipa la energía como deformación, en este sentido existen elastómeros de baja y alta amortiguación, los de baja amortiguación son los elastómeros tradicionales y los de alta amortiguación son conocidos como disipadores de energía debido a que las propiedades del caucho son específicas, así los elastómeros con alto amortiguamiento son más costosos que los tradicionales de baja amortiguación.

El diseño y concepción de puentes en Colombia es un reto cada vez más desafiante por las difíciles condiciones topográficas y que aproximadamente el 85% de la población colombiana se encuentra localizada en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. Estas condiciones hacen que los ingenieros sean evaluados cada vez con estándares más altos y se deban replantear temas como la seguridad, la estética y la eficiencia de este tipo de estructuras, sin dejar de lado las consideraciones económicas, ya que los puentes juegan un papel clave en el bienestar y crecimiento económico de las sociedades, por lo que se destina una gran cantidad de recursos a su diseño y construcción en todo el mundo [7]. El costo generado por la proyección, implantación y construcción de un puente deberá ser considerado desde la etapa de diseño, la elección de las tipologías de superestructura y subestructura deberán considerar las condiciones óptimas para su etapa de funcionamiento, de acuerdo con su configuración, ubicación espacial y proceso constructivo. Usualmente el diseño de esta clase de estructuras se centra en los dos componentes mencionados anteriormente, no obstante, la adecuada conexión entre estas es de vital importancia.

Esta conexión deberá garantizar la apropiada transferencia de las cargas de uno a otro componente, aún en condiciones de uso (en las que se presentan vibraciones debido al comportamiento dinámico de la estructura), así un puente debe permitir el movimiento longitudinal de la superestructura debido a la expansión y contracción térmica, también debe permitir la rotación causada por la carga muerta y la deflexión por carga viva, y además debe contar con condiciones adecuadas para que el mantenimiento sea de mínimo o nulo [8].

El requerimiento de mantenimiento de mínimo a nulo se basa en el complejo proceso de reemplazo de estos elementos de conexión [9], este tipo de elementos deberán ser sustituidos cuando la vida útil del dispositivo haya concluido, cuando se requiera realizar rehabilitaciones o cuando por condiciones sísmicas o fuerzas laterales, este falle. Estas condiciones deben ser previstas desde la etapa de diseño, debido a que la rigidez de la conexión elegida afecta la respuesta dinámica y estática del puente, por lo que debe ser modelada y evaluada durante el proceso de desarrollo del diseño estructural.

En Colombia existen aproximadamente 2,100 puentes de los cuales el 38% posee elementos de conexión tipo apoyos elastómeros [10]. Este tipo de conexiones se utilizan en el ámbito colombiano debido a su disponibilidad y economía, comparados con los otros tipos de conexiones que deben ser solicitados bajo pedido y con tiempos de entrega extensos, debido a que son compañías extranjeras las que los fabrican. A nivel mundial estos dispositivos han sido utilizados por más de 50 años, debido a que son rentables, de fácil fabricación, poseen una combinación de alta rigidez en la dirección vertical, así como flexibilidad rotacional y horizontal, además de que suelen tener un mejor comportamiento frente a terremotos que los apoyos tradicionales [6-9, 11-13].

El diseño estructural de los apoyos elastómeros reforzados con acero esta detallado en la CCP 14 [3] y la AASHTO [4], no obstante, los métodos presentados consideran exclusivamente solicitaciones verticales en servicio debidas a cargas muertas y cargas vivas [14], lo que deja de lado el comportamiento y desempeño de estos dispositivos ante cargas laterales, como el viento, impacto, sismos, etc. La norma colombiana de diseño de puentes – LRFD CCP 14 – especifica en su artículo 14.14.1: *En el estado límite de evento extremo, el propietario puede permitir apoyos que se diseñen para actuar como fusibles o para someterse a daño irreparable siempre y cuando se prevenga la pérdida del tramo.*

No obstante, también especifica en su artículo C.14.6.5.3 para el caso en el que el diseñador considere el elastómero como fusible *Dicha alternativa requeriría la completa consideración de las fuerzas, los movimientos y los detalles de la reparación o el reemplazo del apoyo. También requiere que el diseñador se enfrente con la dificultad inherente del detallado de un elemento estructural para que falle confiablemente con una carga predeterminada.* Esto implica que se debe presentar un detallado especial de la subestructura y superestructura en las zonas que tienen contacto con la conexión, lo anterior para que no se produzcan afectaciones de estas zonas cuando el elemento de conexión falle, información adicional que usualmente no se presenta en la práctica, debido a lo esencial de este tipo de elementos, es importante que estén diseñados y concebidos para resistir de manera segura solicitaciones de compresión y corte [14].

En este sentido, usualmente los elastómeros son la parte más dañada del puente cuando se presente un evento en que las cargas laterales sean considerables, como las solicitaciones inducidas por sismos [15]. Entre las fallas encontradas en los puentes de Colombia se encuentran: la inclinación de los apoyos, el deterioro por el impacto, el diseño inadecuado, la longitud insuficiente de apoyo en la silla, la forma o dimensión inadecuada, la ausencia de topes sísmicos o el agrietamiento por deterioro [10, 16].

En estas situaciones es necesario reemplazar las uniones, esto produce pérdidas económicas asociadas al proceso de sustitución y a la interrupción del tránsito vehicular [17]. En los casos en los que este proceso sea indispensable, se deberá levantar la superestructura, esto se hace en pequeños incrementos utilizando gatos hidráulicos, con lo que se requiere que se realice un análisis de las tensiones de elevación inducidas en la superestructura, en este proceso el carril de circulación debe cerrarse para que la carga viva sea cero [18]. El proceso descrito anteriormente es costoso por varios factores, entre ellos: interrupción del tráfico, costos de mantenimiento no previstos y requisitos de equipos pesados y de alta precisión, estos se hacen necesarios ya que no se deben generar asentamientos diferenciales que afecten el estado original de la superestructura y se induzcan esfuerzos para los cuales no fue diseñada. Este proceso debe incluir todos los análisis relacionados, incluidos los efectos del gato en las conexiones y elementos, además se debe prestar atención a cualquier procedimiento de elevación y restricción requerido, es importante que las vigas se levanten uniformemente en dirección transversal para evitar inducir tensiones en la superestructura.

2. MÉTODO

Desde que se propusieron por primera vez, los apoyos elastómeros reforzados se han presentado como un tema de interés para el gremio estructural, esto debido a sus grandes cualidades para acomodar fuerzas, rotaciones y deformaciones en servicio de manera segura, tales como las deformaciones por gradientes de temperatura, cargas dinámicas debidas al impacto del tránsito vehicular y además debido a su facilidad de comercialización y distribución. Debido al amplio uso de estos dispositivos en el diseño y construcción de puentes en Colombia y en otras partes del mundo, se ha establecido un interés por caracterizar su

comportamiento, formando a su vez criterios y procedimientos de diseño que se incorporan en diferentes normativas internacionales. Las investigaciones pretenden caracterizar estos dispositivos ante esfuerzos de compresión, fuerzas cortantes, comportamientos dinámicos, delaminación y algunas formas de falla que se han evidenciado en puentes existentes: como el deterioro con el tiempo, el comportamiento de elastómeros envejecidos o su desempeño sísmico.

Con base en lo anteriormente mencionado, el método utilizado en este trabajo se fundamenta en la comparación de los requisitos normativos de diseño de apoyos elastómeros reforzados de tres diferentes normas. Los procedimientos de diseño se comparan al asociarlos a requisitos y comportamientos similares. La intención es poder determinar los procedimientos que pueden servir de base para plantear un método alternativo de diseño para la norma colombiana que considere solicitaciones en sismos o en condiciones de carga de evento extremo. Así se comparan los requisitos de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP 14 [3], el Eurocódigo [19] y el Estándar Australiano– AS 5100.4 [20].

A continuación, se presentan los criterios de comparación de las tres normas que se consideran relevantes para el desarrollo del artículo; así, como primer criterio de comparación se utiliza la norma en la cual se basa cada código, la CCP 14 se basa en la norma Norte Americana AASTHO [4], el Eurocódigo no se basa en ninguna norma, es creación propia del estándar Europeo de diseño y el Estándar Australiano se basa en la norma de Nueva Zelanda NZT [21]. Un criterio en común que tienen las tres normativas elegidas es que trabajan con unidades internacionales, es decir las tres consideran N, mm y MPa como unidades básicas para los procesos y formulaciones que se presentan a lo largo del desarrollo de los documentos, es por esto por lo que las fórmulas que se presentan a continuación se comparan directamente sin importar los factores adimensionales que involucran.

Como un punto de comparación importante se detallan las definiciones que cada norma brinda para estos dispositivos, la norma colombiana describe como los elastómeros reforzados son: *Apoyos hechos de láminas de acero y elastómero alternadas, adheridas por vulcanización*. En esa misma dirección el Eurocódigo describe como estos dispositivos son: *elastomeric bearing reinforced internally with one or more steel plates, chemically bonded during vulcanization*. Por su parte, el Estándar Australiano detalla: *An elastomeric bearing with two or more metal plates bonded in the elastomer*, luego se puede concluir que las tres definiciones son iguales, en la única que difieren es que la norma colombiana y europea detallan el método para unir las capas (vulcanización) y la australiana no realiza esta aclaración.

3. RESULTADOS

Uno de los principales intereses de este trabajo es caracterizar para qué clase de solicitaciones se diseñan los elastómeros, es decir, las combinaciones de carga que se utilizan para chequear el cumplimiento de los requisitos normativos, la CCP 14 considera solo cargas en estado límite de servicio para el diseño de estos dispositivos, el Eurocódigo por su parte detalla *Elastomeric bearings shall be designed to meet the relevant provisions of this section at ultimate limit state. At the ultimate limit state, the strength and stability of bearings shall be adequate to withstand the ultimate design loads and movements of the structure*, con lo que el Eurocódigo exige que las solicitaciones de diseño sean en estados límites últimos, es decir para cargas mayoradas.

Finalmente, el Estándar Australiano detalla: *Elastomeric bearings shall be designed for SLS effects. All bearings shall be designed to accommodate the relevant imposed loads, load effects and movements at the required limit state. Restraints shall be designed to resist, at the ULS, either the design load effects or the relevant component of the minimum lateral restraint capacity*, con lo que queda claro que solo el Eurocódigo considera que los elastómeros se deben diseñar para cargas en estado límite último y por su parte la norma colombiana y el Estándar Australiano diseñan para cargas en estado límite de servicio, no obstante el código Australiano si indica la necesidad de diseñar los elementos de restricción laterales para cargas últimas.

En esta misma dirección, al considerar los elementos de restricción lateral para evitar la salida de la superestructura de la zona de apoyo, la norma colombiana relata: *Si no se requiere que el apoyo*

elastoméricos mantenga su funcionamiento después del evento, debe proporcionarse otros medios tales como retenedores, STU, amortiguadores, o zonas de apoyo más anchas, para prevenir la salida de la superestructura de su zona de apoyo. El Eurocódigo detalla: *Although elastomeric bearings are designed to accommodate shear movements, they shall not be used to provide permanent resistance to a constantly applied shear force. Where a bearing fails, positive means of location shall be provided to resist the whole of the horizontal forces,* aunque los elastómeros se diseñan para adaptarse a los movimientos de corte, este no está concebido para resistir cargas laterales de forma permanente y por ende se deben ubicar restricciones en caso de que estos fallen o existan cargas laterales constantes que deban ser atendidas y puedan afectar el desempeño estructural.

Por su lado, el Estándar Australiano detalla: *Where it is required to restrict the movement of a bridge totally, partially or in a select direction, restraints shall be provided. These restraints may be provided as part of separate from the bearing, and may take the form of keys, keepers or side restraints,* lo que indica que la norma permite la ubicación de estos elementos restrictivos como elementos separados de la estructura principal del apoyo.

Así las tres normativas en análisis permiten la ubicación de elementos restrictivos laterales, no obstante, las funcionalidades que consideran para su diseño o ubicación difieren, ya que en la CCP 14 se utilizan solo cuando los dispositivos se consideran como fusibles, en el Eurocódigo para cargas permanentes laterales y en el Estándar Australiano como elementos adicionales solo en caso de que sean necesarios.

Adicionalmente a lo anterior, estas normas consideran factores de fricción para caracterizar la necesidad de fijación de los elastómeros, es así como la CCP 14 y el Estándar Australiano describen un factor de fricción entre elastómeros y concreto limpio de $\mu=0.20$ en condiciones estáticas, y para el Eurocódigo la formulación del factor de fricción depende de los esfuerzos de compresión, como se presenta en la ecuación (1), donde K_t es 0.60 para concreto y σ_m es el esfuerzo de compresión promedio.

$$\mu_e = 0.10 + \frac{1.50K_t}{\sigma_m} \quad (1)$$

De lo descrito anteriormente, se puede concluir que los factores de las dos primeras normas son constantes, y no dependen de las condiciones particulares de cada elemento en diseño, no obstante, la última formulación si considera las solicitaciones y condiciones particulares del elemento en diseño por lo que se considera más adecuada. Ahora considerado para la comparación la dimensión máxima de los elastómeros permitidos en cada norma, la CCP-14 no indica una dimensión máxima, aunque aclara para que dimensiones es posible usar el método A y en cuales casos es necesario usar el método B, este último exige controles de calidad y ensayos, que no requiere el primer método. El Eurocódigo por su parte, restringe la máxima dimensión a 1.2 x1.2 m y el Estándar Australiano no presenta ninguna restricción dimensional.

Respecto a la vida útil el Estándar Australiano lo define como 50 años, La CCP 14, aclara que deberán ser 75 años para dispositivos diferentes a los elastómeros, aunque no aclara cuanto para los elastómeros y el Eurocódigo no define tiempo de vida útil para estos dispositivos.

Al considerar las propiedades de los elastómeros, y específicamente respecto a los valores del módulo de cortante, G, considerando las clases Shore A-50 y Shore A-60, los rangos para la CCP 14 son: 0.66-0.90 MPa y 0.90-1.38 MPa, respectivamente, para el Eurocódigo 0.60-0.80 MPa y 0.75-1.05 MPa y en el Estándar Australiano 0.69 MPa y 0.90 MPa, respectivamente. Así, los módulos de corte para la CCP-14 y el Eurocódigo presentan rangos de variación, pero en el Estándar Australiano estos son valores fijos.

No obstante, lo anterior, debido al comportamiento del elastómero hiper-plástico que genera alta no linealidad [22], se considera más adecuado que se tengan rangos de variación del módulo de cortante, con lo que se consideran más adecuadas aquellas normativas que presentan rangos de variación. Respecto a las consideraciones geométricas, se considera el factor de forma del elastómero, S, el cual es un parámetro adimensional que da una buena idea de la rigidez compresiva de la capa, así para la CCP 14, el cálculo del factor de forma se realiza de acuerdo con 14.7.5.1-1 como se presenta en la ecuación (2).

$$S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)} \quad (2)$$

Donde:

L : es la dimensión en planta del apoyo perpendicular al eje de rotación bajo consideración (mm).

W : es la dimensión en planta del apoyo paralela al eje de rotación bajo consideración (mm).

h_{ri} : es el espesor de la i -ésima capa de elastómero (mm).

Por su parte el Eurocódigo detalla el factor de forma cómo se presenta en la ecuación (3).

$$S = \frac{A_1}{l_p t_e} \quad (3)$$

Donde:

A_1 : es el área efectiva del elastómero sin aberturas; $a' \cdot b'$, de acuerdo con la Figura 1 (mm²).

l_p : es el perímetro del apoyo; $2(a' + b')$, de acuerdo con la Figura 1 (mm).

t_e : es el espesor de la i -ésima capa de elastómero, de acuerdo con la Figura 1 (mm).

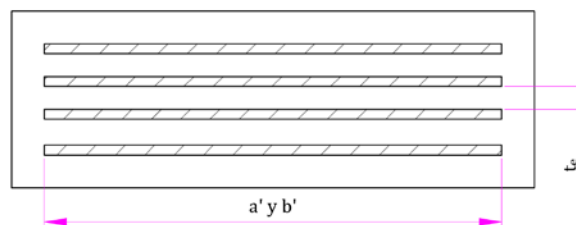


Figura 1. Parámetros geométricos Eurocódigo

Además, para el Estándar Australiano la formulación para el cálculo del factor de forma se presenta en la ecuación (4).

$$S = \frac{A_b}{P t_e} \quad (4)$$

Donde:

A_b : es el área efectiva del elastómero (mm²).

P : es el perímetro del apoyo (mm).

t_e : es el espesor de la i -ésima capa de elastómero en compresión (mm).

Finalmente, es posible concluir que en las tres normativas la formulación para el factor de forma es la misma, pues corresponde al área dividida por la multiplicación del perímetro por el espesor la capa interna de elastómero de interés. Así se puede concluir que para la determinación del factor de forma las tres normativas son consistentes.

Respecto a los límites de esfuerzos de deformación que se presentan en las normativas en análisis la CCP-14 y el Estándar Australiano presentan límites para estos valores asociados a condiciones de servicio, así es 5.0 para el primero y $2.6/\sqrt{G}$ para el segundo, para el Eurocódigo el límite es de 7.0 para condiciones de cargas mayoradas.

Por ende, se puede concluir que el límite de mayor magnitud está asociado a cargas en estado ultimo y en las dos primeras normas los límites de esfuerzos están asociados a estados límites de servicio, no obstante, los límites difieren ya que para la CCP 14 el límite permisible es mayor que para el Estándar Australiano en el que varía de 2.74 a 3.13 para elastómeros de clase Shore A-60 y Shore A-50, respectivamente. En este mismo sentido se realiza la comparación de las formulaciones que se utilizan para determinar los esfuerzos de deformación para cada normativa, así la deformación por cortante debidas a las cargas axiales o esfuerzos de compresión, para la CCP 14, es la presentada en la ecuación (5).

$$\gamma_a = \frac{D_a \sigma_s}{G S_i} \quad (5)$$

Donde:

D_a : es 1.4 para apoyos rectangulares y 1.0 para circulares.

σ_s : esfuerzo promedio de compresión para la combinación de servicio (MPa).

Por su parte para el código europeo se presenta la formulación en la ecuación (6).

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1.50F_{z,d}}{GA_rS} \quad (6)$$

Donde:

$F_{z,d}$: es la carga vertical de diseño (N).

A_r : es el área reducida en planta del apoyo elastómero y se calcula de acuerdo con ecuación (7) (mm²).

$$A_r = A_1 \left(1 - \frac{V_{x,d}}{a'} - \frac{V_{y,d}}{b'} \right) \quad (7)$$

Donde:

$V_{x,d}$: es el máximo desplazamiento horizontal relativo debido a todas las cargas de diseño en la dirección de a (mm).

$V_{y,d}$: es el máximo desplazamiento horizontal relativo debido a todas las cargas de diseño en la dirección de b (mm).

En este mismo sentido, para el Estándar Australiano la formulación para determinar los esfuerzos de deformación por cargas axiales se presenta en la ecuación (8).

$$\varepsilon_{sc} = \frac{6SN}{3A_{eff}G(1+2S^2)} \quad (8)$$

Donde:

N: fuerza compresiva de diseño en estado límite de servicio (N).

A_{eff} : es el área efectiva cargada en planta del apoyo elastómero cuando esta distorsionado tangencialmente y se calcula de acuerdo con la ecuación (9) (mm²).

$$A_{eff} = A_b \left(1 - \frac{\delta_a}{a} - \frac{\delta_b}{b} \right) \quad (9)$$

Donde:

δ_a : es el máximo desplazamiento horizontal relativo debido a todas las cargas de diseño en la dirección de a (mm).

δ_b : es el máximo desplazamiento horizontal relativo debido a todas las cargas de diseño en la dirección de b (mm).

Se puede concluir que las fórmulas para calcular los esfuerzos de deformación por cargas axiales presentan similitudes, específicamente respecto al termino esfuerzos sobre el módulo de cortante, y se presentan factores constantes adimensionales en las ecuaciones, para la CCP 14 es un factor de 1.4, para el Eurocódigo de 1.5 y para el estándar de Australia es de 2.0.

Además, se encuentra que las formulaciones descritas anteriormente varían principalmente respecto a dos componentes, el primero es respecto al cálculo de las áreas y el segundo es como se involucra el factor de forma en cada normativa, el Estándar Australiano lo considera como: $S/(1+S^2)$ mientras que en las otras dos normativas es $1/S$, así se obtienen valores más pequeños con la utilización de la formulación del Estándar Australiano.

Luego, se considera la deformación por cortante debidas a las rotaciones, para la CCP 14 es la presentada en la ecuación (10).

$$\gamma_r = D_r \left(\frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n} \quad (10)$$

Donde:

D_r : es 0.5 para apoyos rectangulares y 0.375 para circulares.

θ_s : ángulo de rotación de diseño en estado límite de servicio (rad).

n =número de capas interiores de elastómero.

Por su parte para el Eurocódigo se presenta en la ecuación (11).

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(\alpha_{a,d} \cdot a^2 + \alpha_{b,d} \cdot b^2) t_i}{2 \sum (t_i^3)} \quad (11)$$

Donde:

$\alpha_{a,d}$: es el ángulo de rotación considerando el ancho a , del elastómero (rad).

$\alpha_{b,d}$: es el ángulo de rotación considerando la longitud b , del elastómero (rad).

t_i : es el espesor de la i -ésima capa de elastómero en compresión (mm).

En este mismo sentido para el Estándar Australiano la formulación para determinar los esfuerzos de deformación por rotaciones se presenta en la ecuación (12).

$$\varepsilon_{st} = \frac{(\alpha_a \cdot a^2 + \alpha_b \cdot b^2) t_i}{2 t_i t} \quad (12)$$

Donde:

α_a : es el ángulo de rotación considerando el ancho a , del elastómero (rad).

α_b : es el ángulo de rotación considerando la longitud b , del elastómero (rad).

t_i : es el espesor de la i -ésima capa de elastómero en compresión (mm).

Posteriormente, respecto a las formulaciones para el cálculo de las deformaciones de corte asociado a las rotaciones, estas difieren, la principal diferencia es que la CCP 14 solo considera la rotación en una dirección.

Mientras que las otras dos normas si consideran las rotaciones en ambas direcciones, aunque difieren un poco respecto a los términos asociados al espesor de los elastómeros, ya que en el término del Eurocódigo se presenta una fracción y en el Estándar Australiano solo es el divisor. Respecto a un punto de predilección por una u otra metodología se elige aquellas que consideran la rotación en ambas direcciones.

Para finalizar el análisis de deformaciones por cortante totales, el último término es el asociado a las deflexiones, para la CCP 14, la formulación es la presentada en la ecuación (13).

$$\gamma_s = \frac{\Delta_s}{h_{rt}} \quad (13)$$

Donde:

Δ_s : deformación máxima de cortante en estado límite de servicio (mm).

Por su parte para el Eurocódigo se presenta en la ecuación (14).

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} \quad (14)$$

Donde:

$v_{xy,d}$: deformación máxima de cortante obtenida por suma vectorial $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ (mm).

T_q : es el espesor total del elastómero, incluyendo la capa superior e inferior (mm).

En este mismo sentido para el Estándar Australiano la formulación para determinar los esfuerzos de deformación por deflexiones se presenta en la ecuación (15).

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\delta}{t} \quad (15)$$

Donde:

δ : deformación máxima de cortante obtenida por suma vectorial (mm).

Finalmente, es posible concluir que para las tres normativas la formulación para este componente del chequeo de deflexiones por cortante es el mismo, solo se diferencian entre ellas por el hecho de que la CCP 14 no considera la suma vectorial que, si consideran las otras dos normativas, por ende, estas dos últimas formulaciones se consideran más adecuadas. Adicionalmente estas normativas presentan algunos criterios de estabilización para estos dispositivos, en este caso se analizan los criterios de estabilidad por compresión entre las tres normativas, la estabilidad por criterios de compresión para la CCP 14 se basa en las formulaciones presentadas en la ecuación (16).

$$\frac{3.84 \frac{h_{rt}}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2L}{W}}} \leq \frac{2.67}{(S_i + 2)(1 + \frac{2L}{4W})} \therefore \text{Es Estable} \quad (16)$$

Por su parte para el Eurocódigo se presenta en la ecuación (17) el criterio de estabilidad por compresión.

$$\frac{F_{z,d}}{A_t} < \frac{2a'GS_1}{3T_e} \quad (17)$$

Donde:

S_1 : factor de forma para las capas más gruesas

T_e : es el espesor nominal total del elastómero (mm).

En este mismo sentido, para el Estándar Australiano la formulación para la estabilidad por compresión se presenta en la ecuación (18).

$$N \leq \frac{2b_e GSA_{eff}}{3t} \quad (18)$$

Respecto a las formulaciones de estabilidad es posible concluir como entre el Eurocódigo y el Estándar Australiano las formulaciones para este chequeo son iguales, solamente difieren en que el Eurocódigo lo limita a valores inferiores mientras el Código Australiano permite menores e iguales. Por su parte el chequeo de estabilidad de la CCP 14 difiere bastante con las otras dos normativas en comparación, ya que solo involucra factores geométricos que en las otras dos normativas además de estos factores geométricos se incluye el módulo de cortante en la formulación. Como último punto de interés para la comparación se considera las láminas de refuerzo de acero, los mínimos espesores por cada normativa difieren, para la CCP 14 el espesor mínimo solicitado es 1.5 mm, para el Eurocódigo es 2.0 mm, y para el Estándar Australiano es 5.0 mm. El espesor de las láminas de acero debe cumplir para la CCP 14 según la ecuación (19).

$$h_s \geq \frac{3h_{ri}\sigma_s}{F_y} \quad h_{s \min} = 1.50 \text{ mm} \quad (19)$$

Por su parte el Eurocódigo presenta los requisitos de espesor mínimo de acuerdo con la ecuación (20).

$$t_s = \frac{K_p F_{z,d}(t_1 + t_2) K_h \gamma_m}{A_t f_y} \quad t_{s \min} \geq 2.00 \text{ mm} \quad (20)$$

Donde:

K_p : 1.3 y $\gamma_m=1.0$.

K_h : 1.0 para elastómeros sin aberturas y 2.0 para elastómeros con aberturas.

t_1 y t_2 : espesor de las capas de elastómeros a ambos lados de la lámina de acero.

En este mismo sentido para el Estándar Australiano la formulación para determinar el espesor mínimo de las láminas de acero se presenta en la ecuación (21).

$$t_s > \frac{3Nt_i}{A_b f_y} \quad t_{s \min} = 5.0 \text{ mm} \quad (21)$$

Finalmente es posible concluir que los espesores mínimos entre normativas difieren y varían entre el rango de 1.5 a 5.0 mm, y nuevamente existen diferencias marcadas entre los límites planteadas por las tres normativas. No obstante respecto al tema de las formulaciones las ecuaciones son muy similares ya que consideran la misma información para hacer el chequeo y solo difieren en los factores adimensionales considerados siendo 3 para la CCP 14 y para el Estándar Australiano que consideran cargas en servicio y 1.3 para el Eurocódigo que considera cargas en estado último.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto a las definiciones de elastómeros reforzados que cada norma brinda se puede concluir que las tres definiciones son iguales, en la única en que difieren es que la norma colombiana y europea detallan el método para unir las capas (vulcanización) y la australiana no realiza esta aclaración. Respecto a la dimensión máxima de estos dispositivos solo el Eurocódigo presenta una restricción de dimensión máxima, y lo limita a dispositivos de 1.2 x 1.2 m y solo el Estándar Australiano requiere una vida útil mínima de 50 años para estos elementos. Adicionalmente, respecto a los factores de forma se puede concluir que las tres normativas presentan iguales formulaciones para el cálculo de estos, por lo que estos son factores estándar, no ocurre lo mismo respecto a los módulos de cortante ya que los valores difieren y específicamente la CCP 14 y el Eurocódigo presentan rangos de variación para cada tipología, no obstante el Estándar Australiano registra valores constantes, se considera más adecuado tener rangos de variación debido al comportamiento no lineal del elastómero.

Adicionalmente a lo anterior, las normas consideran factores de fricción para caracterizar la necesidad de fijación de los elastómeros, y se concluye que los factores de la CCP 14 y el Estándar Australiano son constantes, y no dependen de las condiciones particulares de cada elemento en diseño, no obstante, la formulación del Eurocódigo si considera las solicitaciones y condiciones particulares del elemento en diseño por lo que se considera más adecuada. En este mismo sentido, las tres normativas en análisis permiten la ubicación de elementos restrictivos laterales, no obstante, las funcionalidades que consideran para su diseño o ubicación difieren, ya que en la CCP 14 se utilizan solo cuando los dispositivos se consideran como fusibles, en el Eurocódigo para cargas permanentes laterales y en el Estándar Australiano como elementos adicionales solo en caso de que sean necesarios.

Respecto al cálculo de las deformaciones por cortante, las tres normativas utilizan la suma de tres efectos generados en estos dispositivos, el efecto de la carga axial, el efecto de las rotaciones y de las deformaciones. Para calcular los esfuerzos de deformación por cargas axiales entre las tres normativas existen similitudes, específicamente respecto al término esfuerzos sobre módulo de cortante, el cual las tres normas lo incluyen. Además, presentan diferencias la primera son los factores constantes adimensionales en las ecuaciones, para la CCP 14 es un factor de 1.4, para el Eurocódigo de 1.5 y para el Estándar Australiano es de 2.0. Conjuntamente, dentro de los términos que difieren se encuentran el cálculo de las áreas entre la CCP 14 y las otras dos normativas y el uso del factor de forma del Estándar Australiano: $S/(1+S^2)$ que en las otras dos normativas solo es $1/S$.

También, respecto a las formulaciones para el cálculo de las deformaciones de corte relacionado con las rotaciones, existen diferencias entre las formulaciones planteadas en las tres normativas, la principal diferencia es que la CCP 14 solo considera la rotación en una dirección, mientras que las otras dos normas si consideran las rotaciones en ambas direcciones, además difieren respecto a los términos asociados al espesor de los elastómeros, ya que en el término del Eurocódigo se presenta una fracción y en el Estándar Australiano solo es el divisor. Respecto a un punto de predilección por una u otra metodología se elige aquellas que consideran la rotación en ambas direcciones. Finalmente considerando el último término por deflexiones se concluye que para las tres normativas la formulación es la misma, solo se diferencian entre ellas por el hecho de que la CCP 14 no considera la suma vectorial que, si consideran las otras dos normativas, por ende, estas dos últimas formulaciones se consideran más adecuadas.

En lo relacionado con la comparación entre las formulaciones de estabilidad de las tres normativas es posible concluir como entre el Eurocódigo y el Estándar Australiano las formulaciones para este chequeo son iguales, solamente difieren en que el Eurocódigo lo limita a valores inferiores mientras el Estándar

Australiano permite menores e iguales. Por su parte el chequeo de estabilidad de la CCP 14 difiere bastante con las otras dos normativas, ya que solo involucra factores geométricos que en las otras dos normativas se incluye adicionalmente el módulo de cortante en la formulación.

Como último punto de interés para la comparación es posible concluir que los espesores mínimos entre normativas difieren y varían entre el rango de 1.5 a 5.0 mm, y nuevamente existen diferencias marcadas entre los límites planteadas por las tres normativas. No obstante respecto al tema de las formulaciones las ecuaciones son muy similares ya que consideran la misma información para hacer el chequeo y solo difieren en los factores adimensionales considerados, siendo 3 para la CCP 14 y para el Estándar Australiano que consideran cargas en servicio y 1.3 para el Eurocódigo que considera cargas en estado último.

5. CONCLUSIONES

Los países que se interesan en el desempeño sísmicos de los elastómeros son aquellos que son vulnerables ante la ocurrencia de estos eventos. La vulnerabilidad se mide tanto en términos de pérdidas de vidas, como en el costo económico de la afectación de la infraestructura vial durante estos desastres naturales. Uno de los objetivos principales de la ingeniería civil desde sus inicios es poder brindar estructuras e infraestructuras seguras y confiables, por lo que la comunidad debe confiar en gran medida en el criterio y la idoneidad de los ingenieros, es así que se hace imperativo que el gremio cuente con procedimientos y estándares de diseño que conozcan y planteen métodos para el análisis de estructuras durante cada uno de los acontecimientos a los que se pueda ver sometida la estructura, estos procedimientos deben considerar cargas de servicio o mayoradas, pero además, también la ocurrencia de eventos extremos y ocasionales como los sismos.

En este sentido, debido a la ocurrencia de estos eventos los cuales producen cargas dinámicas, en recientes años los ingenieros han podido observar que las estructuras no solo requieren un desempeño adecuado durante el evento, sino que también tras el evento, las estructuras deben permanecer en las mejores condiciones posibles en busca de que los costos de reparación y rehabilitación sean los adecuados, sin encarecer de manera excesiva la construcción y el diseño original. Es por ello, que diferentes países propensos a esta clase de desastres tras la ocurrencia de cada evento realizan evaluaciones de los códigos de diseño y mejoras en busca de garantizar la seguridad de la vida y costos de reparaciones óptimos, esto dependiendo del grado de intensidad del sismo. Cada país que tiene requisitos sísmicos posee un código asociado que tradicionalmente utiliza diferentes métodos de diseño de acuerdo con su normativa o basado en normativas internacionales que consideran se adaptan mejor a la tipología topográfica, sísmica y geográfica de la región.

Es importante resaltar que diversos estudios han mostrado que, en eventos sísmicos de magnitud considerable, la zona correspondiente a la conexión entre superestructura y subestructura es la más propensa a daño. Investigadores chilenos reportaron que 300 puentes fueron dañados durante el terremoto de Maule de 2010 (Mw=8.8) en Chile, donde los daños asociados a estos puentes se clasifican principalmente en desplazamientos o rotaciones excesivas o pérdida de soporte de la superestructura, deslizamiento de apoyos elastómeros, en el caso de puentes esviados insuficientes longitudes de apoyo y en puentes prefabricados golpes entre la superestructura y las llaves de corte externas (shear keys). Adicionalmente, estos mismos autores identificaron que los puentes simplemente apoyados de vigas prefabricadas corresponden al 67% del total de puentes reportados con daño en el terremoto de Maule de 2010 [23].

Con base en análisis numéricos de un puente representativo del contexto chileno consistente en vigas prefabricadas con apoyos elastómeros, concluye que los recientes cambios en la normativa de diseño de puentes chilena proporcionan una mejora significativa en términos de probabilidad de colapso debido a mejoras en el diseño a fluencia de las llaves de corte externas, comportándose estos elementos como fusibles [24]. En este contexto, es importante resaltar que son necesarias investigaciones en el contexto nacional que permitan identificar deficiencias en llaves de cortes externas en puentes existentes, que en conjunto con el enfoque presentado en este capítulo proporcionen una solución integral que no solamente minimice la probabilidad de colapso de puentes, sino que garantice también su funcionalidad post sismo.

En este punto es importante resaltar que en Colombia no se han presentado eventos sísmicos de magnitud considerable en los últimos 22 años, en contraposición con países como Chile, Ecuador y Perú que han presentado eventos sísmicos de magnitud considerable que han permitido identificar fallencias en puentes y promover mejoras en normativas.

Otro aspecto importante relacionado con el uso de elastómeros es la limitación actual que existe para modelar su comportamiento, si bien es posible encontrar en la literatura estudios de caracterización de la respuesta individual de elastómeros a nivel de laboratorio, el complejo mecanismo resultante entre la interacción entre todos los componentes de un puente, especialmente en sismos, aún es materia de estudio. Recientes investigaciones han utilizado modelación híbrida en tiempo real analizaron el comportamiento de un puente con vigas simplemente apoyadas en elastómeros encontrando que la altura de la columna sobre la cual se apoya el elastómero presenta una influencia que varía del orden del 10% al 30%, mientras que el apoyo elastómero presenta una influencia del orden del 15% de la respuesta total del puente. Adicionalmente, resaltan que si se considera en el modelo numérico el comportamiento dependiente de la velocidad del elastómero permite una mejor representación del modelo [6].

El modelado numérico cobra especial importancia en el contexto normativo vigente nacional donde el uso de modelos lineales para representar la respuesta dinámica mediante el método modal espectral limita en gran forma la incorporación de modelos de respuesta viscoelástica. Es importante mencionar que en el contexto nacional existen puentes que han evidenciado deterioro de los apoyos elastómeros debido a deterioro en el tiempo, no es posible conocer con certeza su estado actual y su capacidad para resistir sismos de magnitud considerable que se puedan presentar en los próximos años, por tal motivo se deben promover estudios que permitan identificar el estado actual de estos elementos con el fin de proponer sistemas de reforzamiento o reemplazo oportuno.

Así es posible definir que a nivel mundial existen diferentes normas y procedimientos de diseño para los apoyos elastómeros, los cuales presentan requisitos para la delineación de estos dispositivos y además describen como deberá ser la interacción con los demás elementos del puente, al considerar estos componentes como un conjunto se espera hallar el diseño óptimo en condiciones normales de servicio y ante estos eventos de ocurrencia ocasional, para lograr este objetivo es necesario abordar temas como la respuesta de sitio, respuesta no lineal de puentes, caracterización de respuesta de apoyos elastómeros con base en experimentación y la respuesta dinámica, cuando se analizan estos componentes considerando su interacción con otros elementos. Son muchos los aspectos que se deben considerar, pero la validación en laboratorio de los apoyos elastómeros es importante para garantizar un adecuado desempeño sísmico.

Finalmente, en el presente trabajo se seleccionaron tres normativas internacionales con el fin de comparar requisitos y procesos de diseño para los apoyos elastómeros, así se trabaja con la norma colombiana CCP 14, la norma europea conocida como el Eurocódigo y el Estándar Australiano el AS 5100.4. En este sentido, es posible concluir que las metodologías de diseño para los apoyos elastómeros de las normas elegidas presentan similitudes y diferencias entre ellas, específicamente la más interesante respecto al objetivo final de la investigación es el Eurocódigo debido a que considera cargas en estados límites últimos, donde se incluyen las cargas sísmicas y por ende es posible considerarlo como un punto interesante, para adaptarlo a la normativa vigente colombiana, ya que como se describió, el CCP 14 solo considera cargas verticales en servicio como insumo para el proceso de diseño estructural de estos elementos de conexión. Finalmente, es posible concluir que en las tres normativas existen diferencias y similitudes en las formulaciones planteadas para caracterizar el comportamiento de estos dispositivos, no obstante, las tres normas verifican factores y comportamientos similares que permitieron desarrollar las comparaciones presentadas en el desarrollo del capítulo.

REFERENCIAS

- [1] C. W. Roeder, and J. F. Stanton, "State-of-the-Art Elastomeric Bridge Bearing Design," *ACI Structural Journal*, vol. 88, pp. 31-41, January 1991.
- [2] R. L. Brockenbrough, *Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure*, Third Edition. New York: McGraw-Hill, 2009.

- [3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, *Norma colombiana de diseño de puentes – LRFD – CCP 14*. Colombia: Instituto Nacional de vías INVIAS, 2014.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Washington, D.C, 2012.
- [5] Q. Zhang, and M. S. Alam, "Performance-based seismic design of bridges: a global perspective and critical review of past, present and future directions," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 539–554, February 2019.
- [6] W. Wei, Y. Yuan, A. Igarashi, H. Zhu, and P. Tan, "Experimental investigation and seismic fragility analysis of isolated highway bridges considering the coupled effects of pier height and elastomeric bearings," *Engineering Structures journal*, vol. 233, p. 111926, January 2021.
- [7] P. Asadi, D. Nikfar, and I. Hajirasouliha, "Life-cycle cost based design of bridge lead-rubber isolators in seismic regions," *Structures*, vol. 27, pp. 383–395, June 2020.
- [8] M. Aria, and R. Akbari, "Inspection, condition evaluation and replacement of elastomeric bearings in road bridges," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 9, no. 9, pp. 918–934, November 2013.
- [9] Z. M. Mohamedmeki, F. J. Esmail, and E. A. Ajeel, "Fatigue life analysis of laminated elastomeric bearing pad," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, no. 5, pp. 2361–2368, February 2021.
- [10] E. Muñoz, and E. Valbuena, "Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia," *Revista Intern. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 4, no. 40, pp. 125–140, Diciembre 2004.
- [11] Y. Al-Anany, M. Moustafa, and M. Tait, "Modeling and evaluation of a seismically isolated bridge using unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators," *Earthquake Spectra*, vol. 34, no. 1, pp. 145–168, February 2018.
- [12] *Bridge Design Manual: Bearings and Expansion Joints*. Washington: Washington State Department of Transportation, 2020, pp. 60–83.
- [13] A. Strauss, E. Apostolidi, T. Zimmermann, U. Gerhaher, and S. Dritsos, "Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient," *Engineering Structures*, vol. 75, pp. 402–413, July 2014.
- [14] A. Khaloo, A. Maghsoudi-Barmi, and M. Ehteshami Moeini, "Numerical parametric investigation of hysteretic behavior of steel-reinforced elastomeric bearings under large shear deformation," *Structures*, vol. 26, pp. 456–470, April 2020.
- [15] H. A. Gibe, H. Tamai, and Y. Sonoda, "Numerical study on failure process and ultimate state of steel bearing under combined load," *Heliyon*, vol. 6, no. 4, p. e03764, 2020.
- [16] E. Muñoz and D. Gómez, "Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia," *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 28, no. 1, pp. 37–62, Abril 2013.
- [17] I. Kilanitis, and A. Sextos, "Impact of earthquake-induced bridge damage and time evolving traffic demand on the road network resilience," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 35–48, 2018.
- [18] P. Nazzari, S. Armuti, "9. Design of Earthquake-Resistant Bridges (AASHTO Code)," in *Earthquake Engineering: Theory and Implementation with the 2015 International Building Code*, Third Edition, M.-H. Education, Ed. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 1–63.
- [19] European Committee for Standardization. "Structural Bearings Part 3: Elastomeric Bearing" in *European standard*. EN 1337-3, March 2005.
- [20] Committee DB-090, Bridge Design. *Australian Standard AS500.4:2017*, March 2017.
- [21] Transit New Zealand. *New Zealand bridge design manual*. Wellington. 2016.
- [22] A. I. Yusuf, M. A. Norliyati, M. A. Yunus, and M. N. Abdul Rani, "Investigation of dynamic properties of elastomeric bearing components via modal analysis," *Jurnal Teknologi*, vol. 76, no. 8, pp. 17–21, March 2015.
- [23] J. Wilches, H. Santa María, R. Riddell, and C. Arrate, "Effects of changes in seismic design criteria in the transverse and vertical response of Chilean highway bridges," *Engineering Structures*, vol. 191, pp. 370–385, April 2019.
- [24] J. Wilches, H. Santa María, R. Riddell, and C. Arrate, "Influence of the use of external shear keys on the seismic behavior of Chilean highway bridges," *Engineering Structures*, vol. 147, pp. 613–624, June 2017.

Fundamentos conceptuales y métodos para determinar la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos

Ray Andrés Ardila Cubillos¹
Guillermo Mejía Aguilar²
Universidad Industrial de Santander
Colombia

La industria de la construcción se caracteriza por hacer uso masivo del recurso de mano de obra, de ahí su importancia como fuente de empleo y actividad económica significativa en el PIB de los países. El bajo crecimiento de la productividad laboral mostrado por el sector en las últimas décadas en Colombia es síntoma de los problemas que ha venido atravesando la industria a nivel externo e interno, específicamente respecto del insumo de mano de obra, representado en cuadrillas de trabajo. Esta investigación se propuso identificar los fundamentos conceptuales y métodos empleados en el contexto colombiano para determinar la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos. El estudio es exploratorio-descriptivo, de corte transversal, e implicó el diseño, validación y aplicación de una encuesta para indagar sobre actitudes, creencias y prácticas de la gestión del recurso de mano de obra, en empresas del área metropolitana de Bucaramanga. De acuerdo con las respuestas de 60 empresas que respondieron el cuestionario, se obtuvo los siguientes resultados: el 50% no implementa marcos de referencia de gestión de proyectos, el 60% emplea la experiencia como criterio de toma de decisiones respecto de la conformación de las cuadrillas de trabajo y el 43,3% no emplea ninguna herramienta para conformar las cuadrillas. El estudio permite concluir que algunas causas de los problemas internos que afronta la industria son la falta de implementación de marcos de referencia, así como de métodos y herramientas para el diseño de cuadrillas de trabajo, consecuencia de la informalidad en los procesos y operaciones de construcción de las empresas de la región.

¹ Estudiante de maestría y profesor de cátedra.

Contacto: ray2208070@correo.uis.edu.co

² Profesor de planta.

Contacto: gmejia@uis.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la industria de la construcción se refleja en su aporte del 3% al PIB mundial y en el empleo del 7% de la fuerza de trabajo remunerada, según las cifras del Observatorio de Derechos Humanos y Empresas de la región mediterránea ODHE [1]. La construcción es un sector económico que se caracteriza por hacer uso masivo de la mano de obra [2], recurso relevante que constituye entre un 30-50% del costo directo de los proyectos de construcción [3]. Esta relevancia de la mano de obra en la construcción amerita el análisis de este recurso –desde el enfoque de la productividad laboral– como un indicador determinante de cara a mejorar su impacto económico y social [4].

Durante las últimas décadas, se ha observado un bajo crecimiento de la productividad laboral en la industria de la construcción, cercano al 1%, en contraste con el 3.6% observado por la industria manufacturera, según los estudios de McKinsey [5] y de la Cámara Colombiana de la Construcción Camacol [6]. Adicionalmente, estos estudios muestran que Colombia, no solo se ubica en los últimos puestos en productividad laboral comparados con países pares, sino que a partir de 1995 presenta una constante contracción, que lo sitúa dentro del grupo de países rezagados junto a México, Brasil y Malasia.

Los indicadores de la productividad laboral de la construcción muestran bajo crecimiento y rezago comparado con otras industrias. Esto se debe a diferentes causas, dentro de las cuales se señalan la deficiente gestión de cuadrillas de trabajo en los procesos constructivos, la ausencia de métodos para definir su composición, así como la informalidad por parte de las empresas constructoras a nivel regional para definir sus integrantes y requerimientos de trabajo en proyectos de construcción. Por ello, se requiere indagar sobre los métodos, prácticas y herramientas usadas por la industria de la construcción regional para la conformación de cuadrillas de trabajo.

Una encuesta preliminar realizada en el área metropolitana de Bucaramanga nos indica que: el 59% de 60 ingenieros encuestados consideran la informalidad en la gestión y dirección de los proyectos como uno de los factores que afecta los márgenes de ganancia de los proyectos. A su vez, el 55% de los encuestados consideran la falta de herramientas tecnológicas de control y de automatización de procesos como otro factor que afecta dichos márgenes de ganancia. Esto muestra que hace falta conocer buenas prácticas para lograr un mayor formalismo de los procesos de gestión y control de obra, como una posible solución a los bajos índices de productividad y rentabilidad.

Adicionalmente, se observa que las condiciones y exigencias de los trabajos cada vez son más altas, lo que demanda mejorar la productividad laboral para mitigar los efectos adversos en los índices de rentabilidad de los proyectos. Con base en la misma encuesta se encontró que el 68% de los encuestados considera que los presupuestos de obra ahora son más restringidos, como consecuencia de una mayor competencia en el mercado, y el 77% de los encuestados considera que los estándares de calidad son más altos y por el mismo precio pagado.

Bajo el contexto anteriormente expuesto surgen algunos interrogantes que ameritan apropiadas respuestas. ¿Cuáles son los fundamentos conceptuales que se evidencian en nuestras prácticas para diseñar las cuadrillas de trabajo? ¿Cuáles son los métodos de diseño de cuadrillas de trabajo empleados en nuestro contexto colombiano para las obras de construcción? Con el fin de dar respuesta a estas preguntas, el presente estudio se propuso identificar los fundamentos conceptuales y métodos empleados en nuestro contexto colombiano para determinar la cuadrilla de trabajo de un proceso constructivo.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Productividad laboral

La productividad representa la relación entre la producción y los insumos asociados al proceso, relación que informa sobre el comportamiento de una empresa individual, de un sector económico particular o del sector económico en general [7]. De acuerdo a los insumos incluidos en la relación, la productividad se puede expresar como productividad total multifactorial PTM, expuesta en la ecuación (1), o productividad

parcial de los factores. A su vez, la productividad parcial se puede expresar como productividad del capital PC, representada en la ecuación (2), o productividad laboral PL, explicada en la ecuación (3).

$$PTM = \frac{\text{Producción}}{\Sigma(\text{Costo de los insumos})} \quad (1)$$

$$PC = \frac{\text{Producción}}{\Sigma(\text{Capital})} \quad (2)$$

$$PL = \frac{\text{Producción}}{\Sigma(\text{Mano de obra})} \quad (3)$$

La productividad total multifactorial fue implementada alrededor de 1950 [8] por la Organización Europea para la Cooperación Económica OEEC como un instrumento de observación del comportamiento productivo a nivel macro económico. Por su parte, la productividad parcial de factores da cuenta sobre el desempeño productivo del insumo requerido de manera particular, en función de unidades producidas.

Según el enfoque y la finalidad, las unidades de medida de la productividad pueden variar [9], por ejemplo, a nivel económico, se mide la producción en términos de ingresos o valor agregado bruto y los insumos por su costo [10], en el caso de la productividad laboral, el insumo de interés es el aportado por el recurso de mano de obra, es decir las horas hombre por cantidad instalada de producto.

Para el presente estudio el tipo de productividad analizada es la productividad laboral en construcción PLC ecuación (4), observada a nivel de obra, ya que se constituye como una comparación del rendimiento, así como indicador de referencia de desempeño en el nivel operacional. En este sentido, se requiere que la PLC se exprese como una relación entre producción, indicada en unidades instaladas de producto, y el insumo de mano de obra requerido, indicado como horas-hombre, u horas-cuadrillas, invertidas para producir dichas unidades instaladas de producto [11].

$$PLC = \frac{\text{Unidades instaladas}}{\Sigma(\text{horas hombre})} \quad (4)$$

2.2 Cuadrillas de trabajo

A nivel genérico, las cuadrillas de trabajo se definen como unidades de trabajo continuo responsables de la producción de bienes y provisión de servicios [12]. En la industria de la construcción, el recurso de la mano de obra agrupa individuos de producción (trabajadores) en configuraciones usuales de equipos o cuadrillas de trabajo, compuestas por oficiales y ayudantes[13]. Esta conformación de oficiales y ayudantes debe ser la estrictamente necesaria y suficiente para realizar una tarea de manera idónea, configurándose así la cuadrilla tipo [14]. Aunque por lo general, los contratistas no definen una cuadrilla típica de trabajo, cada trabajo puede exigir un tamaño y una composición de cuadrilla completamente diferente [15].

Adicional a la conformación de las cuadrillas de trabajo laboral en obra, otro factor que influye en los índices de productividad es la alta rotación del personal que labora en la industria de la construcción. Esta situación dificulta la transferencia del conocimiento, que por lo general se da de manera tácita e informal, demandando a los nuevos trabajadores un mayor tiempo para la asimilación y adaptación en su desempeño en las nuevas tareas, lo que impacta de manera adversa en la productividad laboral. Este fenómeno se ha estudiado bajo el concepto de curvas de aprendizaje.

2.3 Curvas de aprendizaje

El proceso de aprendizaje, referido a una labor determinada, generalmente se entiende a través del comportamiento del desempeño del trabajador en función del tiempo, conocido como curva de aprendizaje [16]. Específicamente, algunos autores, establecen como curva de aprendizaje la relación del costo por unidad de producción en función del tiempo, la cual presenta un comportamiento decreciente a medida que aumenta la experiencia del trabajador [17]. Esta relación en función del tiempo, también se puede entender como productividad laboral.

La curva de aprendizaje se ha estudiado principalmente en equipos o cuadrillas de trabajo, en ambientes estáticos con labores en gran medida homogéneas, principalmente en estudios industriales empíricos o en estudios psicológicos experimentales [16]. Otros estudios industriales han analizado el tipo de curva que se debe representar, dentro de los cuales se encuentran: logarítmico lineal, exponencial, hiperbólico y de tipo multivariable [18].

De manera específica, en la industria de la construcción los estudios en curvas de aprendizaje se realizan desde un enfoque estadístico y de regresión. En cuanto al alcance, se han encontrado estudios que van desde las actividades de vaciado de concreto, de construcción de edificios, como también de construcción de proyectos de infraestructura a gran escala [19].

3. MÉTODO

Para lograr el objetivo planteado se llevó a cabo una investigación exploratoria-descriptiva, de corte transversal, basada en encuestas, para indagar sobre actitudes, creencias y prácticas [20, 21] del sector de la construcción en el área metropolitana de Bucaramanga. El desarrollo de la investigación se realizó en cuatro fases, como se muestra en la Figura 1.

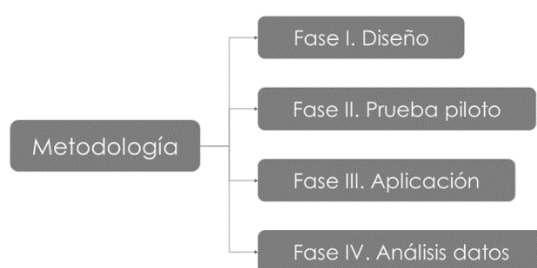


Figura 1. Esquema de la metodología de investigación implementada

3.1 Fase I. Diseño de la encuesta

De acuerdo a la metodología propuesta, esta primera fase consistió en diseñar la encuesta a realizar. Para el diseño, primero se realizó una revisión de literatura sobre los temas a indagar; luego, se diseñó el instrumento de recolección de datos.

3.1.1 Revisión de literatura

Se realizó una revisión de literatura para identificar los factores que afectan la productividad laboral en proyectos y obras de construcción, e identificar los métodos y las buenas prácticas empleadas en la conformación de las cuadrillas de trabajo, con el fin de tener los insumos para el diseño del instrumento de recolección de información. Con relación a los factores que afectan la productividad en proyectos de construcción se realizó una búsqueda en la base de datos SCOPUS, utilizando la ecuación de búsqueda (TITLE-ABS-KEY (critical Review) AND TITLE-ABS-KEY (factors) AND TITLE-ABS-KEY (labour productivity)). En cuanto al diseño de la cuadrilla de trabajo, se empleó la ecuación TITLE-ABS-KEY (crew design), búsqueda realizada el 10 de mayo de 2021.

3.1.2 Diseño del instrumento de recolección

Con base en los instrumentos sugeridos por Cisneros et al. [21], se analizaron los objetivos, alcance y tipo de estudio de la presente investigación, para seleccionar el instrumento de recolección a utilizar. En la Tabla 1 se observan las técnicas y sus respectivos instrumentos de recolección.

Para esta investigación se adoptó como técnica de recolección de datos la encuesta, y como instrumento de recolección de datos, el cuestionario digital sistematizado. Debido a la situación de distanciamiento actual, a las limitaciones de tiempo y de recursos disponibles, estas selecciones de técnica e instrumento, se consideraron apropiadas para obtener la percepción personal de los individuos a encuestar.

Tabla 1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas	Instrumentos
Observación	Lista de frecuencia
Entrevista	Guía de entrevista
Encuesta	Cuestionario
Grupo focal	Cuestionario
Narrativa	Biografía
Semántica	Redes semánticas
Análisis de contenido	Corpus sistematizados

Como instrumento de recolección de datos se diseñó un cuestionario digital sistematizado que fue administrado vía correo electrónico. El cuestionario se organizó en cinco secciones, para formular veintitrés (23) preguntas, distribuidas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Estructura del cuestionario de la encuesta

Sección [Numeración de la pregunta]	Preguntas	%
A. Caracterización de las empresas [de 1 a 5]	5	22
B. Caracterización del encuestado [de 7 a 9]	3	13
C. Comportamiento económico del sector [de 10 a 15]	6	26
D. Métodos de conformación de cuadrillas [de 16 a 22]	8	35
E. Covid-19 [23]	1	4
Total	23	100

Como técnica de estructuración y organización de las preguntas se empleó la técnica embudo, donde las primeras preguntas del cuestionario son genéricas e impersonales, con la intención de generar confianza y familiaridad en el encuestado, y a medida que se desarrolla el cuestionario se formulan preguntas que requieren una opinión y mayor grado de compromiso [22].

Con respecto al tipo de pregunta, de las veintitrés preguntas, dieciocho (72%) fueron del tipo de respuesta única y cerrada, con la opción de incluir una categoría no considerada inicialmente, cuando se es seleccionado alternativamente la opción *otra*. Las cinco preguntas restantes (28%), fueron del tipo de respuesta con una escala Likert de importancia. Adicionalmente, aquellas preguntas donde se solicitaba una opinión o una percepción, se aplicó la técnica de rotación de repuestas, para evitar sesgo por elección de la primera opción. El cuestionario se puede ver en el Anexo x1.

3.2 Fase II. Prueba Piloto

Una vez diseñado el instrumento, se aplicó una prueba piloto para validar el diseño de la encuesta, y así realizar la retroalimentación sobre los resultados preliminares, eventuales fallas en la información, el medio de recolección, la tabulación de los datos, problemas de significado, confusión y de sesgo por parte del diseñador o de la misma estructura del instrumento. Una vez obtenidos los resultados de la prueba piloto, se realizaron las correcciones y/o modificaciones respectivas para el diseño definitivo del cuestionario. La prueba piloto fue aplicada a un grupo de 20 estudiantes de octavo semestre de ingeniería civil, a 3 profesores del área de construcción de obras civiles y a 2 expertos de la industria de la construcción. De esa primera aplicación se encontraron problemas referentes al contenido del cuestionario y a la estructura del mismo. Se evidenció que:

- Las preguntas abiertas generaban gran cantidad de respuestas diferentes, cuando se sistematizaban los resultados, solo por las variaciones de mayúsculas/minúsculas y errores ortográficos, debido al mecanismo interno de tabulación de la plataforma digital en línea, por la cual se aplicó el cuestionario; este error se subsanó añadiendo respuestas faltantes, realizando preguntas cerradas e incluyendo la opción *otra respuesta* marque y responda ¿cuál?
- La falta de instrucciones para contestar el cuestionario generaba confusión en los encuestados; esto se subsanó agregando instrucciones claras al inicio de la encuesta.
- La necesidad de agrupar las preguntas por temas; enunciar dichos temas y dar un tiempo aproximado de respuesta para generar sensación de certidumbre en el encuestado.

- La necesidad de brindar garantías de privacidad y buen manejo de datos del encuestado; como mejoramiento aplicado, se incluyó un enunciado de confidencialidad y anonimato de las respuestas, así como la cláusula de ley de protección de datos del encuestado.
- La necesidad de valorar la participación en la encuesta; como mejora, se añadió una sección de agradecimientos al encuestado al final del cuestionario.

En cuanto a las anotaciones de fondo se evidenció que:

- Las preguntas sobre *comportamiento económico del sector*, desde el punto de vista de la redacción y composición gramatical, no eran claras y generaban ambigüedad. Se solicitó ayuda a profesionales del lenguaje para reformular las preguntas, solucionando la complejidad y ambigüedad de la propuesta inicial. El mejoramiento se evidenció en una redacción más sencilla y entendible.
- Las preguntas sobre *métodos de conformación de cuadrillas de trabajo* requerían una reformulación, basada en preguntas orientadoras, que respondieran el ¿quién?, ¿cuándo?, ¿cómo?, ¿qué método?, ¿qué herramienta?; se atendió esta observación, y las preguntas fueron reformuladas.

3.3 Fase III. Aplicación de la encuesta.

Para la aplicación de la encuesta se seleccionó el medio electrónico más apropiado, se identificó la población beneficiaria y se calculó el tamaño de la muestra. Finalmente, se caracterizó la última muestra analizada.

3.3.1 Medio de aplicación de la encuesta

Una vez realizada la prueba piloto y validado el instrumento de recolección de datos, se aplicó la encuesta mediante un cuestionario digital, que fue administrado vía correo electrónico. El medio idóneo para aplicar el cuestionario digital diseñado fue la herramienta en línea *Google forms*. Se tuvo en cuenta que la selección del medio favoreciera la consecución del objetivo del estudio, el alcance, el tiempo y los recursos disponibles, además, que facilite la recolección de las observaciones y su almacenamiento.

Esta herramienta en línea ofrece la posibilidad de enviar el cuestionario por correo electrónico, y en general, por aplicaciones de redes sociales, lo que favorece la recolección de datos, dadas las condiciones de distanciamiento social actual, por el Covid-19. Otra ventaja que ofrece la herramienta, es la diversidad del tipo de preguntas y respuestas que se pueden formular, la rotación de respuestas, el almacenamiento, tabulación y facilidad en la exportación de los datos para análisis estadísticos posteriores.

El cuestionario fue administrado vía correo electrónico haciendo uso de la base de datos de la Sociedad Santandereana de Ingenieros, que cuenta con 256 miembros, y del listado de 861 empresas constructoras constituidas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga, esto aplicado durante el periodo comprendido entre el 02 de marzo de 2021 y el 08 de mayo de 2021. De las 1,117 solicitudes enviadas, se obtuvo una respuesta de 60 cuestionarios diligenciados, representando aproximadamente el 5,4% de índice de respuesta, y cumpliendo así, con el tamaño de la muestra representativa diseñado.

3.3.2 Población y tamaño de la muestra

La población objetivo del presente estudio se definió tomando como base las empresas constructoras del área metropolitana de Bucaramanga, legalmente constituidas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga CCB, Colombia. De acuerdo a la CCB, estas empresas se clasifican en actividades económicas CIIU, como se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Empresas constituidas en la Cámara de Comercio de Bucaramanga CCB

CIIU	Tipo de construcción	Empresas	%
4111	Edificios residenciales	341	40
4112	Edificios no residenciales	60	7
4290	Obras civiles	460	53
	Total	861	100

La población objetivo de este estudio es el grupo de empresas constructoras constituidas en la CCB. La técnica de muestreo seleccionada fue el muestreo con población finita. El tamaño de la muestra representativa fue de 66 empresas constructoras, calculado en la ecuación (5). Los parámetros y los valores para el cálculo del resultado se muestran en la Tabla 4.

$$n = \frac{z^2 pq N}{(N-1)e^2 + z^2 pq} \quad (5)$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra

Z: Número distribución normal para un intervalo de confianza del 95%

p: proporción con la característica de interés

q: (1-p)

N: Tamaño del estrato

e: Error

Tabla 4. Parámetros y valores para la obtención del tamaño de la muestra

Parámetro	Valor
Confiabilidad	95%
N	861
Z	1,96
p	0,9
q	0,1
e	0,07
n	66

3.3.3 Caracterización de la muestra

El tamaño final de la muestra logrado a la fecha de corte para la presentación de este documento fue de sesenta (60) encuestas. La caracterización de los encuestados se realizó en dos pasos, primero, se caracterizan las empresas y, posteriormente, los encuestados, como se detalla a continuación.

- *Caracterización de las empresas encuestadas.* El 68% (41/60) de los encuestados manifestaron que la casa matriz de la empresa donde laboran se encuentra radicada en el área metropolitana de Bucaramanga (Figura 2.)

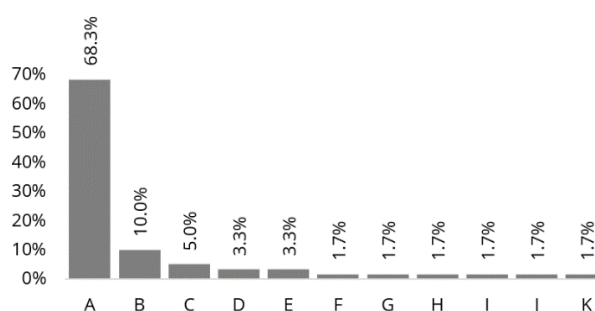


Figura 2. Ubicación de la empresa

- A. Área metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta, Girón)
- B. Bogotá
- C. Pamplona
- D. Barrancabermeja
- E. San Gil
- F. Cartagena
- G. En Bucaramanga y Bogotá.
- H. Internacional (fuera de Colombia)
- I. Mompo Bolívar
- J. Santa rosa del sur
- K. Yopal

Los resultados indican que cerca del 42% (25/60) de las empresas donde laboran los encuestados ejecutan proyectos de infraestructura (Figura 3).

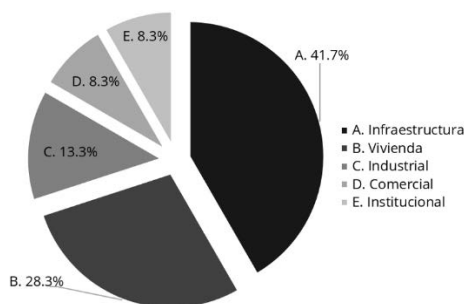


Figura 3. Subsector de la industria de la construcción

Adicionalmente, se encontró que cerca del 52% (31/60) de las empresas de los encuestados desarrollan principalmente proyectos de construcción nuevos (Figura 4).



Figura 4. Actividad de la empresa dentro de los proyectos

Cerca del 58% (35/60) de estas empresas contratan con entidades privadas y clientes particulares (Figura 5), y cerca del 28% (17/60) cuentan con más de veinte años de experiencia (Figura 6).

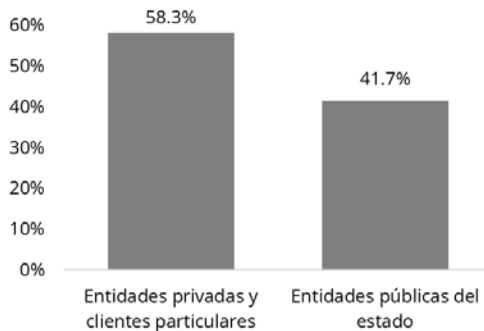


Figura 5. Tipo de entidades con quienes contrata la empresa

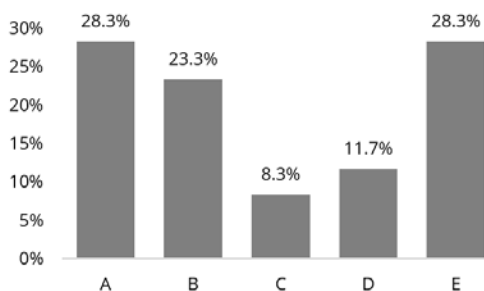


Figura 6. Años de antigüedad de la empresa

- A. De 1 a 5 años
- B. De 6 a 10 años
- C. De 11 a 15 años
- D. De 16 a 20 años
- E. Más de 20 años

- *Caracterización de los encuestados.* Con respecto a los encuestados se encontró que el 30% (18/60) tiene cargos directivos (Figura 7) y cerca del 38% (23/60) tienen más de 15 años de experiencia (Figura 8).

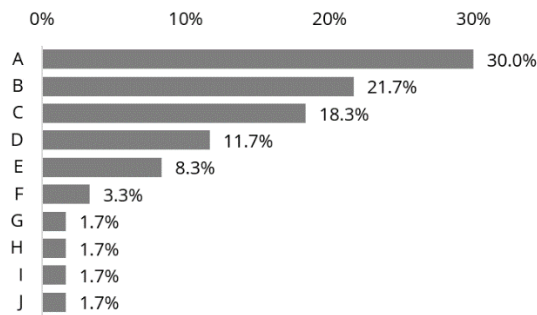


Figura 7. Cargo del encuestado en la empresa

- A. Directivo de la empresa
- B. Ingeniero o arquitecto residente de obra
- C. Director de obra
- D. Ingeniero o arquitecto de diseños
- E. Inspector de obra
- F. Auxiliar de ingeniería
- G. Gerente de proyecto
- H. Consultor del proyecto
- I. Coordinador SG-SST
- J. Profesional predial

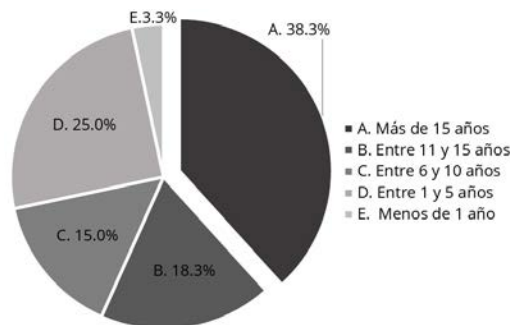


Figura 8. Años de experiencia del encuestado en la industria de la construcción

3.4 Fase IV. Análisis de datos

Los resultados tabulados y organizados sistemáticamente por la aplicación fueron exportados a una hoja de cálculo, para hacer la estadística descriptiva de las variables. Las variables manejadas en la encuesta son de tipo cualitativo, nominales y ordinales basados en escala Likert, cuyo análisis estadístico se realiza con base en análisis de frecuencias para identificar tendencias y patrones. Los resultados de esta investigación se detallan en la siguiente sección.

4. RESULTADOS

Se muestra las respuestas de los 60 profesionales encuestados, donde se recoge, en cierta medida, el estado actual del conocimiento y práctica sobre la productividad laboral en nuestro contexto regional. Primero, se mostrará el nivel de conocimiento sobre los marcos de referencia y herramientas de gestión, como también, sobre el conocimiento de métodos para determinar el número de integrantes que componen las cuadrillas de trabajo en un proceso constructivo.

4.1 Conocimientos de marcos de referencia de gestión

El nivel de conocimiento de los marcos de referencia, estándares y enfoques de gestión se muestra con los resultados de la pregunta: ¿qué marco de referencia, estándar de gestión de proyectos o enfoque se emplea

mayoritariamente en los proyectos de construcción de la empresa a la que pertenece? [Pregunta 14]. Los resultados indican que el 50% (30/60) de los encuestados no aplica de manera explícita un marco de referencia sobre gestión de proyectos en obra (Figura 9).

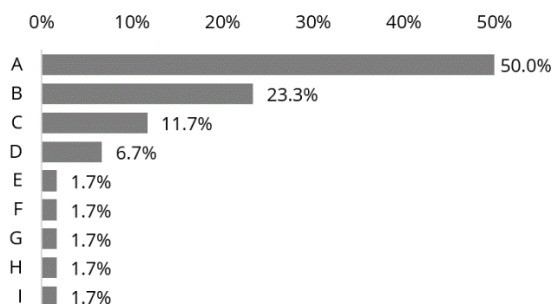


Figura 10. Marcos de referencia, estándares, enfoques

- A. Ninguno, solo con base en la experiencia acumulada de la empresa.
- B. PMBoK del PMI.
- C. ISO 21500.
- D. Lean Construction.
- E. La extensión de construcción del PMBoK del PMI.
- F. Indicadores creados y desarrollados dentro de la propia empresa.
- G. Manual de diseño del cliente.
- H. La ley de Pareto, 80% consumen el 20% del esfuerzo.
- I. Normatividad INVÍAS.

El nivel de conocimiento de los métodos empleados para el diseño de cuadrillas de trabajo se muestra con los resultados de la pregunta: ¿qué método emplea para determinar cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo para una actividad y el nivel de capacitación que estos deben tener? [Pregunta 19]. Los resultados indican que el 60% (36/60) de los encuestados manifiesta que hace asignación directa basada en experiencia de proyectos anteriores (Figura 11).

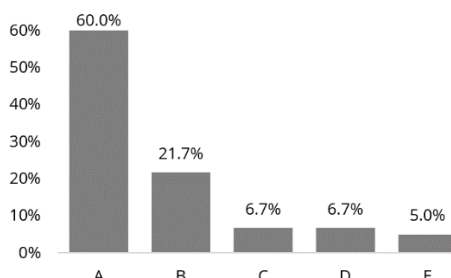


Figura 12. Métodos para determinar los integrantes y la capacitación de los integrantes de la cuadrilla de trabajo

- A. Método de asignación directa basado en la experiencia de proyectos anteriores.
- B. Método basado en rendimientos de mano de obra extraídos de bases de datos comerciales.
- C. Método apoyado en herramientas computacionales o de software.
- D. Ninguno
- E. Método de regla de tres, que relaciona las horas hombre y el requerimiento del proyecto.

4.2 Características particulares del manejo de las cuadrillas de trabajo en obra

Aunque el 60% (36/60) de los encuestados manifestó que la asignación de cuadrillas lo hace con base en la experiencia de proyectos anteriores, la encuesta permitió describir las particularidades del manejo de cuadrillas en obra.

Con base en la pregunta ¿quién determina el número de integrantes que debe tener una cuadrilla de trabajo y el nivel de capacitación que estos deben tener? [Pregunta 16], se pudo conocer quién es el responsable de definir la composición de las cuadrillas, al momento de realizar un proceso constructivo en obra. Aproximadamente el 23% de los encuestados indicó que lo hace el residente, y otro 23% indicó que es el mismo proceso o la cantidad de recursos lo que define la composición (Figura 13).

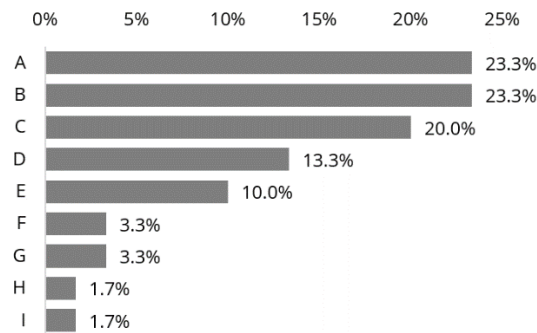


Figura 14. ¿Quién determina el número y la capacitación que deben tener los integrantes de la cuadrilla de trabajo?

- A. Lo determina el mismo proceso, la formaleta o la cantidad de recursos disponibles.
- B. Lo determina el ingeniero/arquitecto residente de obra.
- C. La determina el director de obra.
- D. La determina el maestro general de la obra.
- E. El subcontratista de la mano de obra
- F. La determina el oficial que lidera la cuadrilla con base en su experiencia.
- G. Lo determina el equipo del proyecto (Director - Residentes - Supervisores)
- H. El espacio, condiciones y el tipo de personal asociado al tiempo a ejecutar
- I. Lo determina el presupuesto con la referencia del encargado

También se pudo conocer cuándo se define la conformación de la cuadrilla, al momento de realizar un proceso constructivo en obra, con base en la pregunta: ¿cuándo se determina la cantidad de integrantes que deben conformar una cuadrilla de trabajo y cuál debe ser el nivel de capacitación que estos deben tener? [Pregunta 17]. Aproximadamente el 48% indicó que antes de iniciar el proyecto (Figura 15).

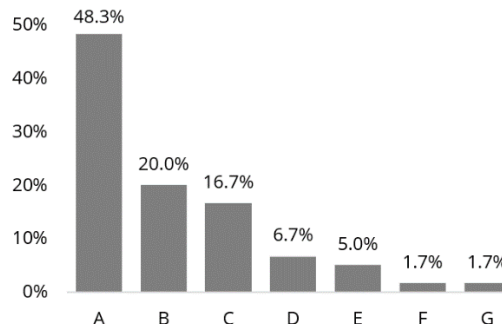


Figura 16. ¿Cuándo se determinan cuantos integrantes deben conformar las cuadrillas de trabajo?

- A. Antes de iniciar el proyecto
- B. Al inicio del proyecto
- C. Al inicio de la semana de trabajo
- D. Al inicio de cada catorcena de trabajo
- E. Al inicio de la jornada de trabajo
- F. Al inicio de cada etapa específica del proyecto.
- G. Depende del proyecto, inclusive del lugar de ejecución

Adicionalmente, la encuesta permitió indagar sobre el procedimiento para definir la cuadrilla, con base en la pregunta ¿cómo se determina cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo y el nivel de capacitación que estos deben tener? [Pregunta 18]. Los resultados indican que aproximadamente el 57% de los encuestados definen las cuadrillas con base en los requerimientos obtenidos en la fase de planificación del proyecto (Figura 13).

Finalmente, la encuesta permitió indagar sobre las herramientas empleadas para la definición de cuadrillas con base en la pregunta: ¿qué herramienta emplea para determinar cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo para una actividad y el nivel de capacitación que estos deben tener? [Pregunta 20]. Según las respuestas, se observó que aproximadamente el 43% de los encuestados no tienen una herramienta definida (Figura 17).

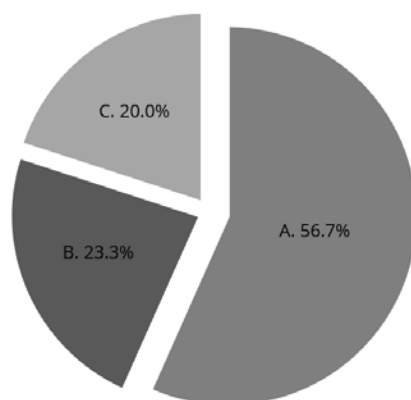


Figura 18. ¿Cómo se determinan los integrantes de la cuadrilla de trabajo?

- A. Con base en los requerimientos obtenidos en la fase de planificación del proyecto.
- B. Con base en la experiencia del maestro de obra y de otros proyectos.
- C. Teniendo en cuenta la cantidad de material y de equipos disponibles en el sitio de la obra.

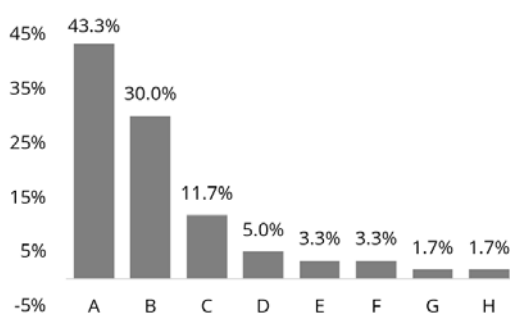


Figura 19. herramientas empleadas para determinar los integrantes que deben conformar una cuadrilla de trabajo y el nivel de capacitación que estos deben tener

- A. Ninguna
- B. Cartas de balance de cuadrillas de trabajo
- C. Programación de sistemas
- D. Ábacos de balanceo de cuadrillas
- E. Experiencia
- F. Algoritmos matemáticos
- G. Regresión lineal
- H. Cantidades de obra versus rendimientos y plazos

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis y discusión se ha dividido en tres secciones: la primera, trata lo referente al conocimiento y uso de marcos de referencia de gestión de proyectos, como apoyo conceptual al diseño de cuadrillas en nuestro contexto colombiano; la segunda sección, aborda los métodos y herramientas usadas para diseñar las cuadrillas de trabajo en procesos constructivos y, finalmente, se abordan aspectos operativos para el diseño de cuadrillas, basado en las respuestas a las preguntas orientadoras: quién, cuándo y cómo se diseñan las cuadrillas de trabajo en el contexto regional colombiano.

5.1 Conocimiento y uso de marcos de referencia de gestión.

Es importante resaltar que los participantes de este estudio representan los principales subsectores de la industria de la construcción a nivel regional (Figura 3), quienes manifestaron tener un buen nivel de experiencia (Figura 8). Teniendo en cuenta estos precedentes, esta investigación encuentra que hay un preocupante nivel de desconocimiento de marcos de referencia, estándares y/o enfoques de gestión de proyectos (Figura 9), ya que el 50% de los encuestados manifestaron no conocer o implementar algún marco de referencia o estándar, como el Project Management Body Of Knowledge PMBOK del Project Management Institute PMI [23], el estándar ISO-21500 [24]. Estos marcos de conocimientos de gestión son genéricos y no abordan el contexto específico de la construcción, como lo hace el Construction Extension to the PMBOK®

Guide [25]. Al desconocer los fundamentos de gestión en las obras de construcción, hay una alta probabilidad que los aspectos operativos, como el caso del diseño de cuadrillas, no se aborden con la fundamentación debida.

Sin embargo, el estudio encuentra que, aunque con un bajo nivel de conocimiento, el marco de gestión basado en *Lean Construction*, que es una filosofía de gestión enfocada al ámbito de las operaciones de construcción, comienza a ser tenida en cuenta en nuestro medio.

Los resultados encontrados evidencian el poco conocimiento, uso y desarrollo de los marcos de referencial conceptual para la gestión de operaciones y de cuadrillas de trabajo en el sector. La implementación de estándares, marcos de referencia, filosofías y enfoques de gestión de proyectos es fundamental para la estructuración y el crecimiento organizacional de la empresa, desde la gestión estratégica hasta el nivel operacional de los proyectos. Se requiere atención a los procesos internos de obra, de los procesos constructivos y su flujo de trabajo, la gestión de la información para la toma de decisiones y la mejora continua entre otros componentes, por lo cual, el desconocimiento, poco uso de los fundamentos y la no implementación de ellos se consideran como algunos de los factores que originan la baja productividad laboral que afronta la industria de la construcción, como lo manifiestan McKinsey [5], CAMACOL [6] y el DANE [26] actualmente.

5.2 Métodos y herramientas usadas para diseñar las cuadrillas de trabajo

De manera específica, al indagar sobre los métodos para el diseño de la cuadrilla de trabajo en proyectos de construcción, definir el número de integrantes y su nivel de capacitación, más de la mitad (60%) de los participantes respondieron que se basan en la experiencia de otros proyectos o comparando bases de datos comerciales (Figura 10). Adicionalmente, se encontró que el 43% de los encuestados no tienen una herramienta definida para determinar los integrantes de las cuadrillas. Sin embargo, hubo mención, en baja proporción, a métodos genéricos como el uso de algoritmos matemáticos y modelos de regresión lineal, como también a métodos específicos como cartas de balance (Figura 20).

Estos resultados reafirman que no hay un conocimiento explícito sobre los métodos de diseño de cuadrillas, y que, de cierta manera, el proceso no es tan formal, como se discutirá en la sección siguiente, de aspectos operativos (numeral 5.3). Se evidencia así, la ausencia de métodos para el diseño de las cuadrillas de trabajo por parte de las empresas constructoras regionales, ya que, si bien la mayoría no emplea métodos formales, no es por la ausencia de ellos, pues al realizar una revisión sistemática de literatura científica se encuentran varios métodos y metodologías de diseño de cuadrillas de trabajo en proyectos de construcción.

Esta investigación encontró que existen métodos de diseño de cuadrillas que han sido publicados, como el método gráfico con modelo matemático planteado por Gates y Scarpa [27]; la evaluación, metodología y método para el diseño de cuadrillas de trabajo planteados por Hassanein y Melin [15]; el método de balanceo de cuadrillas adaptado de la investigación de operaciones en entornos industriales a la construcción expuesto por Serpell [28]; el método de ábacos para el balanceo de cuadrillas de trabajo presentado por Navas [13]; y Nerwal [29] propuso unas pautas para el diseño de la cuadrilla de trabajo en procesos constructivos desde el enfoque *Lean Construction*, por nombrar algunos de los más relevantes.

Adicionalmente, se encuentra un gran número de modelos y herramientas para determinar los integrantes de la cuadrilla de trabajo desde el enfoque de la optimización, la programación de restricciones, algoritmos y el uso de simulación e inteligencia artificial como instrumentos de solución de sistemas con gran número de variables y datos [30-38], entre otros.

5.3 Aspectos operativos del diseño de cuadrillas

Dentro de los aspectos operativos, se pudo indagar sobre quién es el responsable del diseño de cuadrillas de las obras de construcción, el momento en el que se lleva a cabo el diseño de cuadrillas, y el cómo se diseñan dichas cuadrillas.

Sobre el responsable, este estudio encuentra que aproximadamente el 43% de los encuestados manifestaron que lo hace el director y/o residente de obra. Sin embargo, parece que no hay una clara definición de un responsable, quedando un poco a la deriva este proceso de diseño, ya que aproximadamente el 23% de los participantes consideran que lo determina *el mismo proceso, la formaleta o la cantidad de recursos disponibles* al momento de la ejecución de la obra (Figura 11).

También, se pudo conocer con base en el 68% de las respuestas al cuándo se diseñan las cuadrillas, que los momentos de definición de la conformación de las cuadrillas se hacen antes de iniciar el proyecto, o el momento de iniciar el proyecto, es decir, en el momento de iniciar la etapa de construcción (Figura 12).

Pero llama la atención en esta encuesta que hay un bajo porcentaje de encuestados que no conocen un marco de referencia de gestión de operaciones de obra apropiado para diseñar cuadrilla y hay estudios que muestran el poco uso de prácticas a nivel operativo en obra. Thomas y Ellis (2007) expresan que después de 30 años de monitoreo de proyectos de construcción, nunca han observado planes operativos detallados en el sitio de la obra [39], lo que puede dar fuerza a la hipótesis de la informalidad en los procesos de operaciones de obra, y que dichas conformaciones de cuadrillas se auto-gestionan al interior de las mismas, condicionados por la disponibilidad de recursos.

En lo referente a ¿cómo se determina cuántos integrantes deben conformar una cuadrilla de trabajo y el nivel de capacitación que estos deben tener?, es notorio que cerca del 57% de los encuestados manifiesten que se hace *con base en los requerimientos obtenidos en la fase de planificación del proyecto* (Figura 13). Esto indica que la mayoría de los participantes reconocen la importancia de la fase de planificación y su impacto en la culminación exitosa del proyecto, pero a la vez, plantea una situación cuando menos contradictoria respecto de los resultados de los responsables del diseño de las cuadrillas, la informalidad en los procesos y la ausencia de métodos mostrados en los resultados.

De otro lado, con base en la revisión de literatura realizada para esta investigación, se distinguen tres escenarios principales donde se pueden tener referencias apropiadas para mejorar los aspectos operativos del diseño de e cuadrillas de trabajo:

1. El primer escenario se desarrolla en dirección a los estudios de Hassanein y Melin [15], donde realizaron entrevistas a contratistas de la construcción para determinar las reglas y pautas que estos emplean en la conformación de las cuadrillas de trabajo de los proyectos de construcción en los que participan. Lo propio aportaron Flórez y Castro [40], donde plasman siete reglas que los contratistas de mampostería emplean en la conformación de las cuadrillas en sus entornos de trabajo. Estos estudios ofrecen guías y directrices para quienes deben determinar las cuadrillas de trabajo en el ámbito del contratista de obra, y que principalmente esta actividad se ejecute en la etapa constructiva del proyecto, en la ejecución de la obra.
2. Un segundo escenario, se plantea conforme a los estudios realizados por Laufer y Shohet [41], donde se evidencia que un número y tamaño elevados de las cuadrillas de trabajo, afectan su control por parte del supervisor, situando como responsable del control de las cuadrillas al personal del equipo del proyecto en la obra, ya sea el supervisor, residente y/o director de obra. Los resultados de este estudio muestran, que conforme a lo planteado por Laufer y Shohhet, es fundamental que esta determinación del tamaño de cuadrillas sea definida en obra para no afectar la productividad laboral, y debe hacerse un monitoreo y control permanente durante la fase de ejecución o construcción del proyecto.
3. El tercer y último escenario plantea que el diseño de cuadrillas se realiza en la fase de planificación del proyecto por los ingenieros programadores de obra y de costos, a manera de estimación; varios estudios se refieren al respecto como el de Economides [42], que habla del sistema de programación para construcción con asignación de recursos para servicios eléctricos; por su parte, Chalabi [43] propone un sistema para planificación y estimación del proyecto. Sin embargo, es claro que lo definido en la etapa de planificación es a nivel de estimación, y que en el día a día de la obra estas estimaciones pueden modificarse y alterar la composición inicial de las cuadrillas.

Es relevante mencionar que aunque el PMI [25] menciona la gestión de los recursos desde los grupos estratégicos de procesos de planificación, ejecución, control y cierre, lo hace de manera genérica, no directamente hacia las cuadrillas de trabajo ni a su diseño.

Por otra parte, bajo la filosofía *Lean construction* el diseño de métodos de trabajo se realiza primero durante la etapa de diseño, antes del inicio de las operaciones de construcción, y también posterior a la programación maestra, en la fase de construcción, mediante la programación del trabajo semanal durante la ejecución del proyecto de construcción, como lo exponen Howell y Koskella [44].

6. CONCLUSIONES

El análisis de resultados nos permite concluir que existen dos componentes que influyen en los problemas internos que afronta la industria de la construcción en las últimas décadas: de una parte, la informalidad en los procesos y operaciones de construcción, y de otra, la falta de herramientas para la gestión de los recursos al interior de las organizaciones y los proyectos.

En el primer sentido, después de evidenciar la no implementación de marcos de referencia, estándares, filosofías y enfoques de gestión de proyectos, se recomienda a las empresas constructoras regionales seleccionar y adoptar aquel o aquellos marcos que se acoplen más a su estructura y tamaño organizacional, a su actividad y al tipo de proyectos en ejecución de cara a adquirir competencias de gestión que incrementen la productividad y el crecimiento de la empresa desde la formalización organizacional y de los procesos internos en las diferentes fases de los proyectos.

Por otra parte, los resultados obtenidos muestran ausencia de métodos y herramientas para la conformación de cuadrillas de trabajo en procesos constructivos, así lo manifestó más de la mitad de los encuestados. Adicionalmente, los encuestados aseguran emplear la experiencia como principal criterio de toma de decisiones, seguido por la comparación con bases de datos nacionales de rendimientos y precios, algunos expresan no tener ningún método, evidenciando así, informalidad en las operaciones de construcción y ausencia de medición y almacenamiento de datos propios, para el posterior procesamiento y uso en la toma de decisiones cuantitativa, paramétrica y probabilística, representativa del contexto de la empresa y del proyecto.

Los bajos indicadores de productividad de la industria de la construcción en las últimas décadas, los factores externos e internos que la afectan negativamente, entre otras causas, hacen que los esfuerzos por optimizar los recursos y formalizar los procesos sean relevantes y de gran interés no solo para la academia, sino para la industria en sí misma, por esta razón, se recomienda realizar y ampliar los estudios de la gestión de operaciones de un recurso tan importante como la mano de obra y las cuadrillas de trabajo que ofrezcan incrementar la eficacia, eficiencia y competitividad del sector, para ello se llama a las universidades y a las empresas constructoras a sumar esfuerzos en la realización conjunta de dichos proyectos de investigación.

REFERENCIAS

- [1] ODHE, "El sector de la construcción y las infraestructuras," 2018. Recuperado: <http://www.odhe.cat/es/el-sector-de-la-construccion-y-las-infraestructuras/>
- [2] M. Gupta, A. Hasan, A. K. Jain, and K. N. Jha, "Impact of crew composition on productivity and unit labour cost in construction projects - A case study," *Proc. 22nd Int. Conf. Adv. Constr. Manag. Real Estate, CRIOCM 2017*, pp. 533-539, 2019.
- [3] T. G. Shree, R. Gopal, and K. Murali, "A Critical Review on Factors Influencing Labour Productivity in Construction," *IOSR J. Mech. Civ. Eng. Ver. IV*, vol. 12, no. 5, pp. 2278-1684, 2015.
- [4] R. M. Solow, "A Contribution to the Theory of Economic Growth Author (s): Robert M. Solow Source," *Quartely J. Econ.*, vol. 70, no. 1, pp. 65-94, 1956.
- [5] McKinsey Global Institute, "Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity," 2017.
- [6] Camacol, "Informe de Productividad, sector construcción de edificaciones," 2018. Recuperado: <https://camacol.co/sites/default/files/documentosinteres/INFORME PRODUCTIVIDAD VF.pdf>
- [7] W. Yi and A. P. C. Chan, "Critical review of labor productivity research in construction journals," *J. Manag. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 214-225, 2014.

- [8] J. Li, "Production structure, input substitution, and total factor productivity growth in the softwood lumber industries in U.S. and Canadian regions by Master of Science in Forestry," 2009.
- [9] C. T. Thomas, H. R., and Mathews, "An analysis of the methods for measuring construction productivity," Austin, 1986.
- [10] E. Hernández, "La productividad multifactorial," *Econ. Teoría y práctica*, vol. Nueva Época, no. 26, pp. 31–67, 2007.
- [11] S. P. Dozzi and S. M. AbouRizk, *Productivity in Construction*. 1993.
- [12] S. G. Cohen and D. E. Bailey, *What makes teams work: Group effectiveness research from the shop floor to the executive suite*, vol. 23, no. 3. 1997.
- [13] R. F. Navas, M. R. Ridl, and L. Torés, "Mano de obra en la construcción: determinación de la cuadrilla óptima por medio de una herramienta de simulación Workforce in construction: determination of the optimal team through a simulation tool," *Ingeniería*, vol. 16, no. 2, pp. 151–163, 2012.
- [14] G. Mejía Aguilar and T. Hernández C., "Seguimiento de la productividad en obra: técnicas de medición de rendimientos de mano de obra," *Rev. UIS Ing.*, vol. 6, no. 2, pp. 45–59, 2007.
- [15] A. Hassanein and J. Melin, "Crew Design Methodology for Construction Contractors," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 123, no. 3, pp. 203–207, 1997.
- [16] M. Stinson, "Learning Curves of Temporary Workers in Manual Order Picking Activities," pp. 9–14, 2014.
- [17] L. E. Yelle, "The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey," *Decis. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 302–328, 1979.
- [18] M. Fogliatto, F.; Anzanello, "Learning Curves: The State of the Art and Re-search Directions. In: Jaber, M., Ed., Learning curves," *CRC Press*, pp. 3–22, 2011.
- [19] J.-P. P. Panagiota Ralli, Antonios Panas and D. Karagiannakidis, "Comparative Evaluation of Learning Curve Models for Construction Productivity Analysis," in *The 10th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 2020, pp. 347–358.
- [20] J.W.Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, Third edit. LINCOLN: SAGE, 2009.
- [21] G. Olave-arias, Il. Rojas-García, and M. Cisneros-Estupiñán, *Cómo escribir la investigación académica Desde el proyecto hasta la defensa*, Primera ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2014.
- [22] C. Blanco, *Metodos de investigación cuantitativa en ciencias sociales y comunicación*, vol. 53, no. 9. 2011.
- [23] PMI, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*, Sixth edit. 2017.
- [24] ISO, "ISO 21500," *ISO*, 2012. Recuperado: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:21500:ed-1:v1:es>
- [25] PMI, *Construction Extension to the PMBOK® Guide*. Project Management Institute, Inc., 2016.
- [26] dane, "Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC)," Bogotá, 2021. Recuperado: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib_const/Bol_ieac_IVtrim20.pdf
- [27] Marvin Gates; and Amerigo Scarpa, "Optimum Number of Crews," *J. Constr. Div. ASCE*, vol. 104, no. 2, 1978.
- [28] A. Serpell B., "Administración de operaciones de construcción," *Alfaomega*, p. 296, 2002.
- [29] N. Nerwal, "Construction crew design: A lean approach," 2012.
- [30] J. E. Gomar, C. T. Haas, and D. P. Morton, "Assignment and allocation optimization of partially multiskilled workforce," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 128, no. 2, pp. 103–109, 2002.
- [31] T. Hegazy, A. Elhakeem, and E. Elbeltagi, "Distributed Scheduling Model for Infrastructure Networks," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 130, no. 2, pp. 160–167, 2004.
- [32] A. Al-Bazi and N. Dawood, "Developing Crew Allocation System for the Precast Industry Using Genetic Algorithms," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 25, no. 8, pp. 581–595, 2010.
- [33] L. Florez, "Crew Allocation System for the Masonry Industry," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 32, no. 10, pp. 874–889, 2017.
- [34] A. Ahmadian Fard Fini, T. H. Rashidi, A. Akbarnezhad, and S. Travis Waller, "Incorporating Multiskilling and Learning in the Optimization of Crew Composition," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 5, p. 04015106, 2016.
- [35] J. Liu and M. Lu, "Constraint Programming Approach to Optimizing Project Schedules under Material Logistics and Crew Availability Constraints," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 7, 2018.
- [36] B. Shahbazi *et al.*, "Incorporating Multiskilling and Learning in the Optimization of Crew Composition," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 145, no. 1, pp. 1–12, 2019.
- [37] M. Tomczak and P. Jaskowski, "Crashing Construction Project Schedules by Relocating Resources," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224522–224531, 2020.
- [38] H. Hyun, I. Yoon, H. S. Lee, M. Park, and J. Lee, "Multiobjective optimization for modular unit production lines focusing on crew allocation and production performance," *Autom. Constr.*, vol. 125, no. 2, p. 103581, 2021.
- [39] B. H. R. Thomas, W. F. Maloney, G. R. Smith, V. K. Handa, and S. R. Sanders, "Modeling construction labor productivity," vol. 116, no. 4, pp. 705–726, 1991.
- [40] L. Florez and D. Castro-Lacouture, "Labor management in masonry construction: A sustainable approach," *31st Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Mining, ISARC 2014 - Proc.*, no. Isarc, pp. 536–543, 2014.
- [41] B. A. Laufer and I. M. Shohet, "Span of control of construction foreman: situational analysis," vol. 117, no. 1, pp. 90–105, 1991.

- [42] S. C. Economides and W. C. Dueterhoeft, "Construction Scheduling System With Resource Allocation for Electric Utilities.," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. EM-24, no. 1, pp. 2-7, 1977.
- [43] F. Chalabi, R. Lai, and Thomas W. Staehr, "An Interactive Construction Control System for Project Planning and Estimating," 1980.
- [44] G. Howell and L. Koskela, "Reforming project management: the role of lean construction," *J. Manage.*, 2000, Recuperado: <http://usir.salford.ac.uk/9428/>

Hidrochars derivados de papa residual como subproducto del proceso de carbonización hidrotermal: Caracterización y aplicación en el tratamiento de aguas residuales de minería

Yeimy Fernanda Hernández Lasso¹

Juliana Maritza Zarate Jiménez²

Luis Fernando Lozano Gómez³

María Del Pilar Triviño Restrepo⁴

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

En este capítulo se presenta la síntesis y aplicación de hidrochar obtenido por carbonización hidrotermal HTC, un proceso que transforma un residuo orgánico con alta humedad en un producto sólido rico en carbono hidrochar HC. El hidrochar obtenido se evalúa como material adsorbente en el tratamiento de aguas ácidas mineras para remoción de metales pesados tóxicos como Cd, Fe, Pb y Hg. El estudio comprende caracterización de la biomasa residual de papa por análisis próximo usando las normas ASTM E872 y ASTM E1752, y contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina por normas TAPPI T 204 y TAPPI T 207. Luego, la obtención del hidrochar por HTC con muestra de biomasa (50g) por tratamiento. Además, se emplean como variables de estudio tiempos de residencia (3 a 9 horas) y temperatura (180 a 240°C), y parámetros de pH en un rango de 3 a 4 y presión autógena. Después la caracterización del hidrochar obtenido mediante análisis inmediatos (normas ASTM D2216, ASTM D3174 y ASTM D3175). Pruebas de porosidad mediante la metodología de adsorción se yodó según la norma ASTM 4607 y azul de metileno según la norma ASTM 3860. Finalmente, la caracterización de las muestras de agua ácida minera sin y con tratamiento con hidrochar (norma ASTM D3860.4133), representados con modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich. En la biomasa residual se observa una tendencia a la isoterma de Langmuir y para el hidrochar la isoterma de Freundlich; se obtuvo una eficiencia de remoción de metales máxima de 58.9% de Cd, 19.18% de Fe, 50% de Hg y 24.12% de Pb, por lo cual se considera viable para implementarlo a nivel industrial. Se demostró que la aplicación de hidrochar como material poroso es factible técnicamente, no solo para remoción de metales pesados, sino también para disminuir la concentración de cloruros, sulfatos, nitritos y nitratos, entre otros.

¹ Joven Investigadora del grupo de investigación de Carbones y Carboquímica.

Contacto: yeimy.hernandez02@uptc.edu.co

² Joven Investigadora del grupo de investigación de Carbones y Carboquímica.

Contacto: juliana.zarate@uptc.edu.co

³ Investigador del grupo de investigación de Carbones y Carboquímica.

Contacto: luis.lozano@uptc.edu.co

⁴ Investigadora del grupo de investigación de Carbones y Carboquímica.

Contacto: pilar.trivino@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La minería de carbón es uno de los grandes consumidores de recursos naturales, usados para transformarla en energía, en procesos industriales y no industriales, el principal problema radica en la forma como se desarrolla, debido a que los procesos de extracción y procesamiento, acarrear consecuencias relacionadas con deterioro ambiental, entre ellos la contaminación de corrientes de agua adyacentes a las minas [1–3]. Esta contaminación de afluentes hídricos cercanos a las minas, son atribuidas a las aguas ácidas de minería que se originan por la oxidación química y biológica de la pirita [4, 5]. Estas soluciones contienen además numerosos metales en disolución, como Cd, Fe, Hg y Pb, entre otros, que aportan una importante toxicidad al efluente [4]. Para evitar este daño medio ambiental se deben tomar medidas, en la implantación de nuevos métodos de tratamiento de estos efluentes ácidos [6–9]. Esta investigación tiene como propósito desarrollar nuevos materiales a partir de la papa residual mediante un proceso de carbonización hidrotermal HTC para obtener un hidrochar y evaluar su uso como un producto adsorbente de metales pesados para la recuperación de fuentes hídricas.

La presencia de metales pesados como Cd, Fe, Hg y Pb en afluentes acuíferos puede llegar a ser bastante tóxico y peligroso tanto para el ambiente como para cualquier ser vivo que tenga contacto; es esencial controlar y mitigar los procesos de tratamiento de drenajes ácidos mineros ofreciendo procesos innovadores, económicos y de rendimiento al usar técnicas de valoración residual, amigables con el medio ambiente y preservando la vida humana y animal alrededor de cualquier tipo de explotación minera [10, 11]; el objeto de esta investigación es evaluar la factibilidad técnica del uso de hidrochar como adsorbente de metales pesados en la manipulación fisicoquímica de materia residual de la papa en hidrochar.

Esta investigación tiene como propósito implementar el uso de nuevos materiales adsorbentes producto de biomasa residual en recuperación de fuentes hídricas. Los procesos actualmente usados para el tratamiento de drenajes ácidos mineros son anticuados, costosos e involucran intermediarios altamente tóxicos, por lo que se planea implementar procesos renovables que cumplan con los parámetros requeridos a nivel industrial, los cuales sean igual o mejores y brinden muchos más beneficios a los usados tradicionalmente. Los análisis fueron realizados en Laboratorios de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y las muestras de drenaje ácido minero fueron obtenidas en la mina el Nogal, vereda Chorrera del municipio de Samacá, Colombia.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Biomasa

La biomasa es la materia orgánica renovable de origen vegetal o animal incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial, la cual se utiliza como fuente energética [12]. Actualmente, la biomasa es aplicada es solo un 10% de la matriz energética mundial. A pesar de esto, la perspectiva de un aumento de la demanda de combustible, varios países ha incentivado el uso de energías renovables, así como el empleo comercial [13].

2.2 Características de biomasa residual.

La biomasa de origen residual, suele ser comúnmente usada en la preparación de carbones activados, ya que el costo de preparación es bastante bajo, al ser residuos agroindustriales con nulo o poco valor [12]. La biomasa residual suele caracterizarse por tener en su estructura química como componente principal la celulosa y hemicelulosa formando ambas la Holo celulosa [14].

2.3 Procesos de adsorción

Entre los procesos naturales responsables de la eliminación de contaminantes que tienen lugar en el humedal se incluyen: adsorción e intercambio iónico, bioacumulación, oxidación bacteriana y abiótica, sedimentación, neutralización, reducción de sulfatos, etc. [15]. La adsorción se convierte en una opción para la remediación de aguas contaminadas por metales pesados, debido a su sencillez, bajo costo, fácil [9]. La

adsorción, suele complementarse con el uso de isotermas de adsorción; a continuación, se describe dos de los modelos más usados para la determinación del comportamiento de adsorción.

2.3.1 Carbonización hidrotermal HTC

Es un proceso termoquímico mediante el cual se puede convertir un residuo orgánico con alta humedad en un producto sólido rico en carbono (hidrochar (HC)) con un poder calorífico mayor que el del hidrochar producido a partir de carbonización convencional a temperaturas similares [9, 16–18]. A continuación, se aprecia en la Figura 1, las temperaturas y presiones más indicadas para procesos de carbonización reportado por [17] (obtención principal de hidrocarbón) y licuefacción).

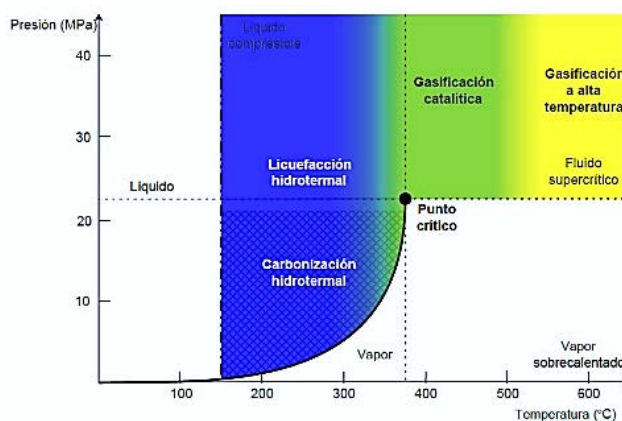


Figura 1. Estudio de carbonización y licuefacción hidrotermal [17]

En lo referente a la carbonización hidrotermal, este proceso térmico se realiza a temperaturas relativamente bajas de 180-375°C y presión hasta 23 Mpa. El producto de HTC se puede separar en una fracción sólida y otra líquida. La fracción sólida contiene una mayor proporción de C y menor de O que la biomasa de partida, como consecuencia de las reacciones de deshidratación y descarboxilación que tienen lugar, y un bajo contenido en cenizas derivado de la liberación de los componentes inorgánicos a la fase líquida durante el proceso [16].

El Producto sólido obtenido del HTC, más conocido como *hidrochar*, generalmente puede utilizarse en las más variadas aplicaciones, un ejemplo de ello, se da en la agricultura [19].

2.3.2 Hidrochar

El hidrochar es el resultado de la carbonización hidrotérmica HTC o licuefacción. Es distinto del biochar debido a su proceso de producción ya sus propiedades, y típicamente tiene mayores relaciones H/C y menor aromaticidad que el biochar, así como escasas o ninguna estructura de anillo aromático fundido [20]. Un hidrochar suele tener un PCI (poder calorífico) bastante alto y baja humedad, alto rendimiento en la combustión y sin cuotas de emisiones de CO₂. Este producto presenta la ventaja de ser fácilmente recuperable, pudiéndose separar de la fase líquida mediante filtración, centrifugación o prensado, entre otros métodos y recibiendo posteriormente un tratamiento para su pelletizado [21]. La adsorción es una de las aplicaciones principales de los carbones activos. Al contrario que los carbones activos, los carbones de HTC tratados a 180°C no presentan microporosidad, pero sin embargo presentan un gran número de grupos oxigenados localizados en la superficie, favoreciendo la adsorción [22].

2.4 Propiedades químicas del proceso HTC:

Para la síntesis y caracterización del hidrochar es necesario tener en cuenta las reacciones que interfieren en el proceso a partir del hidrolisis, deshidratación, descarboxilación y polimerización. Como se dijo anteriormente los principales componentes de la biomasa que se usan para la síntesis del hidrochar, son la celulosa [23–25] (Figura 2 y Figura 4), hemicelulosa (Figura 3). A continuación, se presentan las reacciones químicas reportadas como mecanismo de hidrochar por procesos hidrotermales HTC.

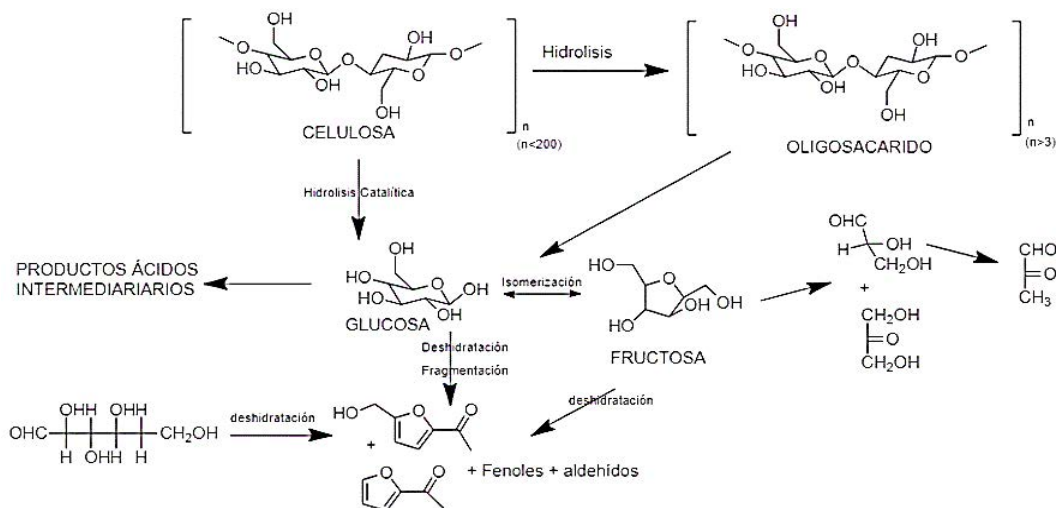


Figura 2. Reacciones de hidrólisis de celulosa. Síntesis de hidrochar a partir de celulosa, fase I [23–25]

A partir de la síntesis de hidroximetilfurfural, furfural y otros químicos plataforma, se deriva una polimerización y posterior condensación en partes, las cuales conllevan a la síntesis de un material carbonoso [23], en este caso *el hidrochar*, este mecanismo se puede observar en la Figura 3.

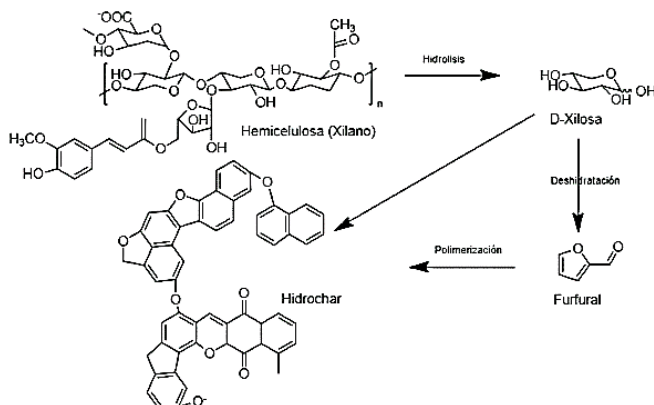


Figura 3. Hidrólisis y deshidratación de la hemicelulosa para la obtención de furfural [23]

En cuanto a las reacciones que intervienen en la síntesis de hidrochar a partir de la hemicelulosa, se podría resumir que este contribuye a la obtención del furfural y posteriormente se polimeriza a un hidrochar [23, 25, 26], estas reacciones se observan en las Figuras 3 y 4.

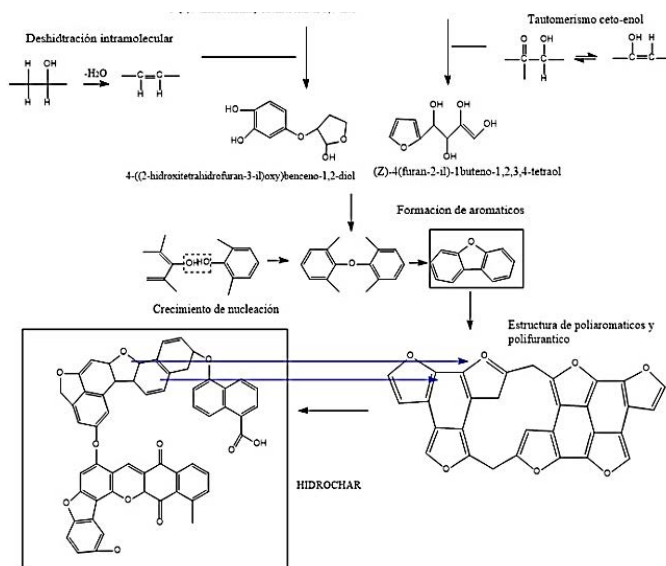


Figura 4. Condensación y polimerización de hidrometilfurfural y furfural; síntesis de hidrochar a partir de celulosa, fase II [23, 25, 26]

3. MÉTODO

Para el diseño de metodología se enfatizó en el desarrollo de la caracterización de biomasa residual, hidrochar y agua ácida de drenajes mineros, a partir de los parámetros cambiantes durante el proceso. Se estableció la siguiente metodología, con sus respectivas normativas para el desarrollo de cada proceso.

3.1 Etapa I Caracterización de la biomasa residual

En primer lugar, se hizo un estudio preliminar en el cual, se obtuvo información de las variedades de papa más cultivadas en el departamento de Boyacá y se estableció la proporción biomásica descartable. En la caracterización de la biomasa se establece las propiedades fisicoquímicas que infieren en el tipo de hidrochar obtenido. Al material seleccionado, se hizo un pretratamiento en el cual los residuos lignocelulósicos de papa, fueron lavados con abundante agua, con ayuda de un cepillo se retiró toda la suciedad adherida. Posteriormente se cortaron trozos, lo más delgado posible y fueron secados a 103°C durante 12 horas. Luego la biomasa preparada se redujo de tamaño en un molino centrífugo y fue tamizada para una selección de los tamaños de estudio (< 400 mm) [22], [24], [27], por último, se empaca y rotula en bolsa ziploc. La caracterización incluye análisis inmediato (contenido de humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo), contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como análisis de adsorción de azul de metileno y prueba de yodometría; las pruebas de adsorción fueron comparadas en modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich.

3.2 Etapa II. Síntesis y caracterización del hidrochar

En primer lugar, se montó un sistema de síntesis por CHT (Carbonización hidrotermal), en donde se varía el tiempo de reacción de 3 horas a 9 horas, con una temperatura de contacto de 180°C a 220°C y manteniendo una presión autogenerada constante entre 1 a 3 Mpa. Para la caracterización de hidrochar se tomaron 12 muestras con su respectivo duplicado de síntesis, se hizo pretratamiento en el cual, el hidrochar obtenido del reactor fue filtrado y posteriormente lavado con abundante agua destilada, luego se hizo un pre secado a 103°C durante 4 horas. Posteriormente se redujo de tamaño en un molino centrífugo, la muestra fue tamizada para una selección de los tamaños de estudio (< 400 mm) [22], [24], [27], luego se empacó y rotuló en bolsas ziploc. Después se procedió a efectuar el análisis inmediato (contenido de humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo). La capacidad se evaluó a partir de métodos adsorción de yodo y adsorción de azul de metileno según lo establecido en la norma ASTM.

3.3 Etapa III. Caracterización de aguas ácidas

El muestreo de agua ácida se obtuvo en la mina, *El Nogal* de Samacá; la caracterización se hizo según lo indicado para agua ácida de desecho por procesos mineros sin tratamiento; el muestreo fue simple. El estudio de aguas ácidas se caracterizó utilizando los principales parámetros de la resolución 631 de 2015 [28], para caracterización de aguas de minería, incluyendo: color triestimar, pH, alcalinidad total, acidez total, dureza cálcica, dureza total, DQO, DBO5, cloruros, fosfatos, ortofosfatos, sulfatos, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, sólidos suspendidos totales y sedimentales, grasas y aceites e hidrocarburos. Los metales pesados se determinarán por absorción atómica e hidrólisis ácida según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [29]. La caracterización de aguas ácidas se evaluó antes y después del tratamiento con el hidrochar; la capacidad de adsorción se representa por modelos de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

3.4 Etapa IV implementación del hidrochar como adsorbente de metales pesados

En esta fase se escoge el hidrochar con mejor capacidad de adsorción y se toma muestra y contramuestra de síntesis; a estas muestras se les determina la capacidad de adsorción de cadmio, hierro, mercurio y plomo, usando el equipo ICP-OES 4500, según lo reportado por IDEAM [27, 30]. Para la determinación de metales, primero se somete a una digestión ácida para una lectura directa con espectrometría de emisión atómica, una estandarización y posterior curva de calibración para Cd, Fe, Hg y Pb; cada estándar debe tener como mínimo tres puntos de concentración de cada uno de los elementos a determinar, por lo general, la

muestra debe mantener un pH de 2 a 7; para la preservación de la muestra hasta por 6 meses, se debe acidificar hasta un pH de 2 y mantener la temperatura menor a 6°C, sin embargo, es importante que la muestra se debe encontrar a temperatura ambiente [31]. Por último, se pasará la muestra previamente filtrada por la espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente, el cual se usa para la determinación de trazas de elementos en matrices previamente estandarizadas.

Cabe resaltar que para el desarrollo del análisis cuantitativo se deben usar bases a partir del uso de concentraciones de los metales conocidas para evaluar su comportamiento plasmado en curvas de calibración [29–31], la metodología a utilizar será por superficie de contacto, teniendo en cuenta la norma ASTM D3860 [33] específicamente se tomará varios erlenmeyer en los cuales se adicionará la misma cantidad de agua ácida (100 ml), luego se adicionará el hidrochar en distintas proporciones, para este caso, será de 0.2g, 0.5g, 1.0g y 2.0g de hidrochar, se agita constantemente por 2 horas, según lo establecido por la norma ASTM D3860 [33]; por lo anterior las variables a tener en cuenta, serán la concentración de hidrochar en porcentaje de remoción del metal [9].

Todos los reactivos químicos a lo largo de los experimentos estaban disponibles comercialmente con grado analítico y se utilizaron sin mayor purificación. Toda el agua utilizada en este trabajo fue agua desionizada.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Etapa I: Caracterización de materia prima (residuos de papa del departamento de Boyacá)

Lo primero que se debe tener en cuenta en la caracterización de la biomasa es su composición química, para lo cual, es imprescindible tener en cuenta los componentes básicos, tales como: grupos funcionales, cadenas carbonadas, interacción de enlaces, entre otros. En primera instancia, se debe limitar el área de estudio, específicamente para este caso se toma como materia biomásica la papa residual, sin embargo, existen múltiples variedades y esto, puede hacer que cambie su composición; debido a esto hizo una revisión exhaustiva, con objeto de determinar las características composicionales de la biomasa, seguidamente se realizó un diseño experimental con análisis inmediato y pruebas de adsorción.

4.2 Estudio de principales variedades de papa en el departamento de Boyacá

En primer lugar, se consulta en los entes de control municipales agropecuarios, tales como FEDEPAPA (Federación Colombiana de Productores de Papa), datos agropecuarios del DANE, min agricultura, ICA, entre otros [34–37], también se tuvieron en cuenta, encuestas en los municipios productores como: Ventaquemada, Tunja, Siachoque, Soracá, Samacá, entre otros. Los datos recolectados en la investigación demostraron que las variedades de papa más cultivadas en el departamento de Boyacá son: Pastusa Parda, Pastusa Superior, Tocarreña, Ica Huila, Betina y Rubí.

4.3 Estudio de biomasa residual específica de papa en el departamento de Boyacá

La biomasa residual de papa es la materia orgánica de papa descartada, en otras palabras, de poco valor económico, la cual no se considera como alimento propiamente. En algunos casos los agricultores desechan la papa que no es comerciable o en el mejor de los casos se usa para alimentar el ganado, generalmente los motivos de descarte de esta materia orgánica acogen los siguientes factores: cortes mecánicos (cóngolo), presencia de plaga (gusanos, polilla, entre otros), tamaños pequeños (riche), hongos y/o en estado de descomposición.

4.4 Caracterización de biomasa por análisis inmediato

Habiendo establecido una población de material biomásico específico de papa residual en variedades como: Pastusa Parda, Pastusa Superior, Tocarreña, Ica Huila, Betina y Rubí, se establece una caracterización físicoquímica, en el cual, lo primero a tener en cuenta es el porcentaje de humedad, cenizas, materia volátil

y carbono fijo, ya que de estos resultados depende las características a obtener en el hidrochar (Figura 5). Tal y como se especificó en metodología, se usaron las normas ASTM específicas para biomasa.

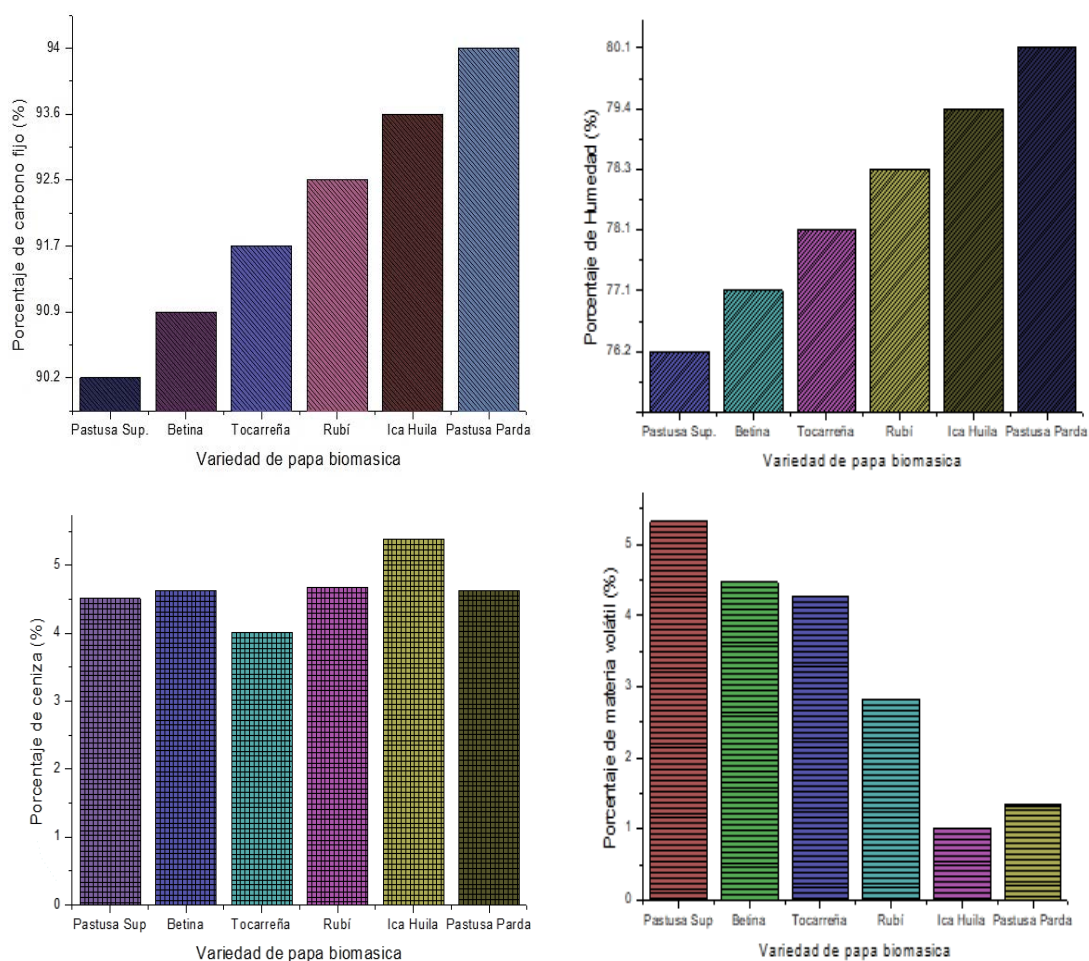


Figura 5. Análisis inmediato de materia prima biomásica: a) Porcentaje de Carbono Fijo, b) Porcentaje de Humedad, c) Porcentaje de Ceniza y d) Porcentaje de materia volátil por variedad de papa biomásica

A partir de los resultados de análisis inmediato, anteriormente presentados, las variaciones obtenidas en el porcentaje de humedad en las diferentes variedades, no varía de manera significativamente, por lo cual se llega a la conclusión de que este valor en todas las variedades de papa, se encuentra entre los rangos reportados por la bibliografía, es decir entre el 75% al 80 % de humedad, con un promedio de 78,2 % en el total de las muestras; a partir de esta afirmación se debe tomar en consideración el porcentaje aproximado de la humedad, en base a la relación materia húmeda (agua) - materia seca de biomasa que se utilizará posteriormente en el rendimiento de la obtención de hidrochar.

Al observar los datos de cenizas en cada una de las variedades, hay gran similitud en los rangos, en donde, la variedad Tocarreja fue en la que se obtuvo un valor de cenizas más bajo en comparación con las demás y la ICA Huila presentó el porcentaje más alto, aunque ninguno de estos valores sobrepasa el 6%, por lo que es viable para el proceso hidrotermal, independientemente de la variedad que se use en el proceso. Por último, se considera que los componentes esenciales de la biomasa se encuentran en proporciones similares en las distintas variedades más cultivadas en el departamento de Boyacá, por lo que en el proceso de síntesis del hidrochar, se utilizará una mezcla de variedades o bien cualquiera de ellas, ya que presentan propiedades semejantes.

4.5 Caracterización de biomasa por análisis composicional en la determinación de celulosa, hemicelulosa y lignina

En general la composición de la materia prima influye directamente en las características de la obtención de un hidrochar, en este caso se espera que la muestra de mezcla de biomasa residual pre-tratada tenga

un contenido alto de celulosa y hemicelulosa. El resultado obtenido para lignina fue de 2.496%, para hemicelulosa de 2.994% y de celulosa de 3.946 %. Esto permite concluir que el material biomásico, al tener como componente esencial el almidón, posee una capacidad carbonosa bastante alta.

4.6 Caracterización de adsorción en biomasa (pruebas de azul de metileno y yodometría)

4.6.1 Prueba de adsorción de azul de metileno

Antes de la determinación de adsorción de azul de metileno en la muestra de biomasa compuesta con las distintas variedades de papa, es necesario una preparación de muestra, la cual pasa por un proceso de pre secado (eliminación de humedad superficial), molienda (usando molino centrífugo) y tamizado (cuyo tamaño de partícula sea igual o menor a 400 μm), con motivo de garantizar la homogeneidad de la muestra en el proceso. Después del pretratamiento de la muestra de mezcla de variedades de biomasa residual, se obtuvo una curva de calibración, cuya solución patrón fue de 500 ppm, luego se procedió a hacer la determinación de adsorción de metileno, el tiempo de contacto fue de 2 horas, se usó 1.0 gramo de muestra en 100 ml de volumen de concentración de azul de metileno; para explicar el comportamiento de adsorción se usaron dos modelos de isoterma: Freundlich y Lagmiur. Los resultados se pueden observar en la Figura 6, en cada caso.

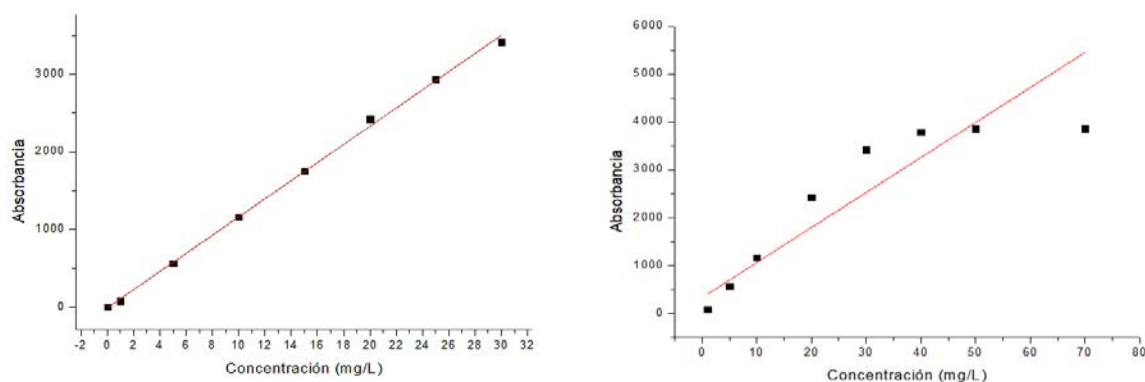


Figura 6. Grafica de isoterma de a) Langmuir por adsorción de azul de metileno en materia prima biomásica; b) adsorción de Freundlich para azul de metileno en muestra de biomasa

En la prueba de azul de metileno se obtuvo una regresión lineal un poco baja (R^2 de 0,9040), demostrando que el ajuste isoterma de Freundlich no se superpone adecuadamente a los datos experimentales, sin embargo la tendencia sí es bastante similar; en cuanto al modelo de la isoterma de Langmuir coincidió mejor con los resultados experimentales (R^2 de 0,9985) en el material de biomasa de la mezcla de variedades, por lo cual se concluye que la muestra contiene la mayoría de sus sitios activos ocupados, es decir, se encuentra al límite de sorción. Para estos resultados, el límite de capacidad de sorción es de 1,156 para el modelo de Langmuir y de 1,496 para el modelo de Freundlich.

Durante el desarrollo de esta práctica se evidenció un cambio de coloración instantánea, desde el momento en el cual se adiciona la biomasa a cada solución de azul de metileno, este comportamiento probablemente se debió principalmente por la coloración inicial de la biomasa tratada (naranja), cuyos componentes en la biomasa causaron un corrimiento de banda de absorción, tomando una coloración verde, otra explicación podría ser por la degradación del color en el tiempo.

4.6.2 Prueba de índice de yodo en mezcla biomásica

Antes de la determinación del índice de adsorción de yodo en la muestra de biomasa compuesta con las distintas variedades de papa, se hace una preparación de muestra, el tratamiento consiste en un secado, molienda y tamizado, con motivo de garantizar la homogeneidad de la muestra en el proceso. Para el proceso en la determinación de adsorción de yodo por titulación. En este caso el promedio de adsorción para yodo es de 1076 mg/g, se indica también que para esta prueba no fue necesario adicionar el indicador de almidón, debido a que la biomasa en general contenía gran cantidad de almidón cuyas propiedades

colorimétricas ya estaban añadidas por la activación de carbones. De estos resultados podemos concluir que, al usar solamente el pre tratamiento de la materia de biomásica, ya obtenemos buenos resultados en lo referente a su capacidad de adsorción en general, por lo que se puede decir las propiedades del material se prestan específicamente para este tipo de aplicaciones

4.7 Etapa II: síntesis de hidrochar y caracterización del hidrochar

4.7.1 Síntesis del hidrochar

Para la obtención del hidrochar se usó un reactor par de capacidad máxima 300 ml; se usó para cada obtención 50gr de biomasa residual (papa rayada con cáscara) y 150ml de agua destilada; esta proporción se obtiene experimentalmente, tras un diseño experimental implementado.

4.7.2 Caracterización de hidrochar

- *Porcentaje de rendimiento de la obtención de hidrochar.* Al evaluar el porcentaje de rendimiento del proceso, el cual se desarrolló dentro del diseño experimental, teniendo en cuenta que los resultados se sacaron a partir de la base seca; los datos experimentales se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de rendimiento de síntesis de hidrochar

Tiempo (h)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
3	34,94945	36,38165	35,326
5	68,61545	31,47266	43,1941
7	41,51885	37,2736	47,0363
9	41,6348	38,5498	39,3344

A partir de los rendimientos de la tabla anterior, se deduce que la mejor obtención se da a una temperatura de 180°C y un tiempo de reacción de 5 horas, sin embargo, también se evidencia que el rendimiento más bajo se da a una temperatura de 200°C y 5 horas de reacción, junto con los hidrochar obtenidos en un tiempo de 3 horas. Esta información se puede visualizar en la Figura 7.

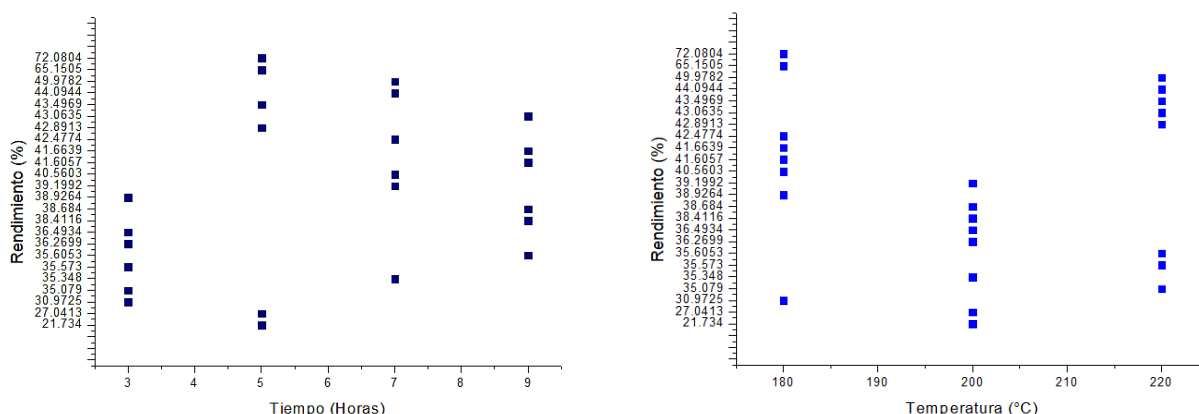


Figura 7. Gráficas del porcentaje de rendimiento en función de: a) Tiempo de reacción y b) Temperatura

De manera general, el porcentaje de rendimiento varía desde 27% a 72% y su reproducibilidad, no siempre es constante, esto se puede deber al cambio de presión, ya que este es autógeno y no se puede controlar directamente; la toma de peso del hidrochar se realizó después de una filtración, lavado y un secado. En las gráficas mostradas anteriormente se muestra de manera general que la temperatura con mayor rendimiento es la de 180°C, sin embargo, es la que menos tiene reproducibilidad, la más estable es de 200°C, aunque reporta bajos porcentajes de rendimiento, en cuanto a la aplicación de temperatura de 220°C los resultados tienen poca reproducibilidad, pero se encuentran datos relevantes de 5 a 9 horas; el tiempo de reacción se mejora en las 5 horas, en este caso influye mucho la diferencia de presión, por lo que los resultados no son repetitivos, el porcentaje de rendimiento de la obtención de hidrochar.

- Caracterización por análisis inmediato de hidrochar.** A partir de los datos obtenidos, se llegó a la conclusión de que todos los hidrochar sintetizados son óptimos, debido a que la concentración de cenizas no sobrepasa el 10%, el porcentaje de materia volátil es relativamente bajo, al igual que en el caso de la humedad. En la mayoría de los casos el porcentaje de carbono fijo es mayor al 90%, por lo que probablemente el hidrochar pueda ser aplicado como hidrochar térmico. Estas afirmaciones se pueden validar, visualizando la Figura 8.

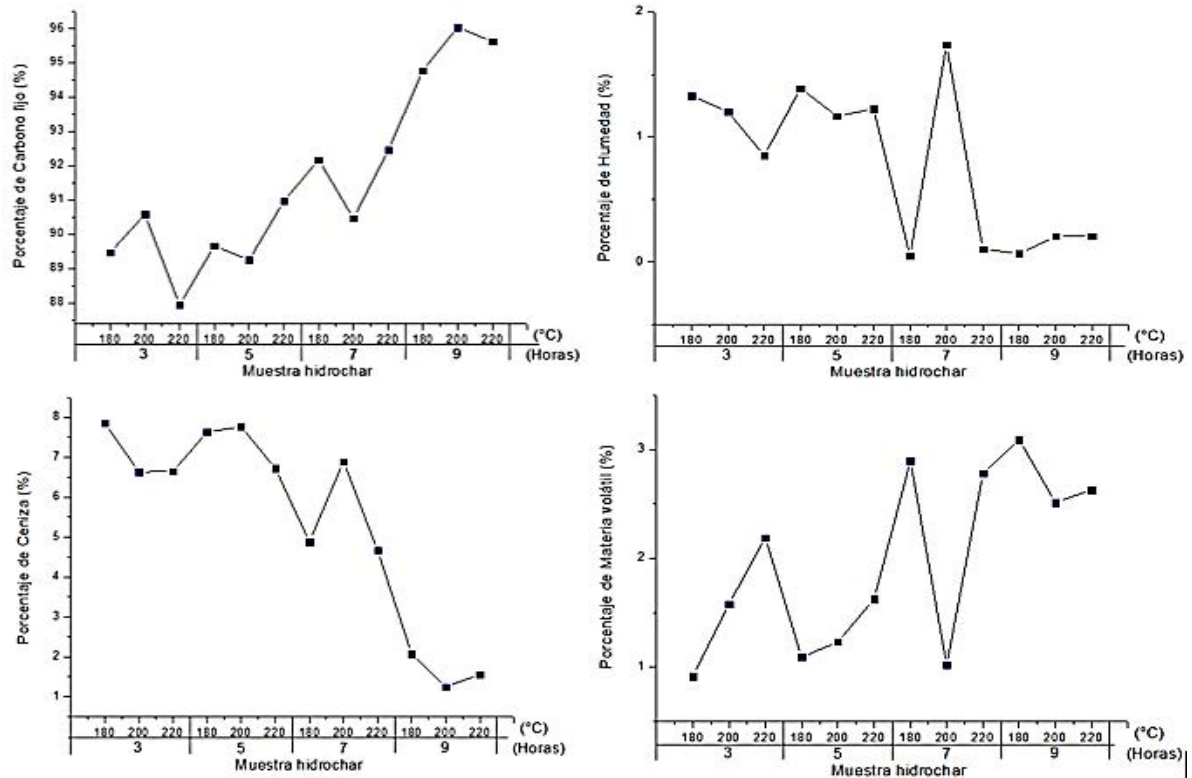
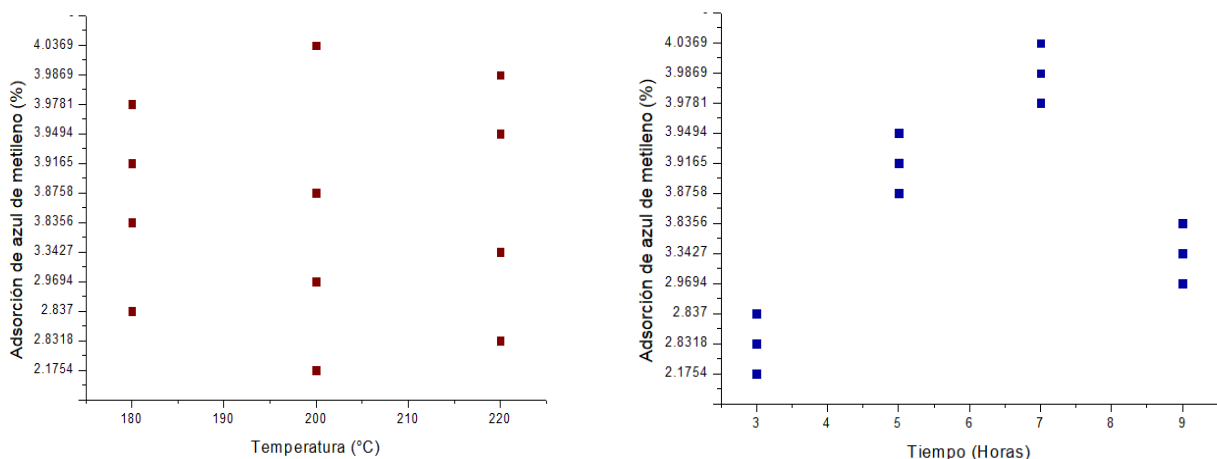


Figura 8. Diagrama análisis inmediato de hidrochars: a) Porcentaje de Carbono Fijo, b) Porcentaje de Humedad, c) Porcentaje de Ceniza y d) Porcentaje de materia volátil por tipo de hidrochar sintetizado

Los datos reportados en reflejados en la gráfica anterior muestran que el proceso es técnicamente viable a una aplicación industrial, puesto que la calidad del material es comparable con un carbón mineral.

- Caracterización de adsorción en hidrochar (pruebas de azul de metileno y yodometría).** Debido a la cantidad numerosa de muestras en este caso se hizo un balance de diferencia de concentración con un solo patrón estándar cuya concentración es de 10 ppm de azul de metileno para cada hidrochar, posteriormente se determinó la adsorción de azul de metileno, según lo indicado en la norma ASTM D3860. Los resultados de adsorción de azul de metileno y de yodo obtenidos a partir de la caracterización de hidrochars, se plasmaron en la Figura 9.



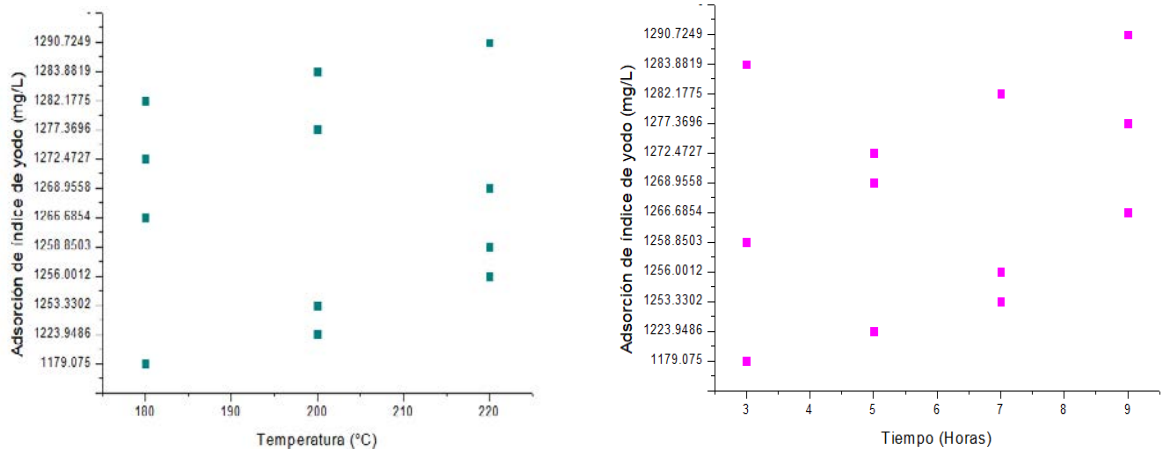


Figura 9. Gráficas de adsorción: a) de azul de metileno en hidrochar, según temperatura; b) de azul de metileno en hidrochar, según tiempo de reacción; c) de índice de yodo en hidrochar, según temperatura y d) de índice de yodo en hidrochar, según tiempo de reacción

Con fin de obtener una visualización más detallada en la Figura 10, se muestra los tratamientos estadísticos; los cuales tienen un comportamiento predecible para azul de metileno, en donde los puntos de mayor adsorción se encontraban en tiempos de reacción de 5 y 7 horas (Figura 9). Mientras que, en la adsorción por índice de yodo, muestra más variabilidad, aunque sus mejores adsorciones se muestran a las 9 horas de reacción y 220°C (Figura 9).

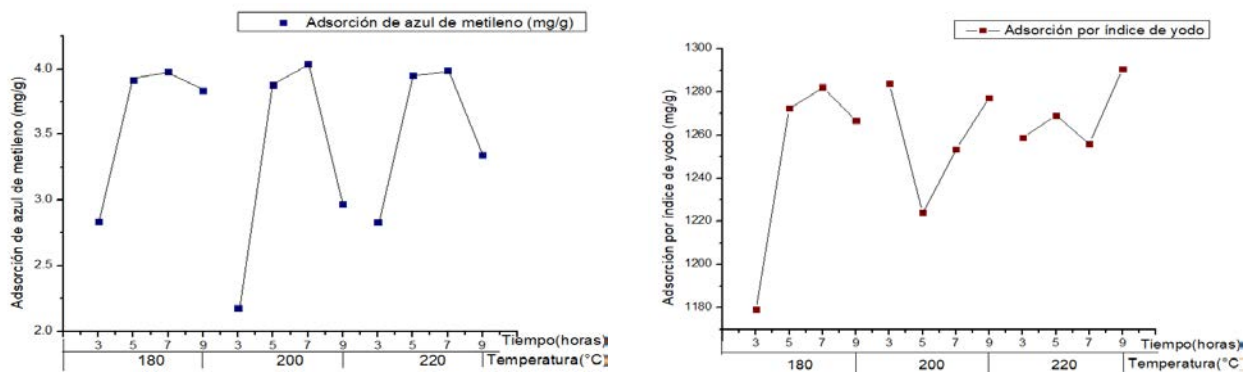


Figura 10. Comparación de resultados de: a) adsorción de azul de metileno en hidrochars; b) adsorción por índice de yodo en hidrochars

Naturalmente se evidencia la gran variabilidad de los resultados obtenidos, debido al valor de coeficiente de Pearson tan bajo, sin embargo, el rango de los resultados se encuentra bastante cerca en ambos casos, a excepción por supuesto de algún dato atípico.

A nivel general, las muestras que demuestran la máxima adsorción y mejor rendimiento son las que se encuentran en una temperatura de 200°C – 220°C; con un tiempo de reacción variable de 5h – 7h, para azul de metileno, aunque para la adsorción de índice de yodo se mantiene el rango de temperatura para la máxima adsorción, el tiempo de reacción es más alto en 9h -7h - 5h, respectivamente.

El tratamiento estadístico de los datos de escogió el hidrochar de 220°C de 5 horas de reacción para estudio de la siguiente fase en tratamiento de agua residual minera, para evaluar la remoción de metales de Cd, Fe, Hg y Pb.

4.8 Etapa III y IV: caracterización del agua ácida de la mina de Samacá y Tratamiento con hidrochar

En la caracterización del agua ácida minera, se tuvo en cuenta las normativas vigentes exigidas en Colombia para análisis de aguas residuales industriales mineras. A continuación, se muestran los datos reportados para la caracterización del agua ácida minera, antes y después del tratamiento de absorción con hidrochar, apreciados en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del agua ácida minera, antes y después del tratamiento con hidrochar sintetizado (5h-220°C)

Ítem	Método de Análisis	Resultados	
		Muestra de agua ácida minera	Muestra de agua ácida tratada con hidrochar
COLOR REAL TRIESTIMULAR	ISO 7887 método B medición a 3 longitudes de onda		
	436 nm	12,5	12,2
	525 nm	10,7	8,21
	620 nm	9,53	4,92
	adaptado SM 2120 D Multilongitudinal	(m-1)	(m-1)
PH	SM 4500-H+B electrométrico	3,24	3,22
ALCALINIDAD TOTAL	SM 2320 B Titulación	Cero mg/L OH-	Cero mg/L OH-
ACIDEZ TOTAL	SM 2310 B Titulación	1225 mg/L H+	1100 mg/L H+
ORTOFOSFATOS	SM 4500 P- E con ácido ascórbico	< 0,009 mg/L PO4-	< 0,009 mg/L PO4-
FÓSFORO TOTAL	SM 4500 P- E con ácido ascórbico	< 0.003 mg/L P	< 0.003 mg/L P
DUREZA TOTAL	SM 2340 C Titulación	6505,9 mg/L CaCO3	512.465 mg/L CaCO3
DUREZA CÁLCICA	SM 3500-Ca B Titulación	1501,4 CaCO3	440,4 CaCO3
SULFATOS	HACH 8051 adaptado SM 4500 SO4-2 -E	2350 mg/L SO4-2	2300 mg/L SO4-2
CLORUROS	SM 4500 Cl -B Argentometric	349.89 mg/L Cl-	198.52 mg/L Cl-
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – DQO	SM 5220D. Reflujo cerrado	78 mg/L DQO	9.26 mg/L DQO
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DBO 5	SM 5210 B medición 5 días - ASTM 888-09 ensayo para oxígeno disuelto en agua – método c- sensor basado en luminiscencia	blanco: 0.36	Blanco: 0.34
		inóculo: 0.74	inóculo: 0.51
		5ml: 0.096	1ml: 0.54
		10ml: 0.043	2ml: 0.61
		20ml: 0.016	5ml: 0.097
		(mg/L)	10ml: 0.039 (mg/L)
NITRITOS	HACH 8507 adaptado SM 4500-NO2 B	0,16 mg/L NO2	0,14 mg/L NO2
NITRATOS	HACH 8039 adaptado SM 4500-NO3 E	0,46 mg/L NO3	0.2 mg/L NO3
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	SM 2540 F. Volumétrico	< 0,1	< 0,1
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SM 2540 D. Gravimétrico 103-105°C	55,5 mg/L	12 mg/L
NITRÓGENO AMONIAICAL	4500-NH3 B. 4500-NH3 C. Destilación Titrimétrico	3,92 mg/L NH3	7 mg/L NH3
GRASAS Y ACEITES	SM 5520 B Partición líquido – líquido	6,207 mg/L	308,2 mg/L
HIDROCARBUROS TOTALES EN AGUA	SM 5520 F Partición líquido – líquido	< 6 mg/L	250.2 mg/L

Los datos presentados en la tabla anterior, se puede concluir con gran rapidez que muchos de los factores han sido reducidos de forma considerable, tales como la adsorción en la prueba colorimétrica, dureza, sulfatos, cloruros, DQO, nitritos y nitratos, por tal motivo se deduce que la porosidad del material sintetizado, no solo es aplicable en metales pesados, sino también en compuestos ionizables, reduciendo la concentración de contaminantes en muestras de efluentes de drenaje ácido mineral, como esta.

Sin embargo, el hidrochar hace que la muestra tratada presente un aumento en nitrógeno amoniacal, grasas y aceites e hidrocarburos; el aumento de nitrógeno amoniacal posiblemente esté ligado a la presencia de trazas de biocombustible, presente en la mezcla líquida del hidrochar en la síntesis [32], por esto mismo, la diferencia de concentración no se ve muy notoria, en cuanto al aumento en grasas e hidrocarburos, se debe principalmente a las partículas de hidrochar con tamaños <2,5 µm, las cuales no fueron separadas con el filtro Whatman y quedaron suspendidas.

Se debe tener en cuenta que se usaron dos hidrochars, los cuales se sintetizaron a la misma temperatura y tiempo de reacción de 220°C y 5 horas, las muestras se denotaron como A y B, para hacer referencia a la diferencia de aplicación, A partir de los obtenidos, se analizó la determinación de adsorción en cada uno de los metales, para lo cual se construyó la Figura 11.

De igual manera en la Figura 12 se muestra la remoción para cada metal, con su respectiva contramuestra, con objeto de visualizar la repetitividad.

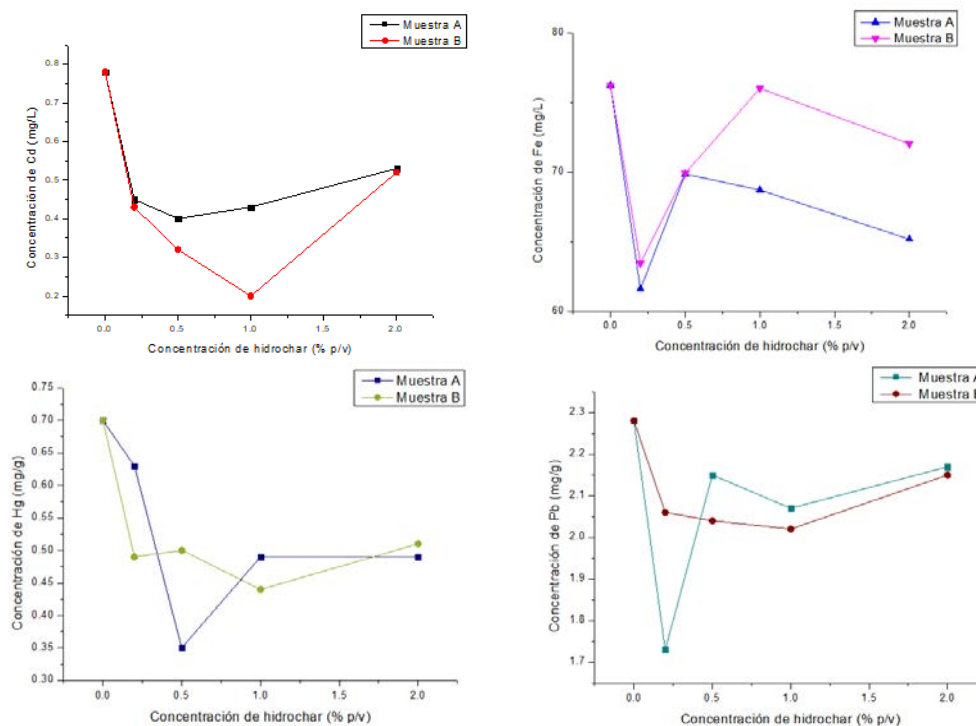


Figura 11. Adsorción de metales pesados al variar la concentración de hidrochar como adsorbente: a) concentración de Cadmio, b) concentración de Hierro, c) concentración de Mercurio y d) concentración de Plomo

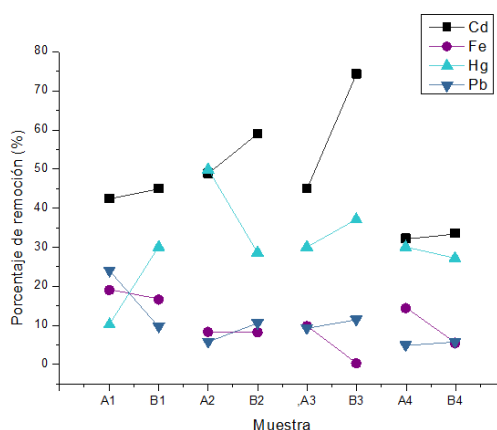


Figura 12. Porcentaje de remoción de metales pesados, vista de muestra y contra muestra

En principio se observa que los porcentajes de remoción más altos, se encuentran en el Cadmio, seguido de Mercurio, Hierro y por último plomo. Las propiedades del material mesoporos, suelen ser selectivas, debido a la composición del hidrochar, bien sea por el intercambio iónico o por el tamaño de partícula. En el porcentaje de remoción de metales se denotó la constante variabilidad, es decir, poca reproducibilidad de los resultados, tal y como se muestra en la anterior figura, se ve la variabilidad de una muestra a la otra en concentración de hidrochar de 0.5% p/v (A2 y B2), en remoción de Pb y Hg, a pesar que los hidrochars fueron sintetizados bajo los mismos parámetros. Sin embargo, se muestra cierta tendencia de comportamiento en lo referente a la remoción de Cd y Fe, esto puede deberse principalmente que el tamaño de partícula, infiere directamente en el resultado, por tanto, se adapta más al material poroso. En las Tablas 3 y 4 se representan las isotermas de adsorción para cada metal, en su respectiva muestra.

Tabla 3. Modelo de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich con muestra A (M1)

Metal adsorbido	Langmuir			Freundlich		
	a_L	$K_L(L/g)$	R^2	n	$K_F(mg/g)$	R^2
Cd	0.00359	2.540	0.7567	-0.2028	8.512E-4	0.3054
Fe	128.205	-0.0167	0.6965	3.3467	2.711E-20	0.8862
Pb	0.004798	-0.594	0.8875	-0.00068	3.16E3053	0.9440
Hg	0.021538	-6.355	0.4751	-0.0078	7.228E72	0.4094

Tabla 4. Modelo de isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich con muestra B (M2)

Metal adsorbido	Langmuir			Freundlich		
	a_L	$K_L(L/g)$	R^2	n	$K_f(mg/g)$	R^2
Cd	-0.2358	-0.948	0.7047	0.7141	0.523	0.9500
Fe	-0.061	-0.4942	0.7439	-0.0318	6.441E60	0.918
Pb	-0.0837	-5.297	0.9877	0.0136	8.77E-25	0.9921
Hg	-0.7628	0.708	0.4464	0.1525	6.225	0.3975

A partir de los datos reportados en las tablas anteriores, donde se observa el ajuste de los datos experimentales a las isotermas de Langmuir y Freundlich para muestra y contramuestra en adsorción de metal, para cada caso. Para determinar el modelo de isoterma que mejor se ajustará a los datos de equilibrio experimentales, se compararon los coeficientes de correlación de ambos modelos, se concluye que la isoterma que mejor describe la adsorción es el de Freundlich para Hierro y Plomo.

En lo referente a la adsorción de Cadmio, en la muestra A, se ajusta al modelo de Langmuir y en la contramuestra B, se ajusta al modelo de Freundlich, asumiendo que al tratarse de iones multimetálicos en una solución, el metal compite por el sitio activo del adsorbente y esto genera disparidad de resultados, ya que probablemente el ion con el cual compite tiene una afinidad similar, por lo cual sería correcto asumir que el modelo que describe mejor el comportamiento de adsorción de Cadmio es el de Freundlich definitivamente. El caso de la adsorción de mercurio, los datos no se ajustan a ninguno de estos dos modelos, sin embargo, de acuerdo a los demás datos se concluye que no hay homogeneidad en la energía de los sitios en la superficie y sin límite en la carga máxima de adsorción.

La constante n en las isotermas de Freundlich, muestran un acercamiento a cero en la gran mayoría de los casos, esto indica que la capacidad e intensidad de adsorción es baja; por tanto, una desorción para la recuperación de metales es técnicamente de fácil acceso. Los resultados son distintos al variar la muestra adsorbente, en las tablas anteriores se observa un comportamiento negativo en la constante de a_L , la cual relaciona el calor de adsorción, el cambio en la energía libre indica el grado de espontaneidad del proceso; a lo cual los valores más negativos reflejan una mayor favorabilidad de la adsorción y su variación puede expresarse en función del cambio en la entalpía ΔH° y la entropía ΔS° de adsorción con la temperatura.

5. CONCLUSIONES

El comportamiento de los materiales adsorbentes, suelen ligarse a la composición química del mismo, así como tamaño de poro y área superficial, en este estudio se demostró que la interacción de la biomasa residual fue formidable (1.56 mg/g para adsorción de azul de metileno y 1076 mg/g en adsorción por índice de yodo), sin embargo, al realizar la carbonización hidrotermal se magnificaron los espacios activos o bien, los poros presenten en el área de superficie, permitiendo mayor afinidad de adhesión. El modelo de adsorción más apto en adsorbente biomásico es la isoterma de Langmuir a lo que describe la interacción de azul de metileno en los centros activos para la biomasa residual, por solo poseer un espacio en la superficie del adsorbente y no existir una superposición de moléculas.

La adsorción sobre los hidrochars provenientes de estas biomásas residual de papa, muestran mejora en el potencial de adsorción y su mecanismo de adsorción es mejor explicado por la isoterma de Freundlich (por capacidad de adsorción), por lo cual se asume que los sitios activos presentan una distribución heterogénea de energía de adsorción, tendiendo a formar multicapas de moléculas metálicas; a medida que transcurre el proceso, también se puede agregar que los radicales (hidroxilo y carbonilo) no tienen tanta afinidad con los iones de Hg, por lo que su relación es inestable al variar las concentraciones de hidrochar y no se puede evaluar con exactitud su comportamiento.

Cuando se tienen sistemas multimetálicos el potencial de adsorción de Cd y Hg se ve reducido en gran manera; mientras que con el cadmio la reducción fue moderada (32.33% - 58.97%), en el mercurio el porcentaje de reducción tuvo un margen de error bastante amplio (10% - 50%) esta situación puede deberse a la afinidad de los grupos funcionales que participan en la adsorción debido al comportamiento prominente heterogéneo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, la gobernación de Boyacá y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por la financiación del proyecto de investigación: *Valorización de biomasa residual de la producción agroindustrial del departamento de Boyacá.*

REFERENCIAS

- [1] A. a Romero, S. L. Flores, and W. Arévalo, "Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita," *Ind. Data*, vol. 13, no. 1, pp. 85–90, 2010.
- [2] T. Peretyazhko *et al.*, "Mineralogical transformations controlling acid mine drainage chemistry," no. 509.
- [3] D. M. Acosta Bueno, "Impactos ambientales de la minería de carbón y su relación con los problemas de salud de la población del municipio de Samacá (Boyacá), según reportes ASIS 2005-2011," *requisito parcial para optar al título de Especialista En Educación Y Gestión Ambiental. Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2016. Recuperado: <https://es.scribd.com/document/352301902/Impacto-ambiental-carbon-en-samaca-pdf>
- [4] H. Lyu, Q. Zhang, and B. Shen, "Application of biochar and its composites in catalysis," *Chemosp.*, vol. 240, 2020.
- [5] C. Revilla Calcina, "Preocupados: contaminación del agua a causa de la minería," *iagua*, 2018. Recuperado: <https://www.iagua.es/blogs/carlos-revilla-calcina/preocupados>
- [6] L. M. Zapata, B. C. Bock, and J. A. Palacio, "Mercury Concentrations in Tissues of Colombian Slider Turtles, *Trachemys callirostris*, from Northern Colombia," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 92, pp. 562–566, 2014.
- [7] J. Pablo and R. Miranda, "Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte Environmental management of industrial waste wat ... Gestión ambiental de aguas residuales industriales con mercurio prove," no. April, 2018.
- [8] D. I. Caviedes Rubio, R. A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, and I. J. Sandoval Rojas, "Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión," *Ing. y Región*, vol. 13, no. 1, p. 73, 2015.
- [9] C. Tejada-tovar and Á. Villabona-ortiz, "Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico Adsorption of heavy metals in waste water using biological materials," vol. 18, no. 34, pp. 109–123, 2015.
- [10] E. L. Pamo and O. A. D. Baretino, "Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro," vol. 113, no. 1, pp. 3–21, 2002.
- [11] S. Mukhopadhyay and R. Mukherjee, "Environmental effect of acid mine drainage on pond ecosystem at Asansol coalfield area, Burdwan district, West Bengal," vol. 3, no. 6, pp. 2186–2198, 2013.
- [12] L. Tejada Benítez, C. Tejada Tovar, W. Marimón Bolívar, and Á. Villabona Ortiz, "Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* Y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución," in *Luna azul*, 2014, pp. 1–142.
- [13] C. M. Machado and C. M. Monteiro Machado, "Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación," *Organ. Latinoam. Energía*, 2010.
- [14] F. J. Neri-Segura, "Division De Estudios De Posgrado Maestro En Ciencia Y Tecnología Ambiental Chihuahua, Chih.," pp. 1–76, 2002.
- [15] A. Ordóñez Alonso, "Sistemas de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina. Experiencias de laboratorio, diseño y ejecución," *Universidad de Oviedo*, 1999.
- [16] J. Manzano, I. F. Mena, A. Polo, M. Tobajas, and A. F. Mohedano, "O.4.3. Aplicación de la carbonización hidrotermal para la valorización de residuos," pp. 3–6.
- [17] M. Bona Otal, "Estudio de la carbonización hidrotermal de alperujo húmedo y caracterización de los productos generados bajo diferentes condiciones de operación," *Zaguan. Unizar. Es*, p. 157, 2016.
- [18] César Augusto Arciniégas Suárez, "Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10," *Luna azul*, no. 34, pp. 195–213, 2012.
- [19] N. A. Castro Souza, "Obtenção e caracterização do hidrochar de eucalipto e avaliação do seu potencial para utilização na agricultura," *Univ. BRASÍLIA*, vol. 1, 2017.
- [20] M. P. Rivera, T. C. Valencia, P. P. Paredes, D. B. Mayor-, M. Eugenia, and R. Flores, "Evaluación de un recubrimiento anticorrosivo a base de poliestireno expandido reciclado," *Perfiles*, vol. 2, no. 22, pp. 42–48, 2019.
- [21] L. M. Bejarano Moreno and P. A. Aguilar Diaz, "Evaluación Del Biochar E Hidrochar Como Medios Para Captura De Carbono En El Suelo," p. 80, 2017.
- [22] E. Ponce-Ballesteros, "El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos," *Univ. Politec. Val.*, p. 65, 2012.
- [23] Z. Zhang, Z. Zhu, B. Shen, and L. Liu, "Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review," *Energy*, vol. EGY, pp. 581–598, 2019.
- [24] L. Luo *et al.*, "The characterization of biochars derived from rice straw and swine manure, and their potential and risk in N and P removal from water," *J. Environ. Manage.*, vol. 245, no. May, pp. 1–7, 2019.

- [25] Y. Yu, X. Lou, and H. Wu, "Some Recent Advances in Hydrolysis of Biomass in Hot-Compressed Water and Its Comparisons with Other Hydrolysis Methods," *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 1, pp. 190–198, 2008.
- [26] F. Ning-chuan and G. Xue-yi, "Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 22, no. 5, pp. 1224–1231, 2012.
- [27] E. Bernard and A. Jimoh, "Adsorption of Pb, Fe, Cu, and Zn from industrial electroplating wastewater by orange peel activated carbon.," *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 4, no. ISSN2305-8269, 2013.
- [28] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 631 de 2015," vol. 2015, no. 49, 2015.
- [29] R. Baird and L. Bridgewater, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.*, 23rd ed. Washington, D.C: American Public Health Association, 2017.
- [30] IDEAM, "Determinación de metales pesados totales con digestión acida y solubles, lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica," 2004.
- [31] J. Swarnabala and R. Kumar Sahoo, "Removal of Pb (II) from Aqueous Solution Using Fruits Peel as a Low Cost Adsorbent," *J. Sci.*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [32] L. Silvani *et al.*, "Can biochar and designer biochar be used to remediate per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) and lead and antimony contaminated soils?," *Sci. Total Environ.*, vol. 694, p. 133693, 2019.
- [33] ASTM, "Normas ASTM," *Standards Worldwide*, 2018. Recuperado: https://www.astm.org/america_latina/sp/index.html
- [34] Finagro, "Boletín Regional Boyacá-18.pdf," no. 106, pp. 1–2, 2018.
- [35] Handa Gustiawan, "Estrategia de ordenamiento de la producción cadena productiva de la papa y su industria," *Minist. Agric. Y Desarro. Rural*, vol. 8, no. 5, p. 55, 2019.
- [36] J. C. Barrientos and C. E. Núñez, "Difusión de seis nuevas variedades de papa en Boyacá y Cundinamarca (Colombia) entre 2003 y 2010," *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol. 8, no. 1, pp. 126–141, 2014.
- [37] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Cadena de la papa," *Lect. Econ.*, vol. unknown, no. 52, pp. 167–194, 2020.

Modelo cíclico para la simulación del comportamiento histerético de las mallas electrosoldadas

Michael Miranda Giraldo¹
Camilo A. González Olier²
Habib Zambrano Rodríguez³
Carlos A. Arteta Torrens⁴
Universidad del Norte
Colombia

Las mallas electrosoldadas son una configuración de alambres longitudinales y transversales soldados en sus puntos de intersección [1] que suelen prefabricarse con varillas de acero al carbono, mediante procesos de trefilado, y son montadas en paneles mano-portables que cubren grandes áreas, por lo que resultan eficientes para el refuerzo de losas y muros estructurales en la construcción de viviendas de bajo costo. Un enfoque efectivo al análisis del impacto de las propiedades mecánicas de las mallas, en el comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado, es la simulación mediante modelos o ecuaciones constitutivas. Su desarrollo facilita la predicción del comportamiento bajo condiciones de carga monotónica o cíclicas, similares a las que experimentarían durante su vida de servicio. En este trabajo se presenta la calibración de los parámetros necesarios para definir la respuesta de mallas electrosoldadas ante cargas monotónicas y cíclicas, por medio de un modelo analítico simple y confiable. El análisis se realiza en OpenSeesPy, utilizando un modelo uniaxial histerético que incluye el efecto de estrangulamiento (*pinching*), el deterioro cíclico debido a deformaciones y energía disipada, y la degradación de la rigidez de descarga en función de la ductilidad. Se presenta una metodología de calibración del modelo, validada con datos experimentales de ensayos cíclicos con diferentes historias de deformación. Se establecen sugerencias para modelar la respuesta de las mallas electrosoldadas antes historia cíclica de deformaciones. Los resultados son de interés para la comunidad de investigadores e ingenieros calculistas que trabajan en la evaluación del desempeño sísmico del sistema estructural de muros delgados de concreto reforzado.

¹ Contacto: michaelmiranda@uninorte.edu.co

² Contacto: colier@uninorte.edu.co

³ Contacto: hzambrano@uninorte.edu.co

⁴ Contacto: carteta@uninorte.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las mallas electrosoldadas WWM son una configuración de alambres longitudinales y transversales soldados por medio de resistencia eléctrica en sus puntos de intersección [1]. Los alambres utilizados en la fabricación de mallas electrosoldadas son materiales que se utilizan para mejorar la resistencia a la tracción del hormigón en estructuras. Se fabrican mediante procesos de trefilado o laminado en frío a partir de varillas de acero al carbono. El trefilado en frío es un proceso de deformación plástica que se aplica comúnmente a componentes de acero de bajo carbono, donde el material a procesar se estira hasta lograr un diámetro específico. El alambre trefilado en frío se obtiene guiando dicho alambre a través de una serie de dados que estiran el material, provocando una deformación plástica y aumentando el esfuerzo de fluencia del material en cada paso, y consecuentemente reduciendo su ductilidad. El proceso de trefilado es uno de los métodos más eficaces para mejorar el acabado superficial, las tolerancias y las propiedades mecánicas del material [2].

Debido a que las barras de refuerzo y el hormigón tienen propiedades de expansión térmica similares, es el material elegido para reforzar estructuras [3]. Al ser las mallas prefabricadas en paneles mano portables que cubren grandes áreas, su uso se ha masificado porque son económicas y reducen los tiempos de construcción. Este tipo de elementos se utilizan principalmente como refuerzo de losas y muros de contención, en la construcción industrializada a bajo costo [4, 5].

Aunque las mallas electrosoldadas se utilizan de manera masiva en la construcción de viviendas, en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, sus propiedades mecánicas las hacen susceptibles de ruptura bajo deformaciones marginalmente mayores a las de fluencia inducidas por carga sísmica [4–8]. Para el caso de otros elementos de concreto reforzado, Gilbert y Smith [9] estudiaron el comportamiento de losas reforzadas con alambre electrosoldado. Estos autores también observaron que el modo de falla frágil de las losas es ocasionado mediante la fractura de la malla electrosoldada bajo pequeñas deformaciones.

El entendimiento del efecto de la ductilidad de la malla electrosoldada en la respuesta de los elementos de concreto reforzado es crucial para estimar el desempeño de estructuras resistentes a terremotos. Aunque la mayoría de los fabricantes de mallas electrosoldadas en Colombia ofrecen productos de acero con certificación de calidad, los informes de estudios que respalden el comportamiento de las propiedades mecánicas de estas mallas sometidas a cargas cíclicas son escasos. Por lo que es necesario el desarrollo de estudios orientados a mejorar la eficiencia de su fabricación y/o uso resultan relevantes no solo a nivel técnico científico, sino también a nivel social, dado su impacto potencial.

Un enfoque efectivo al análisis del impacto de las propiedades mecánicas de las mallas en el comportamiento de elementos estructurales de concreto reforzado es la simulación numérica para la predicción de la respuesta de los materiales ante determinados estímulos mecánicos, mediante modelos y ecuaciones constitutivas. La clave para lograr una alta precisión del resultado de la simulación numérica es la descripción eficiente del comportamiento de los materiales mediante los modelos o ecuaciones constitutivas [10, 11]; su uso y desarrollo facilita la predicción del comportamiento bajo condiciones de carga monotónica o cíclicas, similares a las que experimentarían durante su vida de servicio [11].

Al evaluar la interacción acero-concreto reforzado, se pueden asociar las fallas en el elemento estructural atribuibles al acero; de esta forma, se pueden pronosticar las fallas en los materiales y mejorar los parámetros de los procesos de fabricación de acuerdo con las propiedades mecánicas requeridas. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo la calibración de los parámetros para definir la respuesta de la malla electrosoldadas a cargas monotónicas y cíclicas, por medio de un modelo analítico simple y confiable que sea adecuado para representar la respuesta del acero.

2. MÉTODO

- *Material.* El material ensayado en este trabajo son mallas electrosoldadas de uso común en Colombia, fabricadas a partir de alambres corrugados trefilados en frío de acero de baja aleación (grado 65). La malla presenta un espaciamiento de 150 mm con diámetros de alambre (d_b) de 6 mm, este material

cumple con la norma ASTM A1064 según lo requerido en la NRS-10 capítulo 3.5, [12–14]. La norma ASTM A1064 [13] establece requisitos de las propiedades mecánicas para el material con valor mínimo de resistencia a la tracción (f_u) de 550 MPa, de resistencia a la fluencia mínima (f_y) de 485 MPa, sin embargo, no hace mención del nivel de deformación mínima que el material debe resistir.

Este estudio evaluó el comportamiento esfuerzo-deformación de las mallas electrosoldadas siguiendo como referencia la resistencia a la tracción y el esfuerzo de fluencia mencionados anteriormente.

- *Procedimiento.* El análisis del comportamiento de las mallas electrosoldadas se realiza por medio de un modelo analítico el cual se desarrolla en tres etapas descritas a continuación:
 - *Ensayos experimentales.* Se prepararon probetas a partir del espaciamiento entre puntos de soldadura de las mallas electrosoldadas, con lo cual se obtiene el alambre corrugado libre de con d_b 6 mm y 130 mm de longitud. Los ensayos se realizaron con la ayuda de la máquina universal, modelo MTS-370, que tiene una capacidad de fuerza nominal de 100 kN, una precisión de posición de $\pm 0.5\%$ y cumple con los estándares de la norma ASTM E8 [15]. La deformación de las muestras se midió con un extensómetro de contacto axial de la serie MTS serie 634.11F-24 con una longitud de calibración de 25 mm, y precisión de clase 0.5. Este instrumento cumple con los requisitos de calibración ASTM E8 clase B1 [3].

En primer lugar, se realizaron ensayos de tensión monotónica para obtener las curvas de tensión-deformación y las propiedades mecánicas y de ingeniería del material [16] como se observa en la Tabla 1. La velocidad de prueba fue de 5 mm/min según los parámetros de ASTM 370 [17]. Adicionalmente, se realizaron pruebas cíclicas para las mallas electrosoldadas bajo la norma ASTM E606-04 [18], con diferentes historias (Tabla 2), para validar los resultados en el modelo.

Tabla 1. Ensayos Monotónicos Mallas electrosoldadas

Código	db (mm)	área (mm ²)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	%reducción área
T1D6	6	28.3	745	685	41.2%
T2D6	6	28.3	738	683	36.0%
T3D6	6	28.3	746	698	41.2%

Tabla 2. Ensayos cíclicos mallas electrosoldadas

Código	db (mm)	área (mm ²)	Ciclo	Punto inicial (mm/mm)	Amplitud (mm/mm)	Frecuencia(Hz)
CT1D6	6	28.3	1	0.002	0.002	0.01
			2	0.002	0.004	0.01
CT2D6	6	28.3	1	0.002	0.002	0.01
			2	0.003	0.003	0.01

- *Calibración del modelo.* A partir de los datos experimentales, se determinaron los parámetros de esfuerzo y deformación en los diferentes puntos de las curvas monotónicas y las envolventes de los lazos de histéresis. El análisis se realizó mediante el programa de análisis inelástico *OpenSeesPy*, con el modelo UniaxialMaterial-Hysteretic UMH. Este modelo incluye, además de los valores de esfuerzo y deformación en diferentes puntos de la curva de lazo, el estrangulamiento (*pinching*), el deterioro cíclico debido a deformaciones y energía disipada (*damage*), y la degradación de la rigidez de descarga en función de la ductilidad (*beta*) [19].

Para generar la curva teórica se elaboró el correspondiente código en *OpenSeesPy*, a partir del modelo antes descrito, con la siguiente secuencia de acciones: 1) Se crearon los nodos y se establecieron las restricciones de las probetas para la aplicación de la carga; 2) Se procedió a definir el material empleando el comando *Hysteretic* e ingresando los puntos de esfuerzo-deformación derivados de los datos obtenidos en los ensayos experimentales monotónicos; los factores adicionales requeridos (*PinchX*, *PinchY*, *Damage1*, *Damage2*, *beta*) se asumen con valor cero debido que no tiene injerencia para este tipo de carga; 3) Se definió la longitud del elemento (la probeta de ensayo); y 4) Se indicó el patrón de carga aplicada bajo determinada serie de tiempo.

Posteriormente se agregaron los objetos componentes que definen el tipo de análisis: determina como se aplicaran las ecuaciones de restricción del análisis y como se manejaran las condiciones de frontera. Se determinan los grados de libertad, el paso predictivo para el tiempo y la secuencia de pasos que utilizaran para resolver la ecuación. Se especifica cómo resolver el sistema de ecuaciones del análisis y almacenar los resultados, y se determina cuando se logrará la convergencia. Una vez determinada la ruta de análisis, se procedió a graficar la curva experimental y predicha, y se calcula el error de mínimos cuadrados normalizado entre ambas curvas mediante la ecuación (1) [20].

$$error(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{m,i} - \sigma_{p,i}(x))^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_{m,i}^2}} \quad (1)$$

Donde $\sigma_{m,i}$ es el esfuerzo experimental y $\sigma_{p,i}$ es el esfuerzo de la curva predicha. Con el código inicial desarrollado para el modelo monotónico, y tomando de referencia el ensayo cíclico *CT1D6*, se procede a introducir como parámetros de entrada inicial los tres puntos de esfuerzo-deformación de los lazos positivos y los tres puntos esfuerzo-deformación de los lazos negativos en el modelo. En esta sección, se desarrolla el código complementario en *OpenSeesPy*, que calibra el modelo calculando al tiempo los parámetros que complementan dicho modelo para el estudio del comportamiento de la malla electrosoldada bajo cargas cíclicas (*PinchX*, *PinchY*, *Damage1*, *Damage2*, *beta*), utilizando la optimización de error de mínimos cuadrados normalizado entre la curva experimental del ensayo cíclico y la curva predicha [20].

- *Validación.* Finalmente, los parámetros calculados en el modelo cíclico son utilizados para graficar la curva teórica y compararla con la curva experimental obtenida en el laboratorio del segundo ensayo (CT2D6) el cual se realizó con diferentes historias de deformación, calculando el error entre ambas curvas con el fin de validar que los valores de los parámetros obtenidos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los ensayos monotónicos realizados fueron graficados en curvas esfuerzo-deformación. En la Figura 1 se muestra que los ensayos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM A1064 [13], con un valor promedio de resistencia a la tracción (f_u) de 743.27 MPa, esfuerzo de fluencia (f_y) de 688.67 MPa y un porcentaje de reducción de área de 39.48%

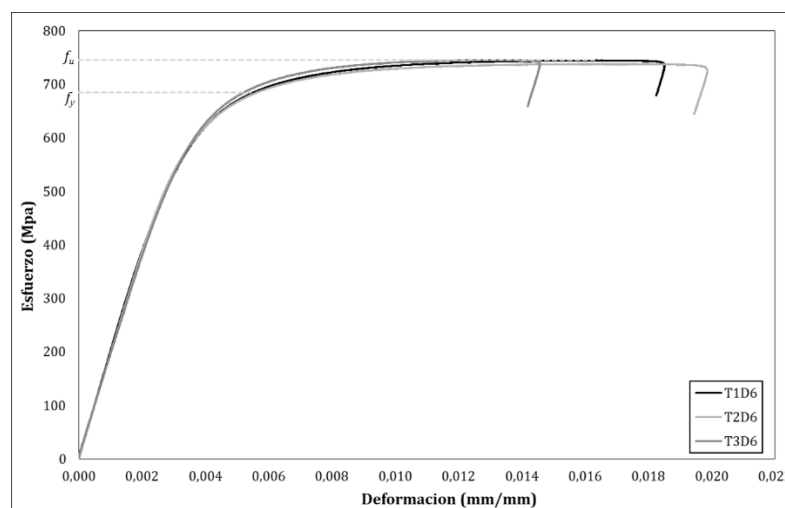


Figura 1. Curvas esfuerzo-deformación monotónicas, mallas electrosoldadas

Teniendo en cuenta que las curvas monotónicas cumplen con los parámetros establecidos, se utilizan estos ensayos para desarrollar el código de programación del modelo *UniaxialMaterial-Hysteretic* introduciendo valores de la curva experimental. Dicho código genera la curva teórica del modelo que simula la curva esfuerzo-deformación de la malla electrosoldada, como se observa en la Figura 2. Se calcula el error entre el modelo y la curva experimental con un valor de $error = 0.15$.

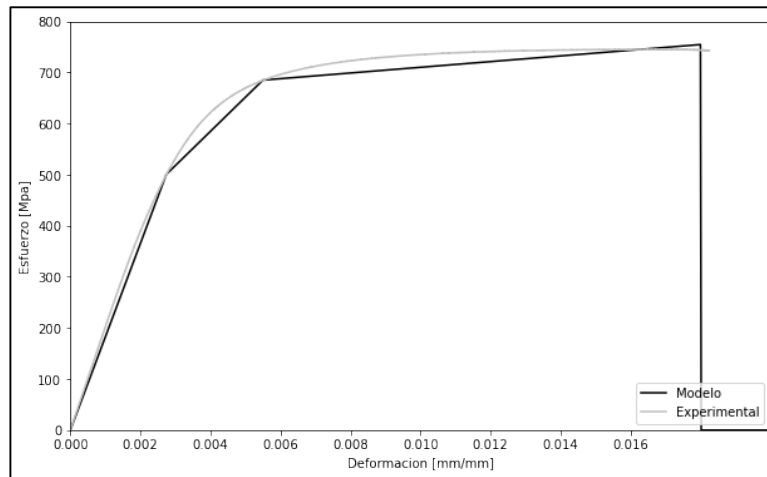


Figura 2. Curva monótonica Esfuerzo-Deformación predicha modelo UniaxialMaterial-Hysteretic

Los ensayos cíclicos se realizaron bajo la norma ASTM E606-04 [18]. El ensayo de referencia para la calibración fue el de la probeta *CT1D6*, el cual sus parámetros de entrada son mostrados en la Tabla 2. Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 3.

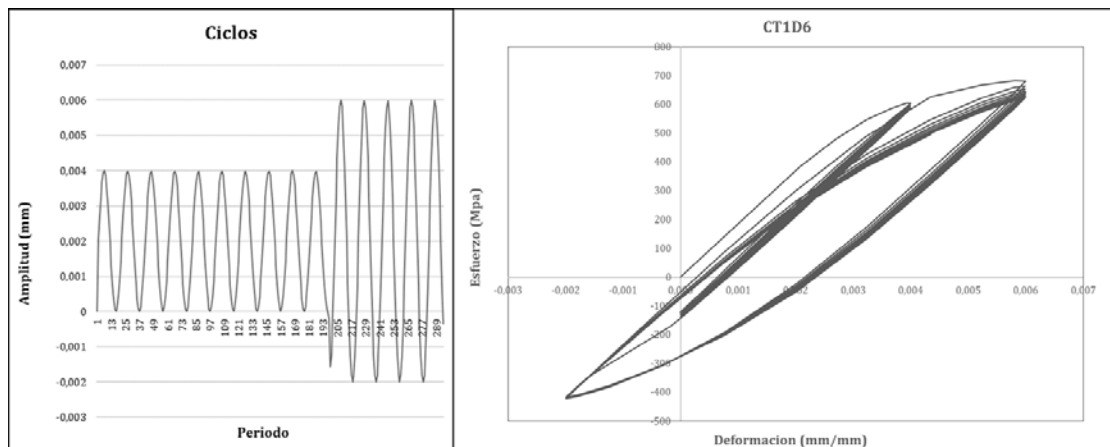


Figura 3. Historia de desplazamientos ensayo y curva experimental esfuerzo-deformación cíclico probeta CT1D6

Partiendo del código desarrollado de la curva monótonica y con los datos de esfuerzo-deformación obtenidos de la curva cíclica experimental CT1D6, se procede la calibración del modelo Histeretic. Inicialmente se introducen tres datos de esfuerzo-deformación para los lazos positivos y para los lazos negativos. Con ayuda del código inicial se realiza un ajuste preliminar de la curva cíclica colocando los valores iniciales o semillas para los parámetros que completan nuestro modelo (*PinchX*, *PinchY*, *Damage1*, *Damage2*, *beta*), estos valores semillas se obtienen de los recomendados por el programa *OpenSees* [21].

Luego, utilizando el código para el cálculo del error [20], se desarrolla un módulo adicional que permite la optimización de error de mínimos cuadrados normalizado entre la curva histeretica experimental medida y la predicha, calculando al tiempo los valores óptimos de los parámetros que completan el modelo y permiten predecir las curvas cíclicas. Las curvas resultantes son analizadas empleando como valores de referencia, los parámetros sugeridos por *OpenSees* en el módulo *Uniaxial Material Hysteretic* (Tabla 3) [21]. El modelo de referencia arrojó un *error* = 0.068, mientras que el modelo calibrado arrojó un *error* = 0.18, evidenciando que el modelo aquí propuesto presenta un mejor ajuste, como se observa en la Figura 4.

Tabla 3. Resultados Parámetros modelo UniaxialMaterial-Hysteretic

Parámetros	Valor	Sugerido Opensees
Pinch X	0.26	0.8
Pinch Y	0.24	0.2
Damage 1	0.0	0
Damage 2	0.00089	0
Beta	0.00059	0

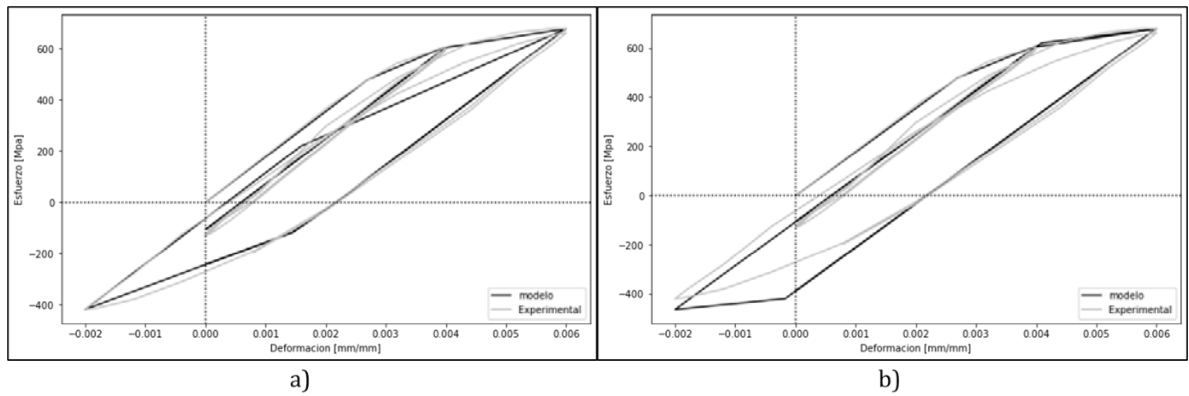


Figura 4. Comparativo curvas cíclicas de Esfuerzo-Deformación Uniaxial Material-Hysteretic: a) modelo propuesto, b) modelo con parámetros sugerido por OpenSees

Son realizados ensayos cíclicos de mallas electrosoldadas con diferentes historias de deformaciones, como son el *CTD2* que se muestra en la Tabla 2, para realizar la validación del código del modelo propuesto, el resultado de este ensayo se observa en Figura 5. Esta validación se realiza ingresando los tres parámetros de esfuerzo-deformación para los lazos positivos y los tres parámetros de esfuerzo-deformación para los lazos negativos obtenidos de la curva experimental, luego colocan los parámetros calculados en la calibración del modelo y que se muestran en la Tabla 3, y se realiza el análisis con ayuda del código sin tener en cuenta la optimización de los parámetros y la minimización del error, esto con el fin de calcular directamente la curva cíclica del modelo y el error. El resultado de esta validación se muestra en la Figura 6 con un $error = 0.914$, lo cual evidencia un bien ajuste del modelo.

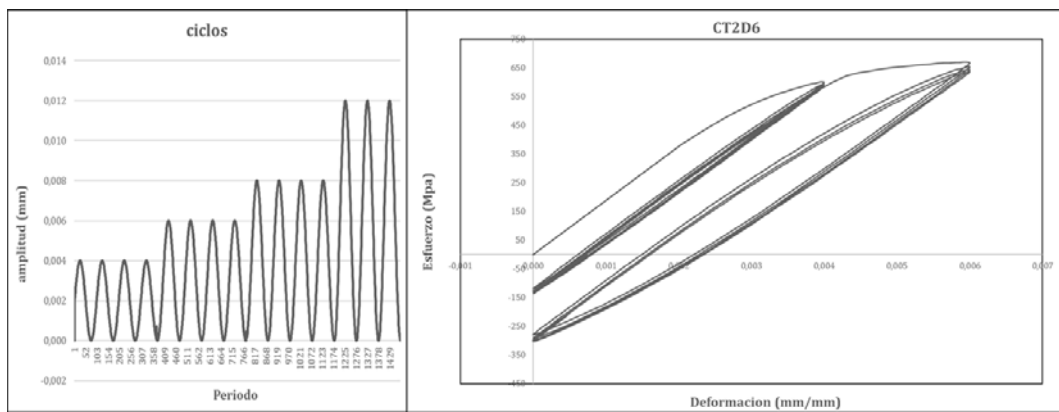


Figura 5. Historia de ensayo y Curva Esfuerzo-Deformación cíclico probeta CT2D6

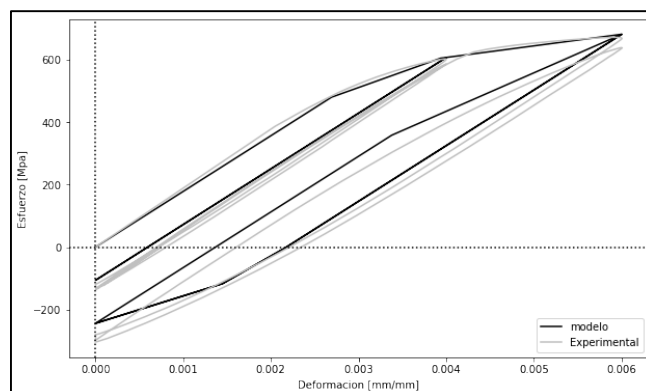


Figura 6. Validación Modelo Uniaxial Material-Hysteretic

4. CONCLUSIONES

En este estudio se determinaron los parámetros para el análisis y predicción del comportamiento de mallas electrosoldadas de acero de bajo carbono grado 65, reguladas por la norma ASTM A1064, empleadas en el refuerzo de concreto y en la construcción de viviendas de bajo costo.

Los parámetros calculados en la calibración y optimización del modelo (PinchX = 0.26; PinchY = 0.24; Damage1 = 0.0; Damage2 = 0.00089; Beta = 0.00059) demostraron ser apropiados para la simulación del comportamiento de las mallas electrosoldadas, bajo cargas cíclicas, para diferentes historias de deformación, incluso con un mejor ajuste que el modelo de referencia sugerido por OpenSees.

Estos resultados preliminares, aunque prometedores para el modelamiento del comportamiento del acero de refuerzo, grado 65, futuros estudios deberán poner a prueba el modelo con gama más amplia de diámetros de barra e incluso otros grados de acero de refuerzo empleados en la elaboración de mallas electrosoldadas, para así brindar un panorama completo evidencia probada que apoye la toma de decisión en la industria de manufactura de este tipo de elementos de refuerzo.

Cabe resaltar que aun cuando el protocolo propuesto en la calibración permite el cálculo de los parámetros óptimos para la simulación de otro tipo de aceros, para cargas cíclicas, se debe variar apropiadamente los valores de los parámetros para su análisis.

REFERENCIAS

- [1] Ternium, "Ternium - Colombia," *Ternium*. 2019, Recuperado: <http://co.ternium.com/>
- [2] N. A. Raji and O. O. Oluwole, "Influence of degree of cold-drawing on the mechanical properties of low carbon steel," 2011, Recuperado: <http://ir.library.ui.edu.ng/handle/123456789/2505>
- [3] MTS company, "Rebar Testing Solutions," 2004. Recuperado: https://test.mts.com/en/articles/materials/rebar?utm_medium=email&utm_source=ww-matcivilynobio&utm_campaign=Rebar-101&utm_content=button-cta
- [4] J. Carrillo and S. M. Alcocer, "Seismic performance of concrete walls for housing subjected to shaking table excitations," *Engineering Structures*, vol. 41, pp. 98–107, Aug. 2012.
- [5] J. Carrillo and S. M. Alcocer, "Acceptance limits for performance-based seismic design of RC walls for low-rise housing," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 41, no. 15, pp. 2273–2288, Dec. 2012.
- [6] Julian Carrillo and Sergio M. Alcocer, "Shear Strength of Reinforced Concrete Walls for Seismic Design of Low-Rise Housing," *ACI Structural Journal*, vol. 110, no. 3, 2013.
- [7] C. A. Arteta *et al.*, "Global and local demand limits of thin reinforced concrete structural wall building systems," p. 13, 2017.
- [8] Carlos A. Blandon, Carlos A. Arteta, Ricardo L. Bonett, Julian Carrillo, Katrin Beyer, and João P. Almeida, "Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading," *Engineering Structures*, vol. 176, pp. 175–187, 2018.
- [9] R. I. Gilbert and S. T. Smith, "Strain Localization and its Impact on the Ductility of Reinforced Concrete Slabs Containing Welded Wire Reinforcement," *Advances in Structural Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 117–127, Feb. 2006.
- [10] D.-D. Chen, Y. C. Lin, Y. Zhou, M.S. Chen, and D.-X. Wen, "Dislocation substructures evolution and an adaptive-network-based fuzzy inference system model for constitutive behavior of a Ni-based superalloy during hot deformation," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 708, pp. 938–946, Jun. 2017.
- [11] Y. Xia, C. Zhang, L. Zhang, W. Shen, and Q. Xu, "A comparative study of constitutive models for flow stress behavior of medium carbon Cr–Ni–Mo alloyed steel at elevated temperature," *Journal of Materials Research*, vol. 32, no. 20, pp. 3875–3884, Oct. 2017.
- [12] ASTM I, "ASTM A 706. Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement." ASTM A 706, 2016, Recuperado: <https://www.astm.org/Standards/A706.htm>
- [13] ASTM I, "ASTM A1064. Standard Specification for Carbon-Steel Wire and Welded Wire Reinforcement, Plain and Deformed, for Concrete." 2019, Recuperado: <https://compass.astm.org/CUSTOMERS/search/search.html?query=A1064&resStart=0&resLength=10&&quicksearch=true>
- [14] T. Orozco, "NSR-10 – Capítulo C.1 – Requisitos generales Título C concreto estructural," Recuperado: https://www.academia.edu/10559723/NSR10_Cap%C3%ADtulo_C.1_Requisitos_generales_T%C3%8DTULO_C_C_ONCRETO_ESTRUCTURAL.
- [15] ASTM I, "ASTM E8. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials." ASTM E8, 2001, Recuperado: <https://www.astm.org/Standards/E8>
- [16] R. Alderiesten, "Fatigue in fiber metal laminates: The interplay between fatigue in metals and fatigue in composites," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 42, no. 11, pp. 2414–2421, 2019.
- [17] ASTM I, "ASTM A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products." ASTM A370, 2012, Recuperado: <https://www.astm.org/Standards/A370.htm>
- [18] ASTM I, "ASTM E606-4. Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing." ASTM E606, 2005, Recuperado: <https://compass.astm.org/Standards/HISTORICAL/E606-04.htm>
- [19] N. Mohammad Noh, L. Liberatore, F. Mollaioli, and S. Tesfamariam, "Modelling of masonry infilled RC frames subjected to cyclic loads: State of the art review and modelling with OpenSees," *Engineering Structures*, vol. 150, pp. 599–621, Nov. 2017.

- [20] R. Carreno Vallejos, "Characterization of Large Diameter Reinforcement Under Large Strain Cyclic Reversals," 2018.
- [21] M. Scott, F. Filippou, and S. Mazzoni, "Effects of Hysteretic-Material Parameters." Recuperado: <https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/4052.htm>

Estudio y modelado matemático de la interacción entre la forma del fondo y el líquido en reservorios para almacenamiento de agua

Yasmani Teófilo Vitulas Quille¹

Universidad Nacional del Altiplano
Perú

La respuesta estructural a la interacción líquido-estructura influye tanto en las paredes-fuste como en la *base del reservorio*, que se analiza como fondo de reservorio, siendo necesario evaluar los efectos que ocurren y varían de acuerdo a su geometría. Se propone el desarrollo de fondos esféricos para una eficiente distribución de cargas a compresión y fondos cónicos con pendientes variables, para obtener una eficacia sustancial en la construcción de reservorios con grandes dimensiones, reduciendo los esfuerzos a flexión que generan fallas estructurales, reemplazándolos por fuerzas a compresión que sean absorbidas eficiente por el concreto. El objetivo principal es fijar parámetros y establecer criterios de diseño para una losa de fondo para reservorio de grandes dimensiones, procedimientos que pueden ser utilizados tanto en reservorios apoyados como en tanques elevados, considerando un modelo laminar. En todo diseño estructural los parámetros utilizados dependen de la forma estructural del elemento, generando la optimización en la distribución de cargas hidrodinámicas de presión vertical como ventaja estructural adicional, por lo cual se requerirá de menores espesores y garantizar que sea el concreto quien absorba la mayoría de estas cargas. Aunque su desventaja es el proceso constructivo, puede ser superado con un adecuado control de calidad, recomendando que la cúpula, como la losa de fondo, sean semiesféricas o cónicas. En este trabajo se presenta el análisis y cálculo de esfuerzos S_1 y S_2 en dos alternativas curvas y cónicas, para sustituir los esfuerzos naturales que aparecen en las losas planas por curvaturas entre 10° y 20° en base azimutal-Z y pendientes entre 5° a 10° en base-X para bases cónicas, las cuales se sustentan y se recomienda usar, obteniendo un punto de conjunción entre el costo y la eficiencia estructural del modelo matemático, que sirve como premisa para el diseño de muchas otras estructuras.

¹ Ingeniero Civil, Especializado en Cálculo y Diseño Estructural y Metodología de la Investigación Científica en Ingeniería. Con estudios de Maestría y Doctorado.
Contacto: yvitulas@unap.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

El punto de partida para el diseño de reservorios, es el análisis de las demandas máximas que se producen en el consumo, las cuales deben ser satisfechas cabalmente, al igual que cualquier variación en las 24 horas del día, proveyendo presiones adecuadas en la red de distribución [1], esta variable es directamente proporcional al dimensionamiento del reservorio, y en poblaciones grandes, se requiere de reservorios de grandes dimensiones.

En todo diseño estructural, los parámetros utilizados dependen de la forma estructural del elemento, en este caso el modelo de estudio será de forma cilíndrica apoyada en losa de concreto, la ventaja estructural es que las paredes o también denominado fuste, están sometidos a esfuerzos de tensión simple soportado por el acero de refuerzo, por lo cual requieren menores espesores, pero tienen la desventaja que en elementos muy grandes, la base o losa de fondo trabaja a flexión y, dependiendo del tipo o propiedades del suelo, no puede ser soportado adecuadamente por las cargas a las que se someten al tener el reservorio en pleno uso, debiendo incrementar el espesor de la losa de fondo en relación al volumen de agua a ser almacenada, por lo tanto, el presente estudio propone forzar, de alguna manera, a que el fondo del reservorio trabaje esencialmente a esfuerzos de compresión, proponiendo una losa semiesférica como una primera alternativa, y cónica como una segunda alternativa, ya que ambas son relativamente sencillas de construir en un proyecto real, logrando de esta forma reacciones y soluciones óptimas con la Interacción Líquido-Fondo de reservorio.

El cálculo y diseño estructural en general, debe analizarse para que cumpla con los criterios sismo resistentes establecidos por la norma establecida en cada país, en este caso específico, la Norma E-030 del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, el ACI-350, o cualquier otra norma nacional que sea utilizado según el contexto del proyecto, ya que lo aquí mostrado puede ser utilizado en la etapa de diseño de proyectos similares en cualquier realidad, ya que *la formación de ingenieros [2]* está marcada por las *diferencias que se dan respecto a países, universidades, asignaturas, contenidos, donde cada universidad maneja un modelo pedagógico que las diferencias de las demás instituciones de educación superior impregnando su sello característico en el futuro ingeniero [3]*, pero que no puede limitarse a desarrollar conceptos aislados, sino más bien enlaces criterios de diseño comunes al ser el análisis parte de la ingeniería estructural.

Por lo anterior, se considera una estrategia viable para el análisis de estructuras de almacenamiento de agua, incluso pudiéndose replicar para tanques elevados, reservorios, cisternas, etc., ya que aunque estas presentan características sísmicas distintas debido al efecto hidrodinámico del agua en el fuste, y con el afán de optimizar los diseños, se podría incluir el efecto en el fondo del reservorio para lograr un comportamiento óptimo; económica y estructuralmente hablando; en las estructuras a nivel estático, debiendo necesariamente realizar una adaptación al modelo por ser este estudio una propuesta preliminar, pudiendo complementarse con estudios posteriores un efecto dinámico que mostraría mucha más información de la interacción planteada.

Por lo que el presente artículo tiene como objetivo principal, fijar parámetros y establecer criterios de diseño para la losa del fondo de reservorios de grandes dimensiones para almacenamiento de agua potable. Considerando además como objetivos operacionales: proponer, estudiar y evaluar los efectos de la variación del fondo de reservorio y sus efectos por la interacción agua estructural, y determinar las variaciones de esfuerzos superficiales S_1 y S_2 que actúan en la base del reservorio.

2. MARCO CONCEPTUAL

Los reservorios son elementos de almacenamiento de agua que cumplen un papel importante en cualquier sistema de distribución de agua, esto hace que su análisis y diseño estructural sea muy importante a fin de garantizar el adecuado funcionamiento de estas estructuras ante las diferentes cargas y condiciones de funcionamiento a las que sean sometidas y con ello asegurar el funcionamiento de los sistemas de distribución a los cuales pertenezcan [4].

Es necesario definir que es una *Estructura Laminar* o comúnmente conocido como *cáscara* o elemento *shell* tal como se muestra en la Figura 1, cumple condiciones de esfuerzos en su superficie, pudiendo idealizar una parte diferencial y que además tiene un espesor relativamente pequeño con referencia al elemento estructural en su conjunto, esta es la forma usual en el cálculo estructural de reservorios, domos, cúpulas, etc., pudiendo identificarse de dos formas diferentes: *Espesor pequeño*, denominado *membranas* o *láminas*, y cumplen generalmente la función de cobertura y/o losa y *Espesor grande*, denominados como *muros de corte* o *placas*, y soportan mayor cantidad de cargas por su mayor longitud.

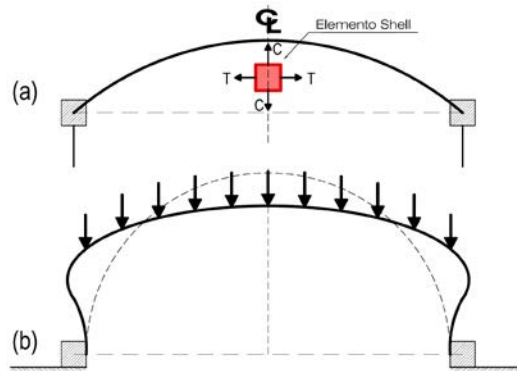


Figura 1. Cáscaras: a) Espesor pequeño, b) Espesor grande

Es necesario recalcar que los elementos de espesor pequeño, ya sean a flexión y/o torsión, no tienen rigidez, ya que en su superficie únicamente se presentan esfuerzos normales y tangenciales lo cual los hace óptimos; pero los elementos de espesor grande soportan adicionalmente fuerzas cortantes, momentos flectores, esfuerzos por flexión y momentos torsores que los hace trabajar a flexión o flexo-tracción.

Para un análisis más adecuado se debería optar por la *técnica de disgregar una estructura en sus componentes individuales e indivisibles conocidos como análisis de elementos finitos FEA*, ya que es la base del modelado de las estructuras y de la incorporación de la información correspondiente, en forma tal que pueda ser introducida al computador para su análisis e interpretación [5].

En la búsqueda de mejores elementos de lámina, *seguiremos aplicando el concepto usado en el desarrollo del elemento de 4 nodos* [6] ya que iniciaremos con cálculos manuales con fines de verificación y obtención de ecuaciones matemáticas útiles para la verificación del comportamiento estructural a nivel de esfuerzos, los cuales complementaré con respuestas computacionales, mostrando una data más rica para su análisis e interpretación.

En el estudio de esfuerzos internos de las cáscaras, suele representarse a las mismas por su superficie media, que es aquella que divide en cada punto el espesor en dos partes iguales. Se analizan generalmente con coordenadas curvilíneas. *Si se plantea la Ley de Hooke y las relaciones cinemáticas para obtener los esfuerzos T_x , T_φ , M_x , M_φ en términos de los desplazamientos y sus derivadas* [7], aspectos que tomaremos en cuenta en el presente estudio.

Hay que tener en cuenta que podemos utilizar los conceptos aquí plasmados en la ingeniería civil, ya que existen varias ramas y sub-disciplinas dentro de esta ingeniería, sobre las que se analizan distintas características, comportamientos y propiedades de determinados elementos [8, 9], en las cuales podríamos de alguna manera replicar este tipo de estudios con la finalidad de identificar el comportamiento básico preliminar con el afán de que se retroalimente en aras de obtener adecuados resultados.

3. MÉTODO

Para el soporte de cargas por la presión vertical del líquido en reservorios, se podría proponer el estudio de: fondos esféricos, fondos parabólicos y fondos cónicos tal como se parecía en la Figura 2. Y para una identificación adecuada, se muestra los posibles esfuerzos internos que pueden generarse en un elemento tipo Shell tal cual se muestra en la Figura 3.

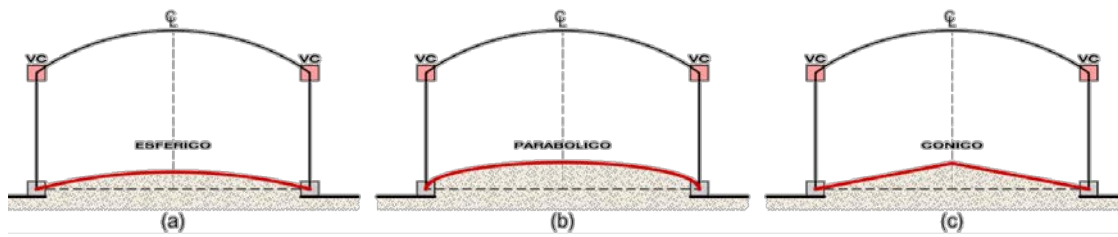


Figura 2. Fondo de reservorios a analizar: a) Fondo esférico, b) Fondo parabólico, c) Fondo cónico

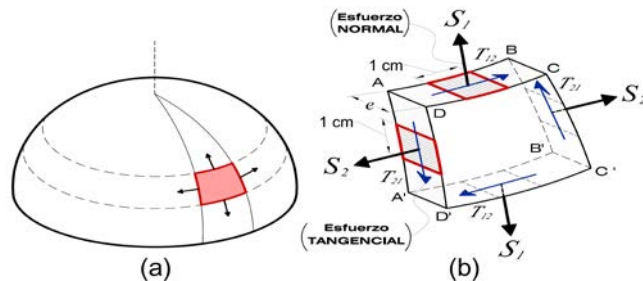


Figura 3.- Estructura tipo cáscara: a) Modelo discretizado, b) Elemento diferencial aislado

Varios estudios e intervenciones muestran las bondades que tiene la *modelación matemática en contextos y situaciones reales* [10], y según [11], *el elemento Shell siempre activa los seis grados de libertad en cada una de sus articulaciones conectadas*, por lo que, analizando un pequeño elemento diferencial, podemos verificar los planos o elementos de superficie A-B-C-D, A'-B'-C'-D', A-D-D'-A' y C-B-B'-C', donde existen esfuerzos normales S_1 y S_2 que son perpendiculares a dichos planos.

Para un mejor análisis, es ideal manejarlo por unidad de longitud, por tanto, un esfuerzo S_1 normal o axial, es semejante a un esfuerzo normal o axial de una viga, el cual se considera como un esfuerzo externo al elemento diferencial aislado, pero esfuerzo interno con respecto a toda la cáscara.

Por tanto, si (e) es el espesor del elemento diferencial, S_1 es el esfuerzo que actúa por unidad de longitud en dicho espesor, la cual puede ser dada en cm o m , (kg/cm o kg/m), es decir que los esfuerzos son expresados como cargas distribuidas, siendo S_1 por la longitud del mismo, el esfuerzo total sobre una sección determinada del elemento y analógicamente para todos los esfuerzos internos. Aquí hay que tener en cuenta que este esfuerzo S_1 actúa ó está determinado por unidad de longitud a diferencia de lo que ocurre en la determinación con el esfuerzo normal en una viga, en la que este se relaciona a toda la sección.

Se generan también otros esfuerzos cuya dirección es tal que coincide con el plano de la sección (*plano tangente en el punto de análisis*), el cual debe distinguirse en forma diferente al esfuerzo cortante, ya que el cortante es normal a la superficie de la cáscara, mientras que el tangencial está contenido en la sección de la cáscara considerada, pero en el plano tangente en dicho punto. Como el elemento analizado es un elemento diferencial se puede decir que el esfuerzo tangencial está contenido en el plano tangente a la cáscara mientras que el de corte es normal al mismo.

La notación a seguir para distinguir los esfuerzos tangenciales, será con dos subíndices (T_{12}); el primer subíndice indica que se encuentra en el plano normal a la dirección que indica el número 1 y el segundo subíndice indica que se encuentra en un plano paralelo a la dirección 2, tal como se mostró en la Figura 3(b). En los planos A-B-C-D, A'-B'-C'-D' se desarrollan esfuerzos tangenciales que de acuerdo a la notación será T_{12} y en los planos A-D-D'-A', C-B-B'-C' será T_{21} .

Otro de los esfuerzos internos que se pueden presentar en las superficies ya sean rectas o curvas se presentan en la Figura 4(a), son momentos dados por unidad de longitud que en caras opuestas son iguales M_I en la dirección 1 y M_{II} en la dirección 2.

De la misma forma, la relación con los momentos flectores, *con la variación de momentos flectores entre una sección y otra aparecen esfuerzos cortantes*, tendremos un corte que está en el plano de la sección y normal a la superficie de la cáscara.

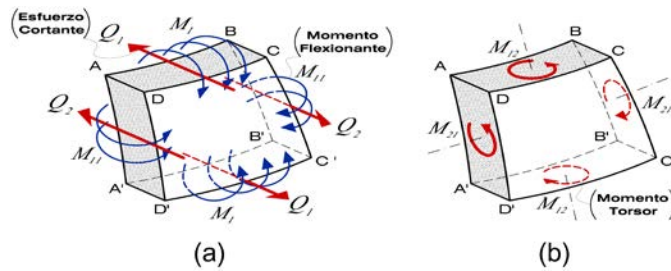


Figura 4. Elemento diferencial: a) Fuerzas cortantes y momentos flectores, b) Momentos torsores

También se puede presentar en cada una de las caras el momento Torsor M_{12} y M_{21} , el cual es un par contenido en el plano de la sección; estos momentos mostrados en la Figura 4(b) se pueden representar como giros. La designación se hace siguiendo las mismas notaciones que en el caso de los esfuerzos tangenciales.

Los esfuerzos internos mostrados, son los que se presentan en casos generales, es decir, en la Figura 3(b) tenemos 4 esfuerzos: $S_1 = S_1, S_2 = S_2, T_{12} = T_{12}, T_{21} = T_{21}$; en la Figura 4(a) tenemos 2 fuerzas y 2 momentos M_1, M_{11}, Q_1, Q_2 ; y en la Figura 4(b) tenemos 2 pares M_{12}, M_{21} ; haciendo un total de 10 esfuerzos internos diferentes, los cuales no son fáciles de calcular con las ecuaciones de equilibrio estático, ya que tendríamos 10 incógnitas y solo podemos desarrollar un máximo de seis ecuaciones de equilibrio, distribuido en tres por el equilibrio y tres momentos X-Y-Z, por lo tanto el problema no puede ser resuelto, teniendo que recurrir a ecuaciones de elasticidad hiperestática. Esto condiciona a la estructura a un sistema isostático o hiperestático.

Hasta este punto se puede concluir que para el cálculo de los esfuerzos internos en un punto cualquiera de la cáscara, lámina o membrana, exige la resolución de un problema por el método de los elementos finitos, método que en su momento me animaré a explicar en forma detallada para un elemento cualesquiera.

3.1 Capacidad y dimensionamiento

Es sabido que, para determinar la capacidad del reservorio, es necesario considerar la compensación de las variaciones horarias, emergencia para incendios, previsión de reservas para cubrir daños e interrupciones en la línea de conducción y que el reservorio funcione como parte del sistema, además se considera la compensación de variaciones horarias de consumo y los eventuales desperfectos en la línea de conducción [12], aspectos que se deben tomar en cuenta a la hora del diseño.

El reservorio debe permitir que la demanda máxima que se produce en el consumo sea satisfecha a cabalidad, al igual que cualquier variación en el consumo registrado en las 24 horas del día. Ante la eventualidad que en la línea de conducción pueda ocurrir daños que mantengan una situación de déficit en el suministro de agua, mientras se hagan las reparaciones pertinentes, es aconsejable un volumen adicional para dar oportunidad de restablecer la conducción de agua hasta el reservorio [1, 12].

Para determinar las cargas estáticas a las que están sometidas los fondos de reservorio, el volumen de almacenamiento puede determinarse utilizando métodos analíticos, pero se debe disponer de la data del consumo por horas y del caudal disponible en la fuente que por lo general es equivalente al consumo promedio diario. Otro método a usar es el gráfico, que, aunque no es convencional, nos da una primera data de resultados que podemos usar, basado en la determinación de una curva de consumo integral, incluyendo consumos acumulados totales.

Para los sistemas de almacenamiento de agua potable con redes de captación por gravedad, se recomienda una capacidad mínima de regulación del reservorio dentro del 15% del consumo promedio diario anual Q_m , este valor de volumen definirá las dimensiones del reservorio, considerando para su dimensionamiento la relación del diámetro con la altura de agua (d/h), la misma que puede variar entre 0.5 y 3.0.

Aunque no es el caso es necesario mencionar que, para un reservorio de sección rectangular con este mismo rango de valores, se debería considerar una relación del ancho de la base y la altura (b/h), pudiendo

plantear un fondo de losa en forma de domo, el cual será parte de un estudio diferente. Para el caso del análisis propuesto y el posterior modelado matemático tal cual se muestra en la Figura 5, y solo con fines de verificación, se considerará las dimensiones preliminares siguientes:

- Diámetro del reservorio: $D = 10.00 \text{ m}$
- Altura del fuste: $H = 5.00 \text{ m}$
- Altura efectiva de agua: $H = 4.50 \text{ m}$
- Relación diámetro-altura: $\left(\frac{D}{H}\right) = 2.0$
- Volumen de almacenamiento: $V = 353.43 \text{ m}^3$

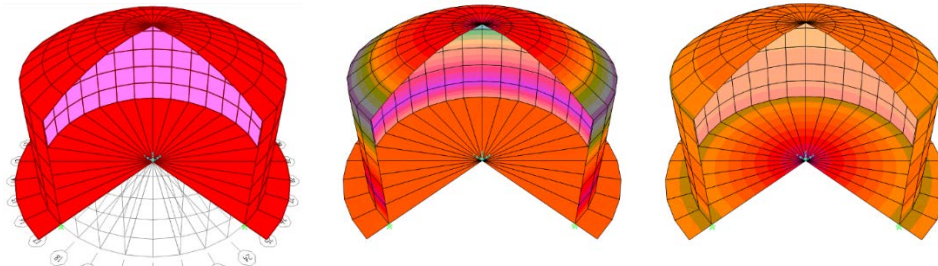


Figura 5. Modelo e idealización matemática del reservorio con fuste, cúpula y losa de fondo

Usando el análisis establecido por [13, 14], se plantea el siguiente valor de R en la ecuación (1), el mismo que se encuentra identificado dentro de la Figura 5 para la referencia del lector:

$$R = \frac{0.50(r^2 + f^2)}{f} \pi r^2 \quad (1)$$

Además, la altura de la cúpula se presenta en la ecuación (2), y se puede identificar en la Figura 6.

$$f = \sqrt{\frac{r^2}{9}} \quad (2)$$

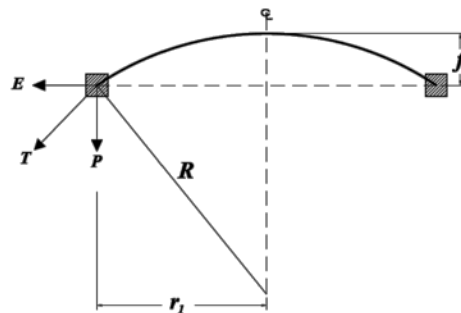


Figura 6. Geometría de la cúpula de un reservorio para los fines de análisis y dimensionamiento.

Se recomienda que, con el fin de que el oleaje del agua almacenada producido por el efecto de un sismo, no tenga efectos sobre la cúpula, la relación f/R de las ecuaciones a y b, deberían estar comprendidos entre los valores de 1/2 @ 1/5 [13].

La capacidad portante del suelo, como dato de referencia, será tomado de los estudios desarrollados en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno UNA Puno-Perú, en la cual se tiene lo siguiente:

- Capacidad admisible del suelo: $q = 2.35 \text{ kg/cm}^2$ $q_{Diseño} = 2.05 \text{ kg/cm}^2$
- Coeficiente de balasto: $K_b = 3.83 \text{ kg/cm}^3$ $K_{bDiseño} = 3.50 \text{ kg/cm}^3$

La presente propuesta de estudio, pretende contrarrestar la flexión que se produce a causa de las presiones hidráulicas en la losa del fondo del reservorio por el agua o fluido que esta contiene, las que fuerzan un

diseño a flexión, donde el acero es el encargado de darle la resistencia requerida tal como se aprecia en la Figura 7, por tanto se requiere evitar este exceso de flexión, y la forma de contrarrestarlo es con la construcción de un equilibrio estático en una primera etapa de diseño, ya para este fin se plantea la sustitución de la losa horizontal por una losa de fondo esférico cóncavo o por otra de forma cónica, forzando a la losa de fondo un comportamiento a compresión, donde el concreto intervendrá en la resistencia.

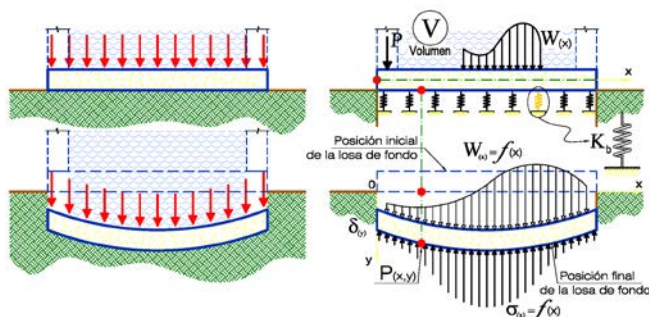


Figura 7. Efectos de la carga sobre la losa de fondo, y su efecto respuesta del coeficiente de *Balasto*.

3.2 Análisis de fondos de depósitos para líquidos

Bajo la prerrogativa mostrada, se procede a desarrollar el análisis de las dos propuestas esféricas y cónicas para fondo de reservorios, modelando su comportamiento y presentando un método de idealización para su análisis y solución matemática, utilizando la recomendación de [15, 16] que indica: *Calcular las fuerzas de los elementos a partir de la ecuación*, donde obtendremos las fuerzas de los elementos a partir de las ecuaciones de su modelo estático idealizado, para lo cual se aplicarán cálculos matemáticos iniciales, con las recomendaciones analíticas de [17], y la respectiva adaptación a las propuestas planteadas, tanto para fondos esféricos como fondos cónicos, que serían aparentemente y por experiencia constructiva, los más adecuados al momento de reproducir o proceder a la ejecución de una obra, existiendo facilidad tanto en s replanteo como en su control de calidad final, haciendo de estas alternativas las más fiables para los constructores, además de considerar las recomendaciones de [18], aunque no dudo que podría trabajarse con modelos parabólicos y posiblemente obtener mejores resultados pero que complicarían su proceso constructivo y de control al momento de la ejecución in situ.

3.2.1 Análisis de un fondo esférico

Para el análisis de este modelo en particular, debe plantearse iterar o estudiar diferentes curvaturas, aspectos que se toman en cuenta para decidirse por la mejor alternativa, teniendo una variación desde una elevación angular mínima de 10° al centro de la losa (equivale a 5° en base X), hasta alcanzar una máxima de 60° azimutal en base a Z (equivale a 30° en base X) mostrado en la parte inferior de la Figura 8, y considerando que el punto central de la curvatura hace una tangente con la horizontal y la medida es una línea hacia la base del fuste del reservorio, dichas alternativas de variación del fondo se muestra en el detalle de la Figura 9.

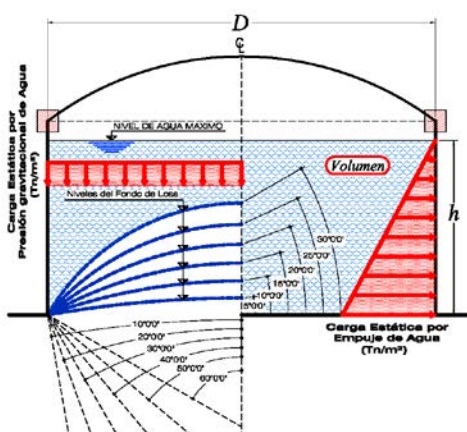


Figura 8. Variaciones de las propuestas de un fondo esférico en losa de fondo

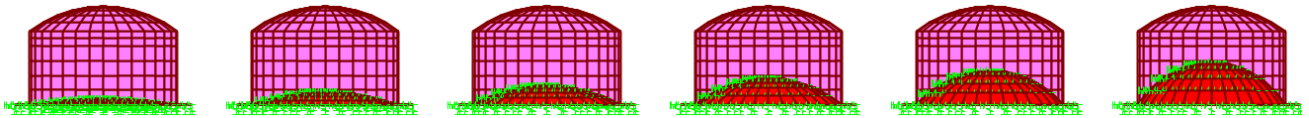


Figura 9. Implementación de los modelos matemáticos con fondo esférico

En el caso de fondos esféricos sometidos a presión de líquido; en nuestro caso el agua; que hay dentro del reservorio, teniendo en cuenta el corte S-S de la Figura 10 y considerando el volumen total disponible del reservorio que generará la carga para calcular el esfuerzo S_1 mostrado en la ecuación (3).

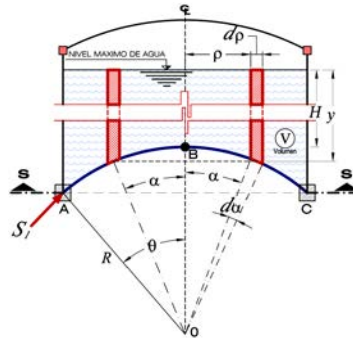


Figura 10. Análisis geométrico para fondo esférico de reservorio.

$$S_1 = \left[\frac{-\gamma H_2 O \cdot V}{2\pi \cdot R \cdot (\text{sen}^2 \theta)} \right] \quad (3)$$

Por tanto, el cálculo se basa en la determinación del volumen de agua disponible que actúa sobre la base, el cual es complicado de determinar, bajo esta premisa tomaremos una sección cilíndrica de radio ρ y espesor pequeño de $d\rho$ tal cual mostrado en la Figura 10, de tal forma que el diferencial de volumen se muestra en la ecuación (4), y será:

$$dV = 2\pi \cdot \rho \cdot d\rho \cdot y \quad (4)$$

Además, desarrollando un análisis en base a las consideraciones de la Figura 10 tenemos que:

$$\begin{aligned} \rho &= R \cdot \text{sen } \alpha \\ d\rho &= R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \\ y &= H + R(1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

Reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (4), se desarrolla la ecuación (6).

$$\begin{aligned} dV &= 2\pi \cdot R^2 \cdot (\text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha) \cdot [H + R(1 - \cos \alpha)] d\alpha \\ V &= \int_0^\theta dV = 2\pi R^2 \left[H \frac{\text{sen}^2 \theta}{2} + R \frac{\text{sen}^2 \theta}{2} + R \left(\frac{\cos^3 \alpha}{3} \right) \Big|_0^\theta \right] \\ V &= \pi R^2 \left[(H + R) \text{sen}^2 \theta + \frac{2}{3} R (\cos^3 \theta - 1) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (6) en la ecuación (3), el esfuerzo S_1 se muestra en la ecuación (7) en base a un análisis detallado.

$$\begin{aligned} S_1 &= \gamma \cdot \pi \cdot R^2 \left[\frac{(H+R) \cdot \text{sen}^2 \theta + \frac{2}{3} R (\cos^3 \theta - 1)}{2\pi \cdot R \cdot \text{sen}^2 \theta} \right] \\ S_1 &= -\frac{\gamma R}{2} \left[(H + R) - \frac{2}{3} R \frac{(1 - \cos^3 \theta)}{(1 - \cos^2 \theta)} \right] \\ S_1 &= -\frac{\gamma R}{2} \left[(H + R) - \frac{2}{3} R \left[1 + \frac{\cos^2 \theta}{(1 + \cos^2 \theta)} \right] \right] \\ S_1 &= -\frac{\gamma R}{2} \left[H + \left(\frac{R}{3} \right) - \left(\frac{2R}{3} \right) \left[\frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \right] \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Para el cálculo del esfuerzo S_2 mostrado en la ecuación (8), se deberá de tener en cuenta que $R_1 = R_2 = R$, además se usará la ecuación (7) para su desarrollo.

$$\begin{aligned}
 S_2 &= -S_1 + Z \cdot R \\
 S_2 &= \frac{\gamma R}{2} \left[H + \left(\frac{R}{3} \right) - \left(\frac{2R}{3} \right) \left[\frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} \right] \right] - \gamma R [H + R - R \cos \alpha] \\
 S_2 &= -\frac{\gamma R}{2} \left[H + \frac{5}{3} R - R \left(\cos \theta - \frac{2}{3} \left[\frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos \theta} \right] \right) \right] \\
 S_2 &= -\frac{\gamma R}{2} \left[H + \left(\frac{5}{3} \right) R (\cos \theta) \left[\frac{3 + 2 \cos \theta}{3(1 + \cos \theta)} \right] \right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

Donde:

$\gamma = \gamma_{H_2O}$: Peso específico del agua (1.00 Tn/m³).

V : Volumen total de agua disponible.

R : Radio de diseño de la base/fondo.

θ : Amplitud máxima AB del fondo.

ρ : Radio del cilindro diferencial.

H : Altura de agua existente sobre el punto (B).

y : Altura variable del cilindro diferencial.

α : Amplitud variable del cilindro diferencial.

Por ejemplo, para el punto B , tenemos: $\theta = 0$, y $\cos \theta = 1$

$$\begin{aligned}
 S_1^B &= -\frac{\gamma R}{2} \left[H + \left(\frac{1}{3} \right) R - \left(\frac{2}{3} \right) \left[\frac{1}{2} \right] R \right] \\
 S_1^B &= -\gamma R \left(\frac{H}{2} \right) \\
 S_2^B &= -\frac{\gamma R}{2} \left[H + \left(\frac{5}{3} \right) R - 2 \left[\frac{5}{6} \right] R \right] \\
 S_2^B &= -\gamma R \left(\frac{H}{2} \right)
 \end{aligned}$$

Tener en cuenta que cuando los valores de S_1 y S_2 son iguales, se puede resolver de la forma siguiente:

$$R_1 = R_2 = R, \text{ recordando que: } S_1 + S_2 + ZR; 2S_1 = -\gamma HR; S_1 = S_2 = -\gamma H \left(\frac{R}{2} \right)$$

3.2.2 Análisis de un fondo cónico

Para el análisis de la propuesta, se presenta una nueva alternativa que por su forma también es posible su construcción en obra, pero en este caso priman las pendientes, las cuales deben variar desde un valor mínimo de 5° a una máxima pendiente de 30° en base a X , tal como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Variaciones de las propuestas de un fondo cónico en losa de fondo

Para el modelado y como arte del análisis, se ha planteado desarrollar un sistema de variación del fondo de reservarlo como se muestra en la Figura 12, donde existe un límite funcional en la generación de la estructura, que podríamos considerar inviable a un nivel del 50% de la altura del fuste, pero que por cuestiones de análisis lo tomaremos en cuenta para analizar su comportamiento estructural.

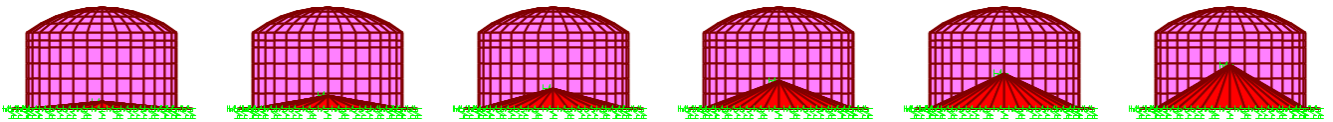


Figura 12. Implementación de los modelos matemáticos con fondo cónico

En el caso de fondos cónicos sometidos a presión de líquido o agua que hay dentro del reservorio, teniendo en cuenta el corte S-S mostrado en la Figura 13, a una distancia y del vértice B, se considera el volumen total disponible mostrado en la ecuación (9), tomando en cuenta el siguiente análisis.

$$\begin{aligned}
 V &= (\text{Volumen}_{\text{cilíndrico}}) - (\text{Volumen}_{\text{del cono}}) \\
 V &= \pi r^2(H + y) - \frac{1}{3} \pi r^2 y \\
 V &= \frac{\pi r^2}{3} (3H + 3y - y) \\
 V &= \frac{\pi r^2}{3} (3H + 2y) \quad (9)
 \end{aligned}$$

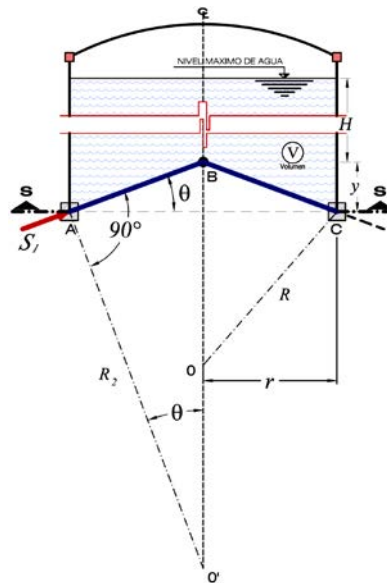


Figura 13. Análisis geométrico para fondo cónico de reservorios

El cálculo se basa en la determinación del volumen de agua disponible que actúa sobre la base, tomando una sección cilíndrica de radio ρ y espesor diferencial $d\rho$ según la geometría mostrada en la Figura 13, de tal forma que obtenemos el valor de S_1 en la ecuación (10), según el siguiente procedimiento.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{-\gamma_{H_2O} \pi r^2 (3H + 2y)}{3(2\pi r \text{sen } \theta)} \\
 S_1 &= (3H + 2y) \left[\frac{-\gamma_{H_2O} y \text{cotg } \theta}{6(\text{sen } \theta)} \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

Para el cálculo del esfuerzo S_2 mostrado en la ecuación (11), tenemos el siguiente procedimiento.

$$\begin{aligned}
 S_2 &= ZR_2 = Z \left(\frac{r}{\text{sen } \theta} \right) = - \left(\frac{\gamma_{H_2O} (H + y)}{\text{sen } \theta} \right) y \text{cotg } \theta \\
 S_2 &= -\gamma_{H_2O} y(H + y) \left[\frac{\text{cotg } \theta}{\text{sen } \theta} \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

Donde:

$\gamma = \gamma_{H_2O}$: Peso específico del agua (1.00 Tn/m³).

V: Volumen total de agua disponible.

H: Altura de agua existente sobre el punto (B).

y: Altura de la sección cónica.

r: Radio de diseño del fuste de reservorio.

θ : Pendiente de diseño de la base cónica AB (sirve para calcular R_2).

En el caso del punto B, tenemos que $S_1^B = 0$, de la misma forma, se puede notar que para $y = 0$, tenemos $S_2^B = 0$. Analizando adecuadamente, se puede deducir que el esfuerzo máximo se obtiene en el borde inferior A y C.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para desarrollar una comparación de resultados, el análisis del elemento elegido para el modelo de estudio se aplicaron las recomendaciones de [11, 15, 16], por lo que utilizaremos un modelado matemático por la complejidad y cantidad de datos a analizar en una estructura 3D del reservorio, con un análisis de elementos tipo *Shell* modelados en un software, desarrollando una formulación isoparamétrica que incluye rigidez a desplazamientos en el plano del elemento. De toda la data obtenida, únicamente se tomarán fuerzas y momentos, además de la propuesta matemática de refuerzo estructural.

Los ejes locales y numeración de nodos están formulados de acuerdo a [19], ya que el procedimiento utilizado en el análisis estructuras 3D en el método de elementos finitos comprende varios pasos y para su procesamiento.

Después de aplicar las condiciones de cargas nodales y condiciones de frontera en los soportes, es necesario realizar el proceso de compilado a esta etapa se le conoce como procesamiento, en el cual es necesario realizar la construcción de las matrices de rigidez para cada elemento, seguido de un ensamble global de matrices de rigidez que representa la configuración geométrica y rigidez de la estructura global, posteriormente se colocan los valores de carga y condiciones de frontera en los vectores de fuerza y desplazamiento, finalmente se resuelve el sistema matricial, cada una de las etapas del procesamiento [20].

Por tanto, realizando un análisis del fondo de reservorios por elementos finitos, se presentan los resultados de la respuesta estructural en la Figura 14, para momentos máximos, iniciando con un modelo preliminar de referencia de una losa horizontal mostrado en la Figura 14(a) y desarrollando variaciones con fondo esférico en las Figuras 14(b-g), variaciones con fondo cónico en las Figuras 14(h-m), este análisis ha variado la forma de la losa de fondo tanto para modelos esféricos tal como se mostró en los cortes de la Figura 9, como para fondos cónicos según lo mostrado en los cortes de la Figura 11.

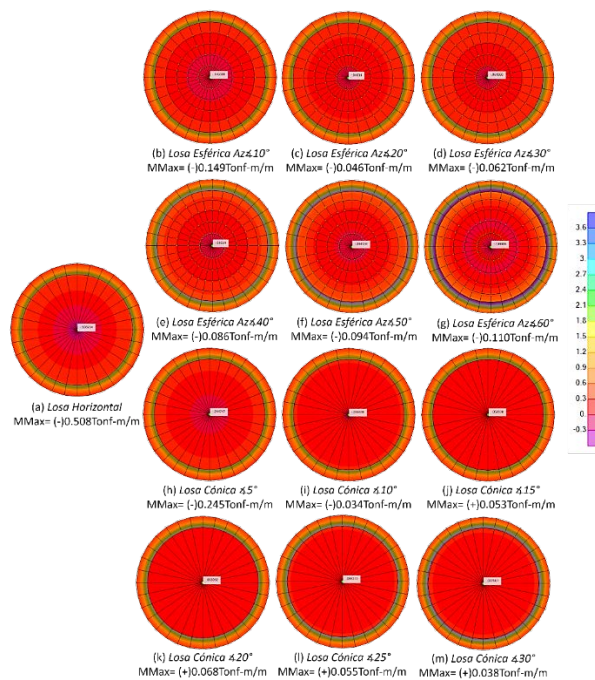


Figura 14. Modelado de momentos máximos en fondos esféricos (superior) y cónicos (inferior) en unidades Tonf-m/m

La variación de momentos se identifica con la presentación entre colores cercanos al rojo para valores negativos máximos y al azul para valores positivos máximos, en unidades Tonf-m/m por tratarse de elementos tipo *área* o *Shell*.

Para la evaluación de la variación de momentos máximos tal como se muestra en la Figura 15, podemos identificar que el comportamiento más óptimo se presenta en una losa de fondo cónico con pendiente de 10° en base X y en losa de fondo esférico con ángulo de 20° azimutal en base Z según los detalles geométricos mostrados en las Figuras 9 y Figura 12, en cuyos dos casos, los momentos llegan a un valor muy cercano a cero, en realidad podemos notar que posterior a este límite de los 10° para fondo cónico los momentos se hacen positivos (línea azul), y en el caso del fondo esférico por encima de los 20° se mantienen en un rango negativo (línea roja) pero se incrementan ligeramente.

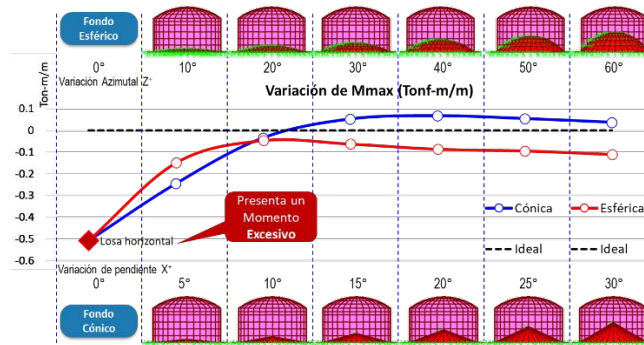


Figura 15. Variación de momentos máximos según ángulos pendientes (Tonf-m/m)

Del mismo modo, realizando un análisis del fondo de reservorios, se presentan los resultados de la respuesta estructural para esfuerzos máximos en la Figura 16, iniciando con un modelo preliminar de referencia de una losa horizontal mostrado en la Figura 16(a) y desarrollando variaciones en las Figuras 16(b-g) y las Figuras 16(h-m), este análisis ha variado la forma de la losa de fondo tanto para modelos esféricos tal como se mostró en los cortes de la Figura 9, como para fondos cónicos según lo mostrado en los cortes de la Figura 12.

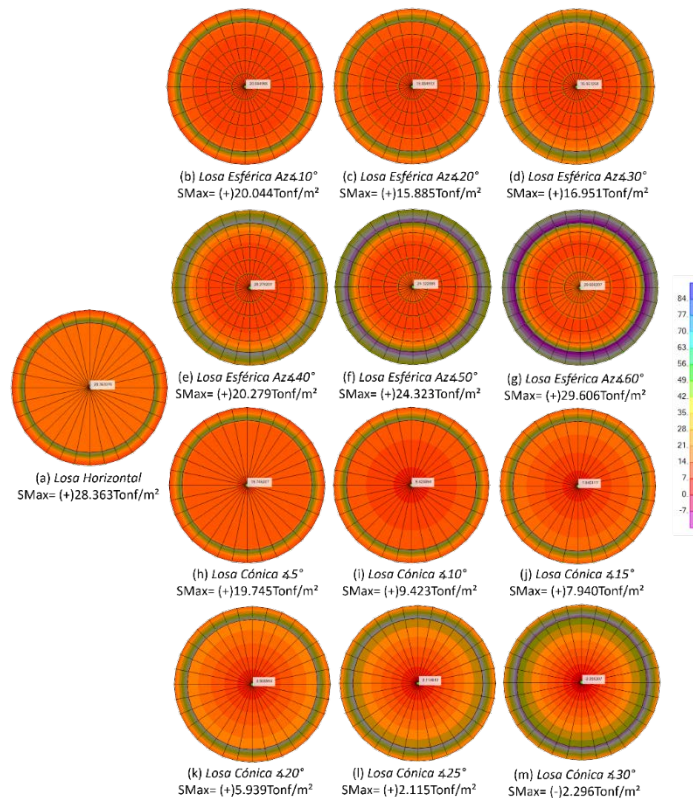


Figura 16. Modelado de esfuerzos máximos en fondos esféricos y cónicos (Tonf/m²)

Según la evaluación de la variación de esfuerzos máximos, podemos identificar que el comportamiento óptimo tal como se muestra en la Figura 17, es la losa cónica con pendiente entre 25° y 30° en base X, llegando a valores cercanos a cero. En el caso de la losa de fondo esférico, el mejor comportamiento se

encuentra en la losa con variación angular 20° en base azimutal Z según lo mostrado en la geometría de la Figura 9, luego continúa incrementando hasta llegar al valor similar que aparecería en una losa de fondo plano. Hay que considerar que, para este resultado, obviamente en forma teórica deberíamos optar por la losa cónica, aunque el proceso constructivo resultaría complejo, esto debido a los efectos de la gravedad en la mezcla de concreto, por lo que es necesario continuar analizando otras implicancias para tomar una decisión correcta.

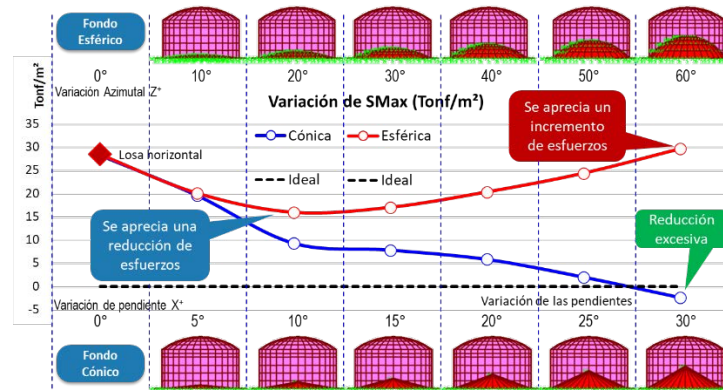


Figura 17. Variación de esfuerzos máximos según ángulos pendientes (Tonf/m²)

Finalmente, además de los resultados previos, es necesario verificar el requerimiento de refuerzo estructural en base a las consideraciones de [21] y el espesor, la cual está definido por la ecuación (12).

$$e = \left[\frac{6M}{0.85 b \sqrt{f'c}} \right]^2 \quad (12)$$

Y en el acero teórico requerido se muestra en la ecuación (13), y debería considerarse.

$$A_s = \left[\frac{M}{f_s j d} \right]^2 \quad (13)$$

Por lo cual, de acuerdo al modelo matemático, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18, tanto para losas con fondo esférico mostrados en las Figuras 8(b-g), como para fondo cónicos mostrados en las Figuras 8(h-m), usando siempre la referencia de la losa de fondo plano u horizontal mostrado en la Figura 8(a). El incremento de refuerzo estructural en unidades de área por longitud, se presenta en una variación colores que van del rojo al azul, en unidades m²/m por tratarse de elementos tipo *área* o *Shell*.

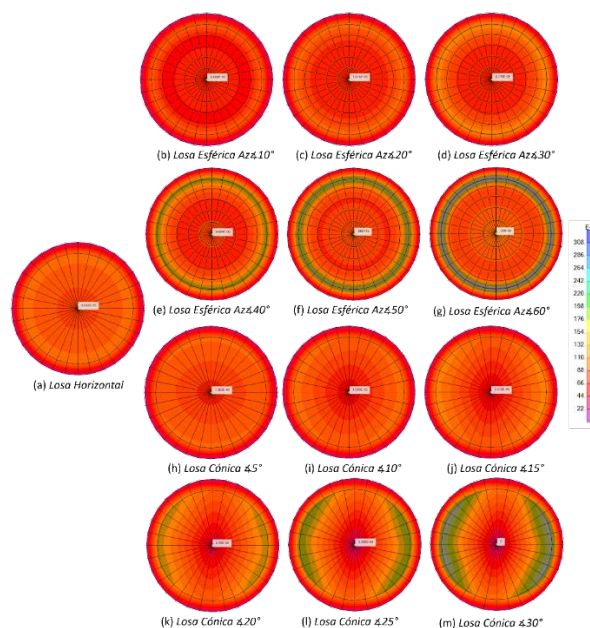


Figura 18. Modelado de refuerzos estructurales en fondos esféricos y cónicos (m²/m)

Según la evaluación de refuerzo estructural por unidad de longitud *área/metro*, podemos identificar que para un fondo esférico en las curvas rojas de la Figura 19 que a medida que se incrementa el ángulo azimutal de la losa esférica, también se incrementa el refuerzo en el centro de luz (CL) y en el apoyo del muro o fuste el cual se incrementa aún más, identificando un punto ideal mínimo en el ángulo ideal de curvatura entre 10° y 20° en base azimutal Z, de acuerdo al detalle geométrico mostrado en la Figura 8.

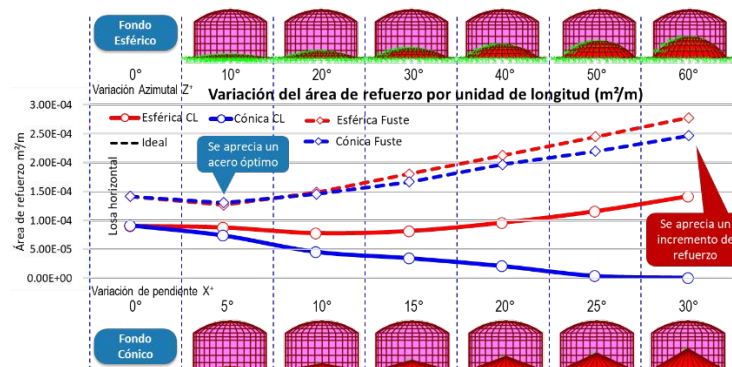


Figura 19. Variación de refuerzo estructural en zona más crítica de losa (m^2/m)

En el caso de losa cónica, ocurre lo opuesto, ya que en las curvas azules de la Figura 19 se puede apreciar una reducción significativa a medida que se incrementa la pendiente, ya que se reduce en refuerzo en el centro de luz (CL), por tanto se requiere menor refuerzo y es el concreto el cual absorbe todos los esfuerzos, pero en contraparte el refuerzo requerido, en el apoyo del muro o fuste, el refuerzo se incrementa, pudiendo identificar una pendiente ideal del 5° en base X, de acuerdo al detalle geométrico de la Figura 11.

Esto último hace notar que, aunque reducimos el acero de la losa de fondo, el acero del fuste se hace anti económico y ya que el reglamento nos exige la colocación de acero de refuerzo mínimo, se optó por un punto de análisis que equilibre tanto la reducción del acero en la losa como en el fuste, ha allí el sustento de escoger el punto ideal a 5°.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio teórico desarrollado, se ha llegado a la conclusión de que es posible determinar los valores S_1 y S_2 mediante una ecuación (ecuaciones (7) y (8)) para fondo esférico, y ecuaciones (10) y (11) para fondos cónicos), que contemplan las propiedades físicas y geométricas del reservorio.

Además de acuerdo al modelo matemático se pudo identificar que, en las losas de fondo esférico cóncavo, la que se comporta de forma ideal tiene un ángulo de curvatura azimutal en base al eje Z de entre 10° y 20° de variación entre fuste y centro de luz (5° y 10° en base X). Y en el caso de losas cónicas, el que se comporta mejor es la propuesta con pendiente entre 5° y 10° en base al eje X de, variación entre fuste y centro de luz.

Se deberá considerar ambas propuestas por ser similares en variación angular, además para realizar el control del proceso constructivo sería bueno optar por fondos cónicos ya que los fondos esféricos requieren un mayor cuidado en el control de la curvatura y el acabado.

Además, se recomienda que adicionalmente a la interacción líquido-estructura, se debería considerar en estudios futuros, una interacción suelo-estructura, pudiendo incluir los efectos dinámicos del agua, así como la reacción dinámica del terreno de fundación, por lo cual dejamos abierta esta posibilidad, aunque podríamos aventurarnos a decir que los resultados serán concordantes a las alternativas analizadas.

REFERENCIAS

- [1] CEPIS. "Guías para el diseño de reservorios elevados de agua potable". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Ed. Lima: OPS/CEPIS/05.160 UNATSABAR. Perú, 2005.
- [2] Ayuga E. "La Formación del Ingeniero Iberoamericano". In *Actas del IV Congreso de la Asociación Iberoamericana de Instituciones de Enseñanza de la Ingeniería*, Madrid, España, 2003.

- [3] Metaute P. y Flórez G. "Diagnóstico sobre el desarrollo de competencias en los Ingenieros de Uniremington: Un aporte para la construcción de Estrategia Pedagógica, acorde a los retos de la ingeniería para el siglo XXI". En *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. Serna E. (2da Ed.). Ed. Antioquia: Instituto Antioqueño de Investigación, 2017, Cap.20, p. 306. Medellín, Antioquia, Colombia.
- [4] Ramos J. "*Análisis y diseño de reservorio circular apoyado de concreto armado*". Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2021. Recuperado: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18566>
- [5] Lima E. "Aplicación del C.A.E. en ingeniería estructural". En *Ingeniería* 12 (1,2): pp. 61-68, 2002. San José, Costa Rica.
- [6] Dvorkin E.N. y Bathe K-J. "Análisis de estructuras laminares generales utilizando el método de elementos finitos". En *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 3, 1, pp. 23-52. 1978. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- [7] Riccitelli J.N. "*Teoría de las cáscaras cilíndricas: aplicación al proyecto de silos de hormigón armado*". Tesis de grado, Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, pp. 29,46, Argentina, 2016. Recuperado: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/teoria-cascaras-cilindricas-silos.pdf>
- [8] UNAM. *Laboratorios de Ingeniería Civil*. Programa de Ingeniería Civil. Manual de prácticas de Laboratorio. Ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [9] Pasmin G. y Ximena O. "*Manejo del conocimiento en los cuadernos de laboratorio*". Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Bogotá D.C., Colombia, 2011.
- [10] Peña L., Soto L. y Mariño O. "La modelación matemática como estrategia pedagógica para la resolución de problemas de optimización para estudiantes de ingeniería". En *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. Serna E. (2da Ed.). Ed. Antioquia: Instituto Antioqueño de Investigación, 2017, Cap. 24, p. 361. Medellín, Antioquia, Colombia.
- [11] CSI, *SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Basic Analysis Reference. Volume 1, Version 7.0, p. 33. Ed. Berkeley: Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, 1998.
- [12] Agüero R. "Guía para el Diseño y Construcción de Reservorios Apoyados", *Organización Panamericana de la Salud*, Ed. Lima: OMS, OPS/CEPIS/04.108 UNATSABAR, Perú, 2004.
- [13] Calsin G. y Vitulas Y. "Interacción Líquido Estructura". En *El Ingeniero*. Revista del CIP, Año 1, Nº 1, pp. 35-37, Junio de 2008, Puno, Perú.
- [14] Copa Pineda F. y Gonzales Salas E. "*Modelo Para la Interacción Líquido Estructura en Forma Espacial*". 1999.
- [15] Wilson E. "Three - Dimensional Dynamic Analysis of Structures". Ed. Costa Rica: Computers and Structures, Inc., Costa Rica, 1997.
- [16] Wilson E. "Three - Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures". Ed. Berkeley: Computers and Structures, Inc., California, USA, 2000.
- [17] Villafañe E. y López D. "Estructuras laminares, teoría y aplicaciones". Ed. Mendoza: UNC, Facultad de ingeniería, Mendoza, Argentina, 2002.
- [18] Belluzi O. "*Scienza delle Costruzioni*". Vol. III, Ed. Nicola Zannichelli, Bologna, Italia, 1957.
- [19] Further. "*Further information and copies*", Ed. Berkeley: Computers and Structures, University Avenue, Berkeley, California, USA, 1995.
- [20] Paz M., Villegas J. y Castillo A. "Desarrollo de Software para Análisis Estructural con Elementos Tipo Barra en 3D Utilizando MATLAB". En *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. Serna E. (3ra Ed.). Ed. Antioquia: Instituto Antioqueño de Investigación, 2018, Cap.10, pp. 89-90. Medellín, Antioquia, Colombia.
- [21] Harmsen E. y Mayorca J. "Diseño de estructuras de concreto armado", Ed. Lima: Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2000.

Comparación de las características de respuesta ante un sismo entre un sistema de concreto armado y uno de estructuras metálicas

Daniel Jesús Mitac Rivera¹
José Darío Gonzáles Zarpán²
Carlos Jordy Pérez Garavito³
Universidad Privada San Juan Bautista
Perú

La presente investigación se realizó por la necesidad que existe de crear un nuevo pabellón que sea seguro frente a un sismo severo, y para analizar y comparar un sistema estructural convencional como el concreto armado y un sistema menos difundido como el de estructuras metálicas. El tipo de investigación utilizada es cuantitativa debido a que se puede cuantificar las variables, y se identifican, planifican y controlan para optimizar los recursos para cada caso. El nivel de investigación es descriptivo-explicativo, porque se describe las características de los sistemas estructurales a comparar, con fundamento en la teoría del diseño estructural, y es explicativa porque a través de los resultados se explican el tipo de fenómeno ocurrido para cada caso y se comparan en su diseño estructural. El diseño de recolección de datos es no-experimental, porque sus variables no son manipuladas, se describen y se analizan en un solo momento. De acuerdo con lo antes mencionando, el proyecto parte desde la ubicación, donde se realizó un comparativo de dos diseños de pabellones de aulas de las mismas características, pero de diferente sistema estructural, uno en concreto armado y otro en estructuras metálicas. Para ambos diseños se emplearon los mismos datos: suelo, uso, cantidad de pisos, altura entresijos y zonificación sísmica. En esta investigación, la población intervenida es el área total de la I.E. Daniel Merino Ruiz en el distrito de La Tinguiña, Ica, Perú, y la muestra comprende el área donde se realizará el análisis comparativo entre los dos sistemas estructurales, por lo que el tipo de muestreo utilizado es el no-probabilístico por conveniencia.

¹ Contacto: daniel.mitac@upsjb.edu.pe

² Contacto: josed.gonzales@upsjb.edu.pe

³ Contacto: carlos.perezg@upsjb.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la I.E. Daniel Merino Ruiz se ubicada en el distrito de la Tinguiña, en Ica, Perú, con más de 50 años de creación y cuenta con 14 pabellones, 3 se encuentran habitables y 11 son inhabitables debido a daños en su estructura como las fisuras que son visibles en sus columnas. Los pabellones son inhabitables debido a una falta de renovación en su estructura que dificulta la capacidad de albergar a los estudiantes, al personal docente, administrativo y de limpieza. Las posibles causas para que estos pabellones se encuentren inhabitables son:

- No se utilizaron programas de análisis estructural para su diseño profesional.
- No se tomaron en cuenta los estudios de suelos o factores sísmicos.
- El Reglamento Peruano no estaba muy desarrollado para el momento del diseño estructural.

Las consecuencias de esta problemática sería que no se realizaría una formación académica a los estudiantes, por lo que la I.E. Daniel Merino Ruiz no podría garantizar ni ofertar un servicio educativo de calidad. Es por ello que es necesario tomar un área libre de la I.E. Daniel Merino Ruiz para crear un nuevo pabellón de aulas que cumpla satisfactoriamente con los requerimientos estructurales del Reglamento Nacional de Edificaciones.

Se realizará un análisis comparativo entre los sistemas constructivos de concreto armado y de estructuras metálicas con el fin de comparar resultados en su comportamiento estructural y determinar qué sistema estructural es el más factible usar para albergar a los estudiantes, al personal docente, administrativo y de limpieza en este nuevo pabellón.

En lo que respecta a la elección de los sistemas constructivos a comparar se decidió por el Sistema de Concreto Armado debido a que existe una predominancia de este sistema en las construcciones de pabellones de aulas para los colegios. Se decidió también por el Sistema de Estructuras Metálicas debido a que en los últimos años se han realizado proyectos como Patios de Instituciones Educativas, Losas Deportivas con Cobertura Metálica, Centros Comerciales y Hospitales, así que es una alternativa para poder implementar en los diseños estructurales de los pabellones de aulas en los colegios.

Esta comparación entre estos dos sistemas constructivos se realizará a través de los programas estructurales ETABS, SAP 2000 y SAFE, con la finalidad de determinar cuál sistema estructural tiene un mejor un comportamiento frente a un sismo severo.

La investigación tendrá una relevancia social debido a que el análisis comparativo generará un antecedente de investigación con respecto a que sistema estructural es el más adecuado utilizar para futuras construcciones de pabellones de aulas en diferentes instituciones educativas a nivel inicial, primaria y secundaria tanto privadas como públicas.

La investigación también tendrá una relevancia personal y profesional debido a que permitirá nuevos conocimientos en la comparación de resultados de los sistemas de Concreto Armado y de Estructura Metálica, donde se determinara cual sistema tiene mejor comportamiento estructural frente a un sismo severo para el diseño del nuevo pabellón de aulas de 2 niveles de la I.E. Daniel Merino Ruiz ubicado en el distrito de La Tinguiña en Ica, Perú.

2. MÉTODO

El tipo de investigación es cuantitativa, debido a que se pueden cuantificar las variables, se identifican, se planifican y se controlan para optimizar los recursos para cada diseño estructural.

El nivel de investigación es descriptivo-explicativo; debido a que se describen las características de los sistemas estructurales a comparar, fundamentada en la teoría del diseño estructural. Es explicativa porque a través de los resultados se explican el tipo de fenómeno ocurrido para cada caso y los compara en su diseño estructural.

El diseño de recolección de datos es no experimental, debido a que las variables no son manipuladas, se analizan en un solo momento por lo que su recolección de datos es única.

La población considerada para la investigación es el área total de la I.E. Daniel Merino Ruiz del distrito de La Tinguiña – Ica.

La muestra comprende el área de un nuevo pabellón de aulas en la I.E. Daniel Merino Ruiz el distrito de La Tinguiña – Ica. En esta área se realizará el análisis comparativo entre los sistemas estructurales de concreto armado y de estructuras metálicas en el diseño de un nuevo pabellón de aulas de 2 niveles (Figuras 1 y 2).

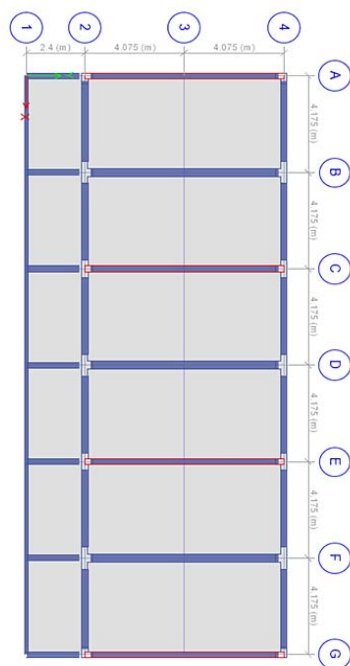


Figura 1. Vista en planta del modelamiento

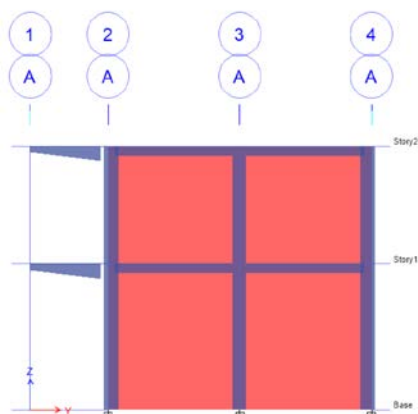


Figura 2. Vista en elevación del modelamiento

3. RESULTADOS

La presente investigación se encuentra dentro del área de la I.E. Daniel Merino Ruiz ubicada en Av. Paris #920 del distrito de La Tinguiña, Provincia y Departamento de Ica en Perú. Se realiza un análisis comparativo para dos casos de sistemas estructurales en el diseño de un pabellón de aulas de 2 niveles, incluyendo baños y también escalera.

El diseño estructural se define como una mezcla de Arte y Ciencia que combina los sentimientos intuitivos del ingeniero con los principios de la Estática, Dinámica, Mecánica de Materiales y el Análisis Estructural, para producir una estructura segura que sirva sus propósitos [1].

En el primer caso de investigación se realiza un diseño estructural con el sistema de concreto armado y en el segundo caso se realiza un diseño estructural, pero con el sistema de estructuras metálicas (Figura 3).

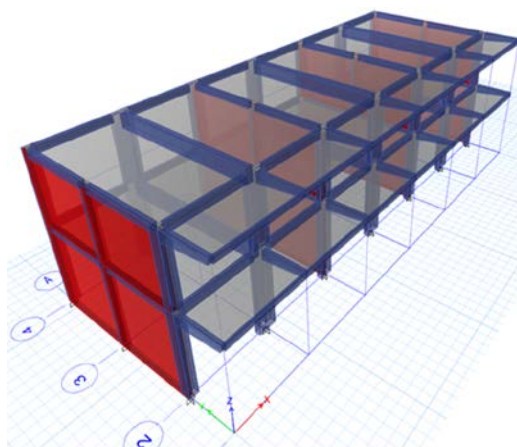


Figura 3. Vista en 3D del modelamiento

Finalmente se comparan sus resultados y se determina cual tiene un mejor comportamiento frente a un sismo severo. Las principales características del proyecto son las siguientes:

- Área total de la Institución Educativa = 56,920.22 m²
- Área del terreno del nuevo pabellón = 360.80 m²
- Área diseñada del nuevo pabellón = 721.60 m²

El concreto armado se define como material de construcción predominante en casi todos los países del mundo. Esta aceptación universal se debe en parte, a la disponibilidad de los elementos con los cuales se fabrica el concreto armado: grava, arena, cemento, agua y barras de refuerzo. También se debe a su economía, en comparación con otros materiales de construcción, y a la facilidad con la cual mientras el concreto se encuentra en estado plástico, puede colocarse en los encofrados y moldes casi de cualquier forma y tamaño [2].

Mientras que la estructura metálica se define como un material de fabricación industrializada, lo que asegura un adecuado control de calidad. Este material se caracteriza por una elevada resistencia, rigidez y ductilidad, por lo cual su uso es muy recomendable para construcciones sismo-resistentes [3].

Los principales resultados a comparar son las fuerzas cortantes, que no es más que la aplicación de la fuerza del sismo a un nivel de piso determinado y que se va acumulando a medida que se acerca a la base de la edificación [4], en este caso es el pabellón de aulas. Esta aplicación de fuerzas cortantes provoca distorsiones de entrepiso para cada eje tanto X como Y por lo que sería otro factor a comparar.

También se comparan los esfuerzos máximos de cada elemento estructural que es un parámetro límite para que no exista deformación plástica para ningún elemento. Por último, se comparan las dimensiones escogidas de los elementos estructurales para cada diseño (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados obtenidos

Ítem	Descripción	Concreto armado	Estructura metálica
1	Promedio de Fuerzas Cortantes		
1.1	Piso 2 - Eje X	23.5 Ton	16.4 Ton
1.2	Piso 1 - Eje X	11.22 Ton	7.5 Ton
1.3	Piso 2 - Eje Y	20.75 Ton	14.98 Ton
1.4	Piso 1 - Eje Y	9.81 Ton	8.9 Ton
2	Promedio de distorsiones de entrepiso		
2.1	Piso 1 - Eje X	0.00004	0.004
2.2	Piso 2 - Eje X	0.00015	0.005
2.3	Piso 1 - Eje Y	0.0002	0.0025

2.4	Piso 2 - Eje Y	0.00026	0.004
3	Esfuerzos máximos		
3.1	Axial (N)	142.6 Ton	115.05 Ton
3.2	Cortante (V)	8.1 Ton	7.55 Ton
3.3	Momento Flector (M)	7.96 Ton-m	6.96 Ton-m
4	Dimensiones máximas de elementos estructurales		
4.1	Zapata	1.80X1.80 m	1.60 X 1.60 m
4.2	Vigas	35X70	W12"X40"
4.3	Columna	T 0.75X0.45X0.25	HSS 12x12x5/16"
4.4	Losa	0.20 m	0.20 m

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el cálculo de fuerzas cortantes sísmicas demuestran que el sismo afecta en mayor magnitud al pabellón de aulas de concreto armado que al pabellón diseñado en estructuras metálicas.

Los resultados obtenidos en las distorsiones de entrepiso demuestran que existe un mejor desempeño del acero estructural que el concreto armado, debido a que la relación máxima comparada con su límite es menor.

Los resultados obtenidos en los esfuerzos máximos demuestran que la estructura de concreto armado se ve más afectado por las cargas actuantes que la estructura metálica del pabellón de aulas.

Los resultados obtenidos en las dimensiones de los elementos estructurales de concreto armado son mayores que las de estructura metálica.

5. CONCLUSIONES

Se concluye que el pabellón de aulas diseñado con Estructuras Metálicas tiene un mejor comportamiento frente a sismo severo que el de Concreto Armado debido a que se utilizaron materiales más resistentes a las cargas sísmicas, donde se pueden cubrir grandes luces en las vigas, tiene menos peso estructural y menores desplazamientos laterales frente a sismos.

Se compararon los parámetros sísmicos de los sistemas de concreto armado y de estructuras metálicas y se concluyó que en ambos sistemas se utilizaron los mismos datos como el tipo de suelo, zonificación sísmica, factor de uso, cantidad de piso, altura de entrepiso, sobrecargas y periodo fundamental de vibración, pero se diferencian en el coeficiente de reducción sísmica y en el cálculo del peso estructural.

Se compararon los resultados del análisis sísmico de ambos sistemas estructurales y se concluye que el peso total del pabellón diseñada en acero es menor que el de concreto armado, por lo que estará sometida a menor fuerza cortante sísmica, y esto repercute en el diseño de elementos estructurales donde en el Sistema de Estructuras Metálicas se utilizaron dimensiones menores que en el Sistema de Concreto Armado.

Se concluye que las dimensiones de los elementos estructurales de acero son menos pesadas y por sus propiedades elásticas resisten grandes esfuerzos.

Se concluye que no existe una única solución a una cuestión de un sistema estructural determinada, sino que para cualquier diseño en pabellones de aulas existen diferentes estructuras posibles; por lo que la solución que resulte más adecuada para cada caso específico está en función de determinados criterios técnicos.

REFERENCIAS

- [1] L. Zapata, «Introducción,» de *Diseño Estructural en Acero*, Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, 1994, p. 1.

- [2] G. Ottazi, «Introducción,» de *Diseño en Concreto Armado*, Lima, Asociación Capitulo Peruano del Instituto Americano del Concreto, 2013, p. 2.
- [3] F. J. Crisafulli, «Introducción,» de *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*, Mendoza, Asociación Latinoamericana del Acero, 2018, p. 17.
- [4] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, «Norma Técnica E030 Diseño Sismorresistente,» de *Reglamento Nacional de Edificaciones*, Lima, Megabyte, 2018, p. 5.

Análisis comparativo de agregados buscando mejorar la resistencia y durabilidad del concreto

Verónica Hillary Figueroa Cuba¹

Jean Carlos Meza Palomino²

Raúl Andrés Terrazas Ramos³

Alba Cristina Vides Berdugo⁴

Universidad Privada San Juan Bautista

Perú

Esta investigación se realizó dada la importancia que tienen los agregados en la elaboración de un concreto que cumpla con los estándares de calidad, necesarios para ofrecer a los clientes productos resistentes y duraderos para la construcción de viviendas. Se seleccionaron y compararon las dos canteras más importantes que proveen de agregados a las obras en la provincia de Chincha, Perú. Se trata de una investigación aplicada y experimental, en la que se toman los procedimientos estandarizados por las normas técnicas peruanas, el Instituto Americano del Concreto y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, que sirvieron para un adecuado estudio de las propiedades, tanto físicas como mecánicas, de los agregados de las dos canteras. Las canteras seleccionadas fueron 01-C&C del sur y 02-Giurfino, y luego se determinó la más adecuada para realizar el diseño de concreto con base en los resultados de los ensayos de laboratorio: extracción y muestreo de agregados en cantera, reducción de muestra por cuarteo, contenido de humedad, cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) por lavado, granulometría, peso unitario compactado de agregado grueso, peso específico y absorción. Luego se realiza el diseño de mezcla teniendo como base los lineamientos que recomienda el Instituto Americano del Concreto ACI, obteniendo las proporciones para la mezcla de concreto de una resistencia de $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$, el cual ofreció, en estado fresco, una buena cohesión, revenimiento y homogeneidad, sin exudación, ni segregación; y en estado endurecido un buen acabado, sin exceso de poros y una alta resistencia que brinda durabilidad.

¹ Contacto: veronica.figueroa@upsjb.edu.pe

² Contacto: jean.meza@upsjb.edu.pe

³ Contacto: raul.terrazas@upsjb.edu.pe

⁴ Contacto: alba.vides@upsjb.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo de la construcción, el concreto juega un papel sumamente importante, ya que la mayoría de las obras que nos rodean han sido hechas con este material, por lo cual reconocemos la importancia de tener un concreto óptimo, que cumpla con los estándares de calidad necesarios para ofrecer a la población concretos resistentes y duraderos.

Por consiguiente, vimos conveniente seleccionar dentro de nuestra provincia de Chíncha, Ica, Perú, entre dos canteras de agregados que cumplan con el reglamento nacional e internacional y determinamos la más óptima para realizar nuestro diseño de concreto.

Nos hemos planteado Analizar y evaluar las distintas canteras para obtener el agregado de mejor calidad y poder diseñar un concreto duradero y resistente, además de obtener un concreto óptimo en estado fresco: teniendo buena trabajabilidad para facilitar la colocación, homogéneo, cohesivo, sin exudación ni segregación, Controlar la temperatura de hidratación evitando la formación de fisuras según las normas [1]. Contar con un concreto con un grado de alcalinidad aceptable. Obtener concreto óptimo en estado endurecido: buen acabado, con baja permeabilidad al tener menos capilares, resistente y duradero.

Un adecuado estudio de las propiedades tanto físicas y mecánicas de los agregados conlleva a una mejor aplicación de la ingeniería en la construcción; sin embargo, no existe una adecuada exploración de los agregados utilizados en las obras civiles.

La investigación de este trabajo se realizó por el interés de demostrar cuál es la diferencia entre la utilización de una cantera llamada 01-C&C del sur y 02-Giurfino, la utilización de los agregados es una parte fundamental de las obras civiles, además de conocer sus propiedades.

La investigación se realizó mediante ensayos de laboratorio teniendo en cuenta nuestros procedimientos estandarizados, por las Normas Técnicas Peruanas NTP, del Instituto Americano del Concreto ACI y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales ASTM, para conocer de manera experimental la diferencia entre el uso de los diferentes agregados tanto agregado grueso y fino, mediante el desarrollo de ensayos de laboratorio tales como: reducción de muestra por cuarteo [2, 3], contenido de humedad [4], granulometría [2, 5, 6], peso específico y absorción del agregado fino, para luego, con esos resultados, realizar el diseño de mezcla basadas en la norma [7], obteniendo las proporciones adecuadas para las diferentes mezclas de concreto.

2. MÉTODO

El tipo de investigación es aplicada, debido a que se usa conceptos teóricos y los aplica en los diseños a través de programas de Excel que servirán para determinar cuál ensayo tendrá mejor resultado en la utilización de los agregados es una parte fundamental de las obras civiles, conociendo sus propiedades.

El nivel de la presente investigación es explicativo – pre experimental se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones.

La población considerada para la investigación es para las obras de mega construcciones y autoconstrucciones a nivel del distrito Chíncha en Perú.

La muestra conformada para la investigación en obras de mega construcciones y autoconstrucciones a nivel del distrito Chíncha en Perú. En la zona se concretará el comparativo de las dos canteras 01-C&C del sur y 02-Giurfino, para la realización del diseño de los agregados.

3. RESULTADOS

A continuación, se muestra los resultados de los análisis físicos realizados a los agregados finos y gruesos de las dos canteras que se están comparando.

3.1 Características físicas de agregado fino- ASTM C 128-04 A

Muestra: Agregado Fino
 Procedencia: Cantera 01-C & C del sur
 Ubicación: Pueblo Nuevo -Chincha - Ica

Ensayo de granulometría al agregado fino de una muestra de 432.5 gr, este agregado tiene un módulo de fineza de 3.62, el cual supera el máximo recomendado para ser usado en concreto (Tabla 1).

Tabla 1. Ensayo de granulometría

Malla	Peso Retenido en gramos	% Retenido	% Retenido Acumul.	% Pasante Acumul.
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0
# 4	53.2	12.2974	12.2974	87.7026
# 8	92.5	21.3782	33.6756	66.3244
# 16	96.6	22.3471	56.0227	43.9773
#30	82.0	18.9617	74.9844	25.0156
#50	59.5	13.7681	88.7525	11.2475
#100	31.9	7.3696	96.1221	3.8779
fondo	16.8	3.8779	100.0000	0.0000
Modulo				
Total	432.5	100.0	Fineza	3.62

Según los resultados del análisis granulométrico, se muestra en la Figura 1 que el agregado fino de la cantera 01, no está dentro de los límites para agregado fino.

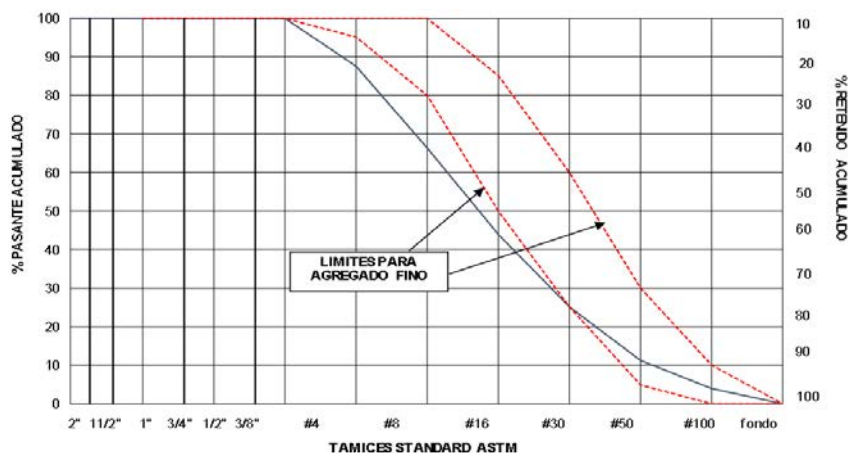


Figura 1. Diagrama de curva granulométrica para agregado fino

En la Tabla 2 se observa los datos obtenidos del ensayo de peso específico y absorción para agregado fino.

Tabla 2. Ensayo de peso específico - absorción

Peso muestra saturada con superficie seca (g)	500.0
Peso fiola o frasco con agua (g)	1147.0
Peso muestra saturada dentro del agua + fiola o frasco (g)	1466.0
Peso muestra seca en horno @ 105°C (g)	496.0
Peso muestra saturada dentro del agua (g)	319.0
Peso específico de masa - P.E.M. (g)	2.74
Peso específico de masa S.S.S.	2.76
Peso específico aparente - P.E.A. - (g)	2.80
Absorción (%)	0.81

El Resultados del ensayo de pasante malla # 200 para esta cantera es desfavorable, ya que el valor obtenido es demasiado alto (Tabla 3 a 5).

Tabla 3. Pasante de malla 200

Peso muestra sin lavar seca (g)	462.6
Peso muestra lavada seca (g)	432.3
Material < malla N° 200 (%)	6.547

Tabla 4. Resultado de ensayo de contenido de humedad

Peso muestra humedad (g)	445.8
Peso muestra seca (g)	443.0
Humedad (%)	0.63

Tabla 5. Datos obtenidos por medio de ensayos realizados en laboratorio

Módulo de fineza	3.62
Peso específico seco (gr/cm ³)	2.74
Peso específico sss (gr/cm ³)	2.76
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.80
% Absorción	0.81
% Pasante de malla # 200	6.55
% De humedad	0.63

3.2 Características físicas de agregado fino- ASTM C 128-04 A

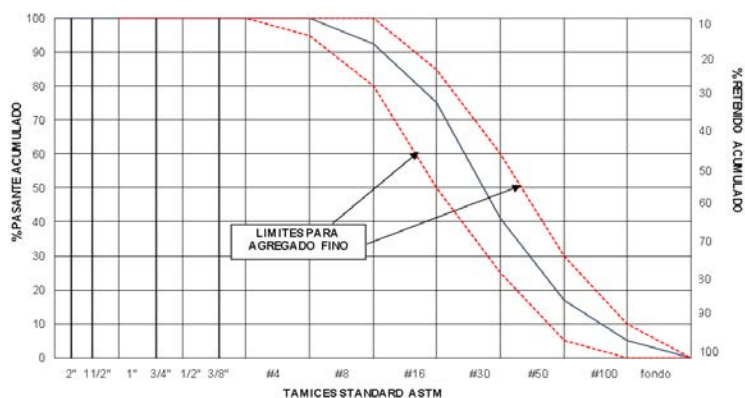
Muestra: Agregado Fino
 Procedencia: Cantera 02-Giurfino
 Ubicación: Pueblo Nuevo -Chincha - Ica

Ensayo de granulometría al agregado fino de una muestra de 471.8 gr (Tabla 6), este agregado tiene un módulo de fineza de 2.70, el cual es recomendado para ser usado en concreto.

Tabla 6. Ensayo de granulometría

Malla	Peso Retenido en gramos	% Retenido	% Retenido Acumul.	% Pasante Acumul.
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0
# 4	0.2	0.0424	0.0424	99.9576
# 8	35.5	7.5237	7.5661	92.4339
# 16	81.6	17.2982	24.8644	75.1356
#30	161.0	34.1133	58.9776	41.0224
#50	113.9	24.1480	83.1256	16.8744
#100	56.0	11.8578	94.9835	5.0165
fondo	23.7	5.0165	100.0000	0.0000
Modulo				
Total	471.8	100.0	Fineza	2.70

Según los resultados del análisis granulométrico, en la Figura 2 se aprecia que el agregado fino de la cantera 02 está dentro de los límites para agregado fino y es adecuado para el diseño de mezcla.

**Figura 2.** Diagrama de curva granulométrica para agregado fino

En la Tabla 7 se puede observar los datos obtenidos del ensayo de peso específico y absorción para agregado fino.

Tabla 7. Ensayo de peso específico - absorción

Peso muestra saturada con superficie seca (g)	400,0
Peso fiola o frasco con agua (g)	1153,0
Peso muestra saturada dentro del agua + fiola o frasco (g)	1403,0
Peso muestra seca en horno @ 105°C (g)	396,7
Peso muestra saturada dentro del agua (g)	250,0
Peso específico de masa - P.E.M. (g)	2,64
Peso específico de masa S.S.S.	2,67
Peso específico aparente - P.E.A. - (g)	2,70
Absorción (%)	0,83

El Resultados del ensayo de pasante malla # 200 (Tabla 8), contenido de humedad (Tabla 9) y los ensayos de laboratorio (Tabla 10) para esta cantera están dentro de los parámetros por lo que se considera adecuado para nuestro diseño de mezcla.

Tabla 8. Pasante de malla 200

Peso muestra sin lavar seca (g)	486,1
Peso muestra lavada seca (g)	471,9
Material < malla N° 200 (%)	2,929

Tabla 9. Resultado de ensayo de contenido de humedad

Peso muestra humedad (g)	500,0
Peso muestra seca (g)	496,0
Humedad (%)	0,81

Tabla 10. Datos obtenidos por medio de ensayos realizados en laboratorio

Módulo de fineza	2,70
Peso específico seco (gr/cm3)	2,64
Peso específico sss (gr/cm3)	2,67
Peso específico aparente (gr/cm3)	2,70
% Absorción	0,83
% Pasante de malla # 200	2,93
% De humedad	0,81

3.3 Características físicas de agregado grueso

Muestra: Agregado Grueso
 Procedencia: Cantera 01-C&C del sur
 Ubicación: Pueblo Nuevo -Chincha - Ica

En la Tabla 11 se observa que se tiene el primer retenido en la malla de 1 ½", lo cual no es adecuado para el concreto propuesto para uso en edificación.

TABLA 11. ENSAYO DE GRANULOMETRIA.

Malla	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	% Pasa Acum.	ASTM "LIM SUP"	ASTM "LIM INF"
2"	50.80 mm	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.10 mm	273.0	4.19	95.81	100.00	100.00
1"	25.40 mm	386.0	5.92	89.89	90.00	100.00
3/4"	19.05 mm	2332.0	35.78	54.11	40.00	85.00
1/2"	12.70 mm	2305.0	35.36	18.75	10.00	40.00
3/8"	9.53 mm	705.0	10.82	7.93	0.00	15.00
# 4	4.75 mm	509.0	7.81	0.12	0.00	5.00
# 8	2.36 mm	0.0	0.00	0.12	0.00	0.00
Fondo	0.01 mm	8.00	0.12	0.00	0.00	0.00

En la Figura 3 se observa los resultados del análisis granulométrico, donde se aprecia que el agregado grueso se encuentra dentro de los límites para huso # 56.

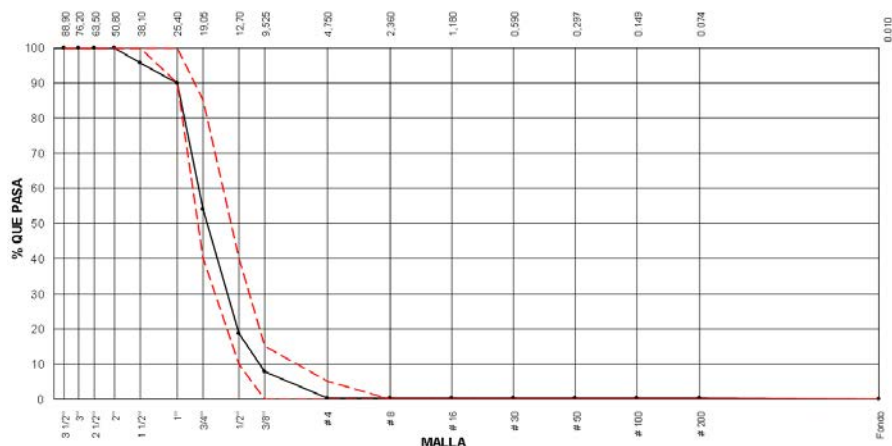


Figura 3. La curva granulométrica

También se observa los datos obtenidos del ensayo de peso específico y de absorción (Tabla 12) para el agregado grueso.

Tabla 12. Ensayo de peso específico - absorción

Peso muestra saturada con superficie seca (g)	2123.00
Peso fiola o frasco con agua (g)	448.00
Peso muestra saturada dentro del agua + fiola o frasco (g)	1796.00
Peso muestra seca en horno @ 105°C (g)	2107.00
Peso muestra saturada dentro del agua (g)	1348.00
Peso específico de masa - P.E.M. (g)	2.72
Peso específico de masa S.S.S.	2.74
Peso específico aparente - P.E.A. - (g)	2.78
Absorción (%)	0.76

Se realizó el ensayo de peso unitario compactado del agregado grueso (Tabla 13) para realizar el diseño de mezcla. En la Tabla 14 se muestra el resultado del ensayo de contenido de humedad y en la Tabla 15 los datos del ensayo de laboratorio.

Tabla 13. Peso unitario compactado

Peso muestra compactada + contenedor (gr)	15584	15634	15555	15459	Peso unitario compactado promedio
Peso contenedor (gr)	6522	6522	6522	6522	
Peso muestra compactada (gr)	9061	9112	9032	8936	
Volumen contenedor (cm ³)	5455	5455	5455	5455	
Peso unitario compactado (gr/cm ³)	1.661	1.670	1.656	1.638	

Tabla 14. Resultado de ensayo de contenido de humedad

Peso muestra humedad (g)	759.0
Peso muestra seca (g)	758.0
Humedad (%)	0.13

Tabla 15. Datos obtenidos por medio de ensayos realizados en laboratorio

Módulo de fineza	7.42
Peso específico seco (gr/cm ³)	2.72
Peso específico sss (gr/cm ³)	2.74
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.78
Peso unitario compactado (kr/m ³)	1.66
tamaño máximo	2 "
tamaño máximo nominal	1 1/2"
% Absorción	0,76
% De humedad	0,13

3.4 Características físicas de agregado grueso

Muestra: Agregado Grueso
 Procedencia: Cantera 02-Giurfino
 Ubicación: Pueblo Nuevo -Chincha - Ica

En la Tabla 16 se observa que se tiene el primer retenido en la malla de 3/4", por lo cual es adecuado para el concreto propuesto para uso en edificación.

Tabla 16. Ensayo de granulometría agregado grueso huso # 57

Malla	Peso Ret. (gr)	Peso Ret. (%)	Peso Ret. Acum. (%)	% Pasa Acum.	ASTM "LIM SUP"	ASTM "LIM INF"
2" 50.80 mm	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2" 38.10 mm	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1" 25.40 mm	0.00	0.00	0.00	100.00	95.00	100.00
3/4" 19.05 mm	762.0	14.92	14.92	85.08	65.00	85.00
1/2" 12.70 mm	2366.0	46.34	61.26	38.74	25.00	60.00
3/8" 9.53 mm	894.0	17.51	78.77	21.23	18.00	44.00
# 4 4.75 mm	949.0	18.59	97.36	2.64	0.00	10.00
# 8 2.36 mm	125.0	2.45	99.80	0.20	0.00	5.00
Fondo 0.01 mm	10.00	0.20	100.00	0.00	0.00	0.00

La curva granulométrica de la Figura 4 muestra que el agregado grueso se encuentra dentro de los límites para huso # 57, el cual es adecuado para edificaciones.

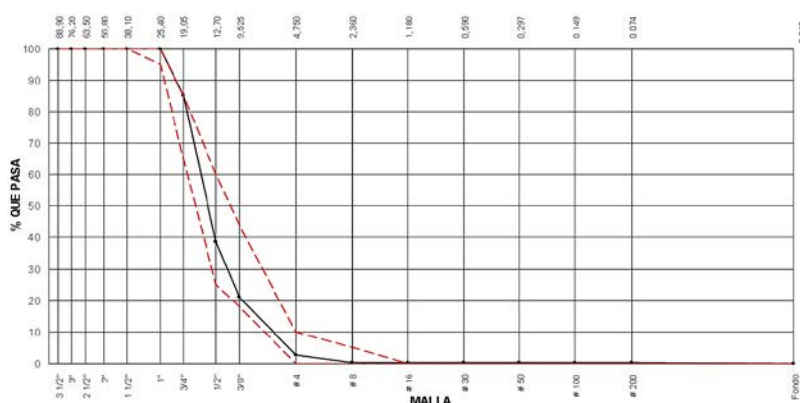


Figura 4. La curva granulométrica agregado grueso huso # 57

En la Tabla 17 se observa los datos del ensayo de peso específico y absorción para agregado grueso.

Tabla 17. Ensayo de granulometría peso específico

Peso muestra saturada con superficie seca (g)	1998.0
Peso fiola o frasco con agua (g)	452.0
Peso muestra saturada dentro del agua + fiola o frasco (g)	1705.0
Peso muestra seca en horno @ 105°C (g)	1985.0
Peso muestra saturada dentro del agua (g)	1253.0
Peso específico de masa - P.E.M. (g)	2.664
Peso específico de masa S.S.S.	2.68
Peso específico aparente - P.E.A. - (g)	2.71
Absorción (%)	0.65

Se realizó el ensayo de peso unitario compactado del agregado grueso (Tabla 18) para realizar el diseño de mezcla. También el ensayo de contenido de humedad (Tabla 19) y los ensayos de laboratorio (Tabla 20).

Tabla 18. Peso unitario compactado

Peso muestra compactada + contenedor (gr)	15320	15047	15044	15060	Peso unitario compactado promedio
Peso contenedor (gr)	3335	3335	3335	3335	
Peso muestra compactada (gr)	11985	11712	11709	11725	
Volumen contenedor (cm ³)	7060	7060	7060	7060	
Peso unitario compactado (gr/cm ³)	1.698	1.659	1.658	1.661	

Tabla 19. Resultado de ensayo de contenido de humedad

Peso muestra humedad (g)	479.0
Peso muestra seca (g)	477.0
Humedad (%)	0.42

Tabla 20. Datos obtenidos por medio de ensayos realizados en laboratorio

Módulo de fineza	6.91
Peso específico seco (gr/cm ³)	2.66
Peso específico sss (gr/cm ³)	2.68
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.71
Peso unitario compactado (kr/m ³)	1.67
tamaño máximo	1 "
tamaño máximo nominal	3/4"
% Absorción	0,65
% De humedad	0,42

3.5 Diseño de mezcla de concreto por el método del ACI 211 [7]

3.5.1 Características físicas de los materiales y de la mezcla de prueba

Resistencia de concreto: $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$

Revenimiento: 3" a 4"

Para este diseño de mezcla usaremos un 66% de volumen de agregado fino y grueso (Tabla 21).

Tabla 21. Datos agregado fino

M.F. Arena	2.70
M.F. Piedra H 57	6.91
M.F. Global	5.20
Vol. Agregados	0.66
Arena %	41
Piedra #57 %	59

3.5.2 Cálculos de la proporción de la mezcla en pesos

Se comprueba que el peso del concreto por m³ está dentro de los parámetros normales para peso de concreto entre 2200kg /m³ y 2400 kg/m³. Se realiza un ajuste en cuanto a la absorción y la humedad que aportan los agregados a la mezcla. Se comprueba que el volumen total sea 1.000 m³ (Tabla 22).

Tabla 22. Ajuste en cuanto a la absorción y la humedad

Materiales	Procedencia	P. Esp	Hum.	Abs.	%h-%a	Peso seco	Vol.	Peso s.s.s.	Corrección
		Kg/m ³	%	%		Kg/m ³		Kg/m ³	Por humedad
Cemento TI	SOL	3110				346	0.111	346	346.3
Agua	UPSJB	1000				205	0.205	205.00	207.56
Arena	GIURFINO	2640	0.81	0.83	-0.02	710.10	0.269	716.00	715.85
Piedra #57	GIURFINO	2664	0.42	0.65	-0.23	1051.41	0.395	1058.25	1055.83
Aire						2.00%	0.020		
Total						2313	1.000	2326	2325.5

También se encontraron los datos de la tanda de prueba (Tabla 23); se tuvo precaución en los tiempos de mezclado y se sacaron 6 probetas o testigos para analizarlos en estado endurecido (Tabla 24).

Tabla 23. Tanda de prueba

Cemento TI (kg)	8.66
Agua (kg)	5.19
Arena (kg)	17.90
Piedra #57 (kg)	26.40
Total	58.14

Tabla 24. Probetas o testigos

Inicio Mezclado	14:07	hh:mm
Fin Mezclado	14:13	hh:mm
Probetas	6	Und

3.5.3 Control de calidad del concreto en estado fresco

Se obtuvo un asentamiento (slump) adecuado según las solicitaciones y la temperatura del concreto está dentro de los parámetros normales (Tabla 25).

Tabla 25. Asentamiento de concreto [8]

Tiempo	Hora (hh:mm)	Slump (pulg)	TA (°C)	TC (°C)
0 mín	14:13	4	17.9	21.2

Para este ensayo se usó la olla de Washington, se determinó el contenido de aire y se pesó el concreto (Tabla 26).

Tabla 26. Ensayo de peso unitario [9]

Tara	3.335	Kg
Volumen	0.00706	m ³
Tara + Concreto	20.201	kg
Peso unitario	2388.9518	kg/m ³
% de Aire	1.6	%
P.U. Teórico	2313	kg/m ³
Rendimiento	0.97	

3.5.4 Control de calidad del concreto en estado endurecido

Se obtuvo resultados satisfactorios en cuanto a la ganancia de resistencia progresiva, dando un 23.15% más de la resistencia solicitada a los 28 días (Tabla 27).

Tabla 27. Ensayo de resistencia a la compresión

Edad (días)	Diam (cm)	Carga (Kg)	f _c (Kg/cm ²)	%
7	15.1	44948	251.00	89.6
7	15.1	44652	249.34	89.1
14	15.1	51763	289.05	103.2
14	15.1	51814	289.34	103.3
28	15.1	62089	346.71	123.8
28	15.1	61406	342.90	122.5

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la comparación de dos canteras para realizar un diseño de mezcla óptimo, se pudo determinar la distribución granulométrica de los tamaños de las partículas de las muestras de agregado grueso y fino, por separación a través de tamices correspondientes sucesivamente con su respectiva numeración y abertura, donde:

Para la Cantera 01-C&C DEL SUR, el agregado fino sale de los límites normalizados [4], teniendo un módulo de Fineza de 3.62, lo que nos indica que no presenta una correcta graduación ya que debe ser menor al 3.1%. Se realizó los cálculos de la cantidad de material pasante por la malla N° 200 en porcentaje, en este ensayo obtuvimos una cantidad de 6.54% , lo que nos indica el exceso de limos y arcillas que son perjudiciales para el concreto además esto también puede ser indicativo de degradación del agregado.

Para la Cantera 02- GIURFINO, el agregado fino se encuentra dentro de los límites normalizados [4], teniendo un módulo de Fineza de 2.7 menor al 3.1%, lo que nos indica que presenta una correcta graduación, Se realizó los cálculos de la cantidad de material pasante por la malla N° 200 en porcentaje, en

este ensayo obtuvimos una cantidad de 2.93 %, lo que nos indica que cumple con los estándares de calidad para concreto.

Para la Cantera 01-C&C DEL SUR, el agregado Grueso no cumple con la especificación solicitada de TMN $\frac{3}{4}$ ", su módulo de fineza es de 7.42, el cual no es adecuado para el diseño de mezcla solicitado.

Para la Cantera 02- GIURFINO, el agregado Grueso cumple con la especificación solicitada de TMN $\frac{3}{4}$ ", su módulo de fineza es de 6.91, el cual es adecuado para el diseño de mezcla solicitado.

De acuerdo con este análisis se determinó que la cantera 02-GIURFINO, cumple con las solicitudes de calidad para agregados, por lo que procedimos a realizar el diseño de mezcla por el método [7], el cual se analizó tanto en estado fresco y estado endurecido. En estado fresco: cumplió con los requerimientos solicitados, ya que tuvo una buena apariencia homogénea, cohesiva, sin exudación ni segregación y una consistencia plástica de 4", la temperatura del concreto fue de 21.2°C, que está dentro del rango de 13°C y 32 ° C. En estado endurecido: A los 28 días de preparado el concreto se hizo el ensayo de esfuerzo de rotura a la compresión, teniendo un resultado de $f'c= 345 \text{ kg/cm}^2$ que representa el 123.15% de la resistencia final, lo cual supera la resistencia requerida de $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$.

5. CONCLUSIONES

La calidad de agregados es de suma importancia ya que le corresponde aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del concreto. El agregado no solo puede limitar la resistencia del concreto, sino que sus propiedades pueden afectar enormemente su durabilidad y desempeño.

El muestreo y el ensayo son importantes, por lo tanto, se tuvo la precaución de obtener muestras que denoten la naturaleza y condiciones del material al cual representan.

Determinar la combinación más práctica de los materiales con los que se dispone es de suma importancia para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso por ello se debe poseer las siguientes propiedades: En el concreto fresco, trabajabilidad aceptable. En el concreto endurecido, resistencia, durabilidad, densidad y apariencia, todo esto se traduce en Economía.

En esta investigación se demostró que la utilización de agregados de calidad favorece a la obtención de concretos resistentes y durables.

REFERENCIAS

- [1] NTP 339.184, "Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto", 2002.
- [2] NTP 400.010, "Agregados. Extracción y preparación de muestras", 2011.
- [3] NTP 400.043, "Práctica normalizada para reducir muestras de agregados a tamaño de ensayo". 2ª Edición, 2015.
- [4] NTP 400.012, "Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. Método de ensayo", 2013.
- [5] ASTM C136 – 14, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", 2014.
- [6] NTP 400.022, "Peso específico y absorción del agregado fino", 2013.
- [7] ACI 211, "Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo.
- [8] MTC E 705, Asentamiento del concreto – Slump", 2000.
- [9] NTP 400.017, "Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados", 2011.

Desarrollo de una herramienta computacional para la estimación de caudales máximos mediante modelación lluvia escorrentía, en escenarios de riesgo por eventos extremos de precipitación en cuencas de alta montaña

Yeison Mosquera Valencia¹

Deison Cárdenas Espinal²

Adolfo Enrique Arévalo Henao³

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Colombia

La estimación de caudales asociados a eventos extremos mediante modelación lluvia escorrentía, tradicionalmente ha estado ligada a metodologías para el dimensionamiento de obras hidráulicas (alcantarillas, box couvert, pontones, puentes). Si bien en el análisis de escenarios de riesgo estas medidas se caracterizan por ser estructurales, se centran en la reducción del riesgo con significativos costos y altos niveles de incertidumbre en cuanto a su permanencia en el tiempo. En el presente trabajo se plantea evaluar desde la academia la variación en orden de magnitud de la escorrentía para cuencas de alta montaña, teniendo como base intervenciones estructurales asociadas a la variación o conservación de masa forestal en la cuenca, y su relación con el aumento de los caudales máximos para cuencas no instrumentadas. Para este caso, se estudian las cuencas corrientes y montera del municipio de Barbosa, en el departamento de Antioquia, Colombia, dada su condición geográfica estratégica y su forma, siendo la primera una cuenca con tendencia a la circularidad y la segunda una cuenca alargada.

¹ Ingeniero Civil, Especialista en gestión del riesgo de desastres y candidato a Magíster en ingeniería.
Contacto: yemosva@hotmail.com

² Ingeniero Civil, Especialista en gestión del riesgo de desastres y candidato a Magíster en ingeniería.
Contacto: deison_cardenas95103@elpoli.edu.co

³ Ingeniero Civil y candidato a Magíster en Ingeniería.
Contacto: adolfo_arevalo95101@elpoli.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Colombia dada su ubicación geográfica tiene la necesidad de instrumentar en el marco del desarrollo normativo de gestión del riesgo de desastres, las cuencas de alta montaña. Si bien a nivel Nacional el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, a nivel del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia está el Sistema de Alerta Temprana Ambiental SIATA, los cuales cuentan con una amplia red de instrumentos de medición que en su mayoría miden variables de tipo pluviométrico, de manera institucional no existen herramientas que permitan de manera simple y eficaz utilizar tal potencial en el análisis hidrológico de las cuencas de alta montaña y la variación espacial de los usos de suelos como elemento del desarrollo territorial.

La gestión del riesgo de desastres en el ámbito municipal es un proceso que se articula a la planificación del territorio, a partir de la expedición de la ley 1523 en el 2012 y sus decretos articulantes, las entidades territoriales están en la obligación de implementar la gestión del riesgo en términos del conocimiento, reducción y manejo de desastres, en el marco del primer proceso de la gestión del riesgo de la ley 1523 de 2012 (Conocimiento del riesgo) [1], se desarrolla una metodología numérica computacional, que permita estimar caudales máximos, asociados a diferentes periodos de retorno, en cuencas de alta montaña, mediante modelación lluvia escorrentía e implementación de métodos de aforo directo empírico y semiempíricos de la transformación de la lluvia en escorrentía superficial, bajo escenarios de evaluación del riesgo, considerando la variación espacial de los usos de suelos como medida estructural.

En la actualidad existe una amplia variedad de sistemas de información geográfica a los que las entidades territoriales pueden acceder de forma libre y gratuita en términos de licencia de uso [2], al igual que el acceso a la información de tipo vectorial, raster y bases de datos que los alimentan [3]. El desconocimiento de tal potencial no ha permitido que de forma extensiva se caractericen los territorios en cuanto al orden de magnitud que pueden representar los eventos extremos asociados a las temporadas de invierno en el país, eventos (ENOS-El fenómeno de El Niño - Oscilación Sur) [4] en toda su dimensión y al igual que la variación espacial de los usos de suelo en las cuencas como proceso derivado de malas prácticas en términos de desarrollo agrícola, ganadero, urbanístico, entre otros, como elemento articulante a la planeación territorial.

Es de tener en cuenta que dada la dinámica de calentamiento del planeta y las intensidades cada vez más altas de los eventos extremos de precipitación[5], se pretende desarrollar una herramienta computacional de uso libre que le sirva a las entidades territoriales municipales, departamentales y nacionales, estudiar con la variación de parámetros tales como porcentajes de área de usos de suelo, precipitación total anual, precipitación máxima en 24 horas, número de días con lluvia al año, números de curva entre otros, realizar un primer acercamiento al orden de magnitud de caudales máximos extremos, en el marco de sus procesos de planeación territorial y de gestión del riesgo de desastres como elementos articulados en el ordenamiento territorial.

Se busca en esta investigación crear una herramienta computacional adaptada a las condiciones del territorio nacional, de uso externo a los sistemas de información geográfica, que se alimente con parámetros morfométricos, usos del suelo en función de los números de curva, región y pluviometría, para estimar caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno a través de modelación lluvia escorrentía por hidrogramas unitarios y aforo directo por metodologías empíricas y semi-empíricas.

En un segundo momento a través del aplicativo una vez se conozcan los parámetros anteriormente descritos, calcular la fluctuación de caudales máximos como medida estructural y de respuesta a la variación de la masa forestal y usos de suelo en cuencas de alta montaña, información que se puede utilizar para un análisis preliminar de gestión del riesgo en los territorios, además de servir como herramienta para proyectar posibles usos del suelo menos dañinos a las dinámicas de la cuenca.

Se considera para la calibración de los resultados finales, los caudales de salida arrojados en los estudios básicos realizados por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín [6], donde se tomaron como referentes las cuencas corrientes y montera, ubicadas en el municipio de Barbosa.

2. MARCO CONCEPTUAL

Las diferentes aplicaciones de sistemas de información geográfica con licencia de uso libre que existen en la actualidad [2] nos permiten a través de una serie de procesos conocer los diferentes parámetros asociados a la morfometría de las cuencas, que usualmente son utilizados como insumos para el diseño de obras hidráulicas, box Coulvert, alcantarillas, canales, obras de protección de ribera, entre otros.

Con la presente investigación se pretende desarrollar un aplicativo externo a un SIG, que permita estimar la variación de los caudales máximos en cuencas de la alta montaña, considerando escenarios de variación de usos del suelo y cobertura vegetal, como medida estructural o en su defecto como elemento de planeación del territorio.

Definir los sistemas de esorrentía como sistemas físicos y no estacionales para establecer un comportamiento dinámico de la red fluvial es de vital importancia en el análisis hidrológico, toda vez que permiten hacerse una idea de criterios geométricos, altimétricos y espaciales. La estimación de eventos extremos, caudales máximos y mínimos nos brindan una base para lograr cualitativamente la definición característica de la hidrología propia de una cuenca, así como los procesos predominantes en ella.

Para la modelación se parte de la base que son conocidos parámetros claves que describen la Morfometría como Área (Ar), Perímetro (Per), Longitud del canal principal (Lcp), Longitud De todos los cauces (Ltc), Cota máxima (Cmax), Cota mínima (Cmin), Orden de la Corriente (Ordn); parámetros de la región hidrológica (Ri) tales como región andina, región pacifico, región caribe, región amazónica y región Orinoquia, al igual que los usos de suelo y su porcentaje con respecto al área total de la cuenca. De allí que el desarrollo computacional es necesario para describir la interrelación de dichas variables en escenarios de cambio climático cada vez más intensos y dinámicos.

Es de tener en cuenta que se consideran dada su aplicabilidad en el medio y su facilidad para la programación lineal el lenguaje c++ para la implementación del modelo lluvia esorrentía [7], Servicio Conservación de Suelos de los Estados Unidos SCS [8], Método Racional [8] y método racional modificado [8], quedando pendiente para futuras investigaciones la inclusión de metodologías como la del Hidrograma unitario de Clark [8], Snyder [8], e Hidrograma Geomorfológico [8].

Se consideran, además, como elementos de validación las cuencas Corrientes y Montera en el municipio de Barbosa, debido a que se cuenta con los resultados del estudio realizado por la Nacional de Colombia sede Medellín. Dichos estudios nos van a permitir realizar las respectivas comparaciones entre los resultados obtenidos en el estudio y los resultados arrojados por la herramienta computacional en sus dos (2) versiones. La validación de la herramienta se verificará al comparar los datos de caudal asociado a distintos periodos de retorno, los cuales deberán sin importar las metodologías guardar ciertas características de similitud en sus resultados finales.

2.1 Parámetros morfométricos

- *Área y perímetro de la cuenca.* El área de la cuenca se define como la proyección en un plano horizontal de toda el área encerrada por la divisoria de aguas. Entiéndase como divisoria de aguas una línea curva, cerrada, fija en la superficie del terreno que incluye en un punto de drenaje toda la precipitación que cae sobre la curva y abandone en forma de flujo concentrado el punto elegido, por otra parte, el perímetro de la cuenca se entiende como la Longitud de la línea divisoria de aguas proyectada en el plano horizontal de la cuenca.
- *Máxima y mínima.* Punto de máxima y mínima elevación en la cuenca.
- *Longitud del canal principal.* Unión de tributarios que a manera de segmentos se unen para determinar el cauce más largo en cuenca.
- *Vertiente mayor.* Defínase como la subcuenca de mayor Área.
- *Vertiente menor.* Defínase como la subcuenca de menor Área.

2.2 Parámetros de forma

Dada la configuración de los cauces de alta montaña, se trata de cuantificar parámetros por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan la precipitación aferente y la respuesta de la cuenca a tal movimiento.

- *Índice de compacidad (Ic)*. Se define por la relación entre el perímetro de la cuenca Y el perímetro de círculo de radio R que tiene la misma área de la cuenca hidrográfica en estudio. Básicamente este coeficiente da luces sobre la escorrentía y la forma del hidrograma resultante de una determinada precipitación en la cuenca. La fórmula para el cálculo del índice de compacidad (Ic) se presenta en la ecuación (1).

$$Ic = 0.282 * \frac{Per}{\sqrt{Ar}} \quad (1)$$

Donde:

Per: Perímetro De La Cuenca

Ar: Área De La Cuenca

- *Factor de forma (Ff)*. Se establece como el cociente entre el ancho Promedio de la Cuenca y su lo longitud de cauce principal. Define básicamente la heterogeneidad de las cuencas en función de su latitud, define una tendencia al alargamiento en cuencas grandes y una variación en el hidrograma característico de la misma. La fórmula para el cálculo del factor de forma (Ff) se presenta en la ecuación (2).

$$Ff = \frac{Ar}{Lcp^2} \quad (2)$$

Donde:

Ar: Área De La Cuenca

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

- *Coficiente de forma (Kf)*. Relación entre el ancho medio de la Cuenca y su Longitud Media, entendiéndose como longitud media, la distancia lineal entre la salida o punto de aforo y el punto más elevado y alejado de la cuenca. La fórmula para el cálculo del coeficiente de forma (Kf) se presenta en la ecuación (3).

$$Kf = \frac{E}{Lcp} \quad (3)$$

Donde:

E: Ancho Máximo De La Cuenca

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

- *Relación de elongación (Re)*. Es la relación entre el diámetro de un círculo de área igual a la cuenca y su longitud. Se establecen valores para la relación de elongación entre 0.6 y 1.0 que es función de la geología y variedad de clima presente en la misma, para valores entre 0.6 y 0.8 se asocia a fuertes relieves en el terreno. La fórmula para el cálculo de la relación de elongación (Re) se presenta en la ecuación (4).

$$Re = 1.1284 * \frac{\sqrt{Ar}}{Lcp} \quad (4)$$

Donde:

Ar: Área De La Cuenca

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

- *Relación de circularidad (Rci)*. Denominado también Como Radio de Circularidad, es el cociente que relaciona el área de la Cuenca y la del círculo cuyo perímetro es igual al de la cuenca. Si la cuenca tiende

a la circularidad se espera un Rci con tendencia a la Unidad, es de destacar que se esperan valores para este parámetro del orden de 0.785 dado que se habla de cuencas de alta montaña. La fórmula para el cálculo de la relación de circularidad (Rci) se presenta en la ecuación (5).

$$Rci = \frac{4 \cdot \pi \cdot Ar}{Per^2} \quad (5)$$

Donde:

Ar: Área De La Cuenca

Per: Perímetro De La Cuenca

- *Ancho máximo (E)*. Es generalmente, la longitud que pasa por el centro de gravedad de la cuenca. La fórmula para el cálculo del ancho máximo (E) se presenta en la ecuación (6).

$$E = \frac{Ar}{Lcp} \quad (6)$$

Donde:

Ar: Área De La Cuenca

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

- *Longitud al centro de gravedad (La)*. Corresponde básicamente a la medida en línea recta desde el punto de concentración, al baricentro de la figura geométrica que corresponde a la cuenca, o hasta la proyección de este sobre el cauce principal.

2.3 Parámetros de relieve

Para Definir el relieve de una cuenca Hidrográfica, existen numerosos parámetros que han sido desarrollados por distintos autores, entre los que más se ajustan a los cauces de alta montaña son:

- *Pendiente de la cuenca*. La pendiente de la cuenca tiene una estrecha relación con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces. Es uno de los factores físicos que controlan el tiempo de flujo sobre el terreno y tiene una influencia directa en la magnitud de la avenida o evento extremo de crecida.
- *Parámetros de la red hidrográfica*. La red hidrográfica, corresponde al drenaje natural, permanente o temporal por el que fluyen las aguas en la escorrentía superficial, esta se clasifica en función del tiempo en que transportan agua, por su posición topográfica, edad Geológica o por el número de orden del cauce principal. Siendo esta última la empleada en este estudio.
- *Densidad de drenaje (Dd)*. Este parámetro se define como el cociente entre la longitud total de cauces pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca. Este es un indicador de la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación, por lo tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el punto de aforo, a mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo de ladera. Lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y por tanto menor tiempo al pico en el hidrograma. La fórmula para el cálculo es la ecuación (7).

$$Dd = \frac{Ltc}{Ar} \quad (7)$$

Donde:

Ltc: Longitud De Todos Los Cauces

Ar: Área De La Cuenca

- *Constante de estabilidad (C)*. Representa físicamente, la superficie de la cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Matemáticamente representa la inversa de la densidad de drenaje. La fórmula para el cálculo de la constante de estabilidad (C) se presenta en la ecuación (8).

$$C = \frac{1}{Dd} \quad (8)$$

Donde:

Dd: Densidad De Drenaje

- *Densidad hidrográfica (Dh)*. Se define como el cociente entre el número de segmentos de canal de la cuenca y la superficie de la misma, Aunque la densidad Hidrográfica y la densidad de drenaje miden propiedades distintas, Melton (1958) propuso una relación que ha resultado muy acertada entre ellas. Básicamente es un coeficiente adimensional que se aproxima generalmente [0.694 y 0.7]
- *Longitud promedio de flujo superficial (Lo)*. Representa la distancia media que la precipitación en forma de agua, debe escurrir sobre la cuenca para llegar a un cauce, se estima por la relación que existe entre el área y cuatro veces la longitud de todos los cauces de la cuenca o bien la inversa de cuatro veces la densidad de drenaje. La fórmula para el cálculo es la ecuación (9).

$$Lo = \frac{1}{4 * Dd} \quad (9)$$

Donde:

Dd: Densidad De Drenaje

- *Sinuosidad del cauce principal (Si)*. Es la relación que existe entre la longitud del cauce principal y la longitud del valle del cauce principal medida en línea recta. La fórmula para el cálculo de la sinuosidad del cauce principal (Si) se presenta en la ecuación (10).

$$Si = \frac{Lcp}{Ltc} \quad (10)$$

Donde:

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

Ltc: Longitud De Todos Los Cauces

- *Coefficiente de torrencialidad (Ctorr)*. Relación de cursos de Primer Orden y el área de la cuenca. La fórmula para el cálculo del coeficiente de torrencialidad (Ctorr) se presenta en la ecuación (11).

$$Ctorr = \frac{\#cauces_1}{Ar} \quad (11)$$

Donde:

#Cauces1: Cauces De Orden 1

Ar: Área De La Cuenca

- *Pendiente del cauce principal (S)*. Relación entre la altura total del cauce principal y la longitud del mismo. Esta se puede obtener en forma media, o de manera ponderada. La fórmula para el cálculo de la pendiente del cauce principal (S) se presenta en la ecuación (12).

$$S = \frac{H2-H1}{Lcp} \quad (12)$$

Donde:

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

H2: Elevación Máxima

H1: Elevación Mínima (Punto de aforo)

2.4 Tiempos de concentración

Es reconocido como el tiempo que tarda una gota de agua en llegar desde el sitio más alejado de la cuenca, hasta el punto de interés; se ha calculado por varios métodos en función de realizar un ajuste probabilístico

que permita identificar el tiempo de concentración más adecuado para las cuencas en estudio. Los tiempos de concentración considerados en la presente investigación, se describen en las ecuaciones (13) a la (22).

$$T_{C_{kirpich}} [min] = \left(0.0078 * L_{cp} * \frac{1000}{0.3048} \right)^{0.77} * S_c^{-0.385} \quad (13)$$

$$T_{C_{temez}} [hr] = \left(\frac{0.126 * L_{cp}}{S_c^{0.35}} \right)^{0.75} \quad (14)$$

$$T_{C_{pasini}} [hr] = 0.023 * \sqrt{\frac{Ar * L_{cp}}{S_c}} \quad (15)$$

$$T_{C_{Pizarro}} [hr] = 13.548 * \left(L_{cp}^2 * \frac{1}{H_2 - H_1} \right)^{0.77} \quad (16)$$

$$T_{C_{Ventura}} [hr] = 0.040 * \sqrt{Ar} * \frac{1}{S} \quad (17)$$

$$T_{C_{Giandoti}} [hr] = \frac{4 * \sqrt{Ar} + 1.5 * L_{cp}}{0.8 * \sqrt{(H_2 - H_1)}} \quad (18)$$

$$T_{C_{BrasbyWilliam}} [min] = 14.60 * L_{cp} * Ar^{-0.1} * S_c^{-0.2} \quad (19)$$

$$T_{C_{CSC}} [min] = 60 * \left(0.87075 * L_{cp}^3 * \frac{1}{(H_1 - H_2)} \right)^{0.385} \quad (20)$$

$$T_{C_{perez}} [hr] = L_{cp} * \frac{1}{72 * S_c^{0.60}} \quad (21)$$

$$T_{C_{Pilgrim}} [hr] = 0.76 * Ar^{0.38} \quad (22)$$

Donde:

Ar: Área De La Cuenca

Lcp: Longitud Del Cauce Principal

Sc: Pendiente Media De La cuenca

H2: Elevación Máxima

H1: Elevación Mínima (Punto de aforo)

Los parámetros morfométricos obtenidos para las quebradas la Montera y Corrientes se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros morfométricos medidos

	Montera	Corrientes
Área de la cuenca (Km ²)	6.01	4.41
Perímetro (Km)	21.12	12.73
Longitud del canal principal (km)	9.35	4.61
Longitud total de los cauces (km)	9.35	6.37
Cota máxima de la cuenca (m)	2604	2210
Cota en la salida de la cuenca (m)	1157	1306
Orden De La Corriente Principal	2	3
Número de curva (CN)	85	88
Tiempo de concentración	75	48
	R1	1
	PT	3000
	M	60
	N	240
Coefficiente de escorrentía tabular	0.45	0.45

2.5 Curvas Intensidad Duración y Frecuencia IDF

Las curvas IDF, son una de las herramientas más importantes para el diseño hidrológico de caudales máximos, especialmente cuando se utilizan modelos lluvia-escorrentía, esto con el ánimo de regionalizar la intensidad que se asocia a cierto régimen de precipitación.

2.5.1 Análisis de información pluviométrica (I)

La información pluviométrica antes de ser estudiada en comportamiento descriptivo, debe ser revisada y analizada en tres aspectos importantes: Los datos de la estación deben estar completos, consistentes y exactos. Para el caso en la construcción de las curvas IDF se emplea la ecuación propuesta en [9], en la cual se hace un análisis detallado para la construcción de las curvas en distintas regiones del país. La fórmula para el cálculo del análisis de información pluviométrica (I) se presenta en la ecuación (23).

$$I = a \cdot \frac{T^b}{t^c} \cdot M^d \cdot N^e \cdot PT^f \quad (23)$$

Donde:

a, b, c, d, e, f son coeficientes Adim Tabulados u obtenidos mediante un análisis de regresión.

M, es el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria.

N, es el promedio del número de días con lluvia al año

PT, se define como la precipitación media anual en milímetros

A continuación, en la Tabla 2 se presentan los valores de los coeficientes recomendados por [9].

Tabla 2. Tabla de resultados de 165 estaciones de análisis [9]

	a	b	c	d	e	f
Nacional	3,87	0,19	0,62	0,35	-0,33	0,32
Región 1	1,61	0,19	0,65	0,75	-0,15	0,08
Región 2	8,51	0,21	0,5	-0,01	-0,08	0,28
Región 3	2,31	0,19	0,58	-0,2	0,12	0,4
Región 4	1,23E-26	0,19	0,58	1,19	-1,46	8,28

De forma similar se presenta los promedios y desviaciones estándar de los errores relativos para la implementación de la metodología para la construcción de las curvas (Tabla 3).

Tabla 3. Promedios y desviaciones estándar de errores relativos [9]

R. Andina (R1)		R. Caribe (R2)		R. Pacífico (R3)		R. Orinoquia (R4)		Todas	
μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
3	24	0	37	4	28	-18	23	-6	31

2.5.2 Tormenta de diseño

se entiende como tormenta de diseño la caracterización de la precipitación de una zona, ya sea de tipo puntual (curvas IDF), tormenta asociada a áreas de diferente tamaño (Hp-A-D) y tormenta regional (Ecuaciones). La metodología empleada para la definición de la tormenta de diseño en el presente investigativo, se centra en la estimación de curvas IDF a través del análisis de regionalización [9], teniendo como parámetro de entrada las siguientes variables.

- *Duración.* La duración crítica de la lluvia debe asumirse como el tiempo de concentración característico de la cuenca, pues para duraciones menores que el T_c , no toda el área de la cuenca contribuye y para duraciones más grandes que el T_c , no existe incremento en el área contribuyente.
- *Precipitación efectiva.* La precipitación efectiva es la parte de la precipitación que produce escorrentía superficial directa, se usa el método del Servicio Conservación de Suelos de los Estados Unidos SCS [8] por ser de fácil aplicación y por sus buenos resultados. En este método la capacidad de infiltración del suelo depende de varios factores tales como:
 - *Uso del suelo:* Tratamiento superficial al que ha sido sometido el suelo.
 - *Condición hidrológica del suelo:* se define como un índice que permite definir la capacidad de erosión o cobertura vegetal del suelo en la cuenca de estudio.
 - *Grupo hidrológico del suelo:* el modelo SCS [8] define cuatro grandes grupos:

1. suelos de arena y grava como los que se presentan en la zona de aluvión o planicies aluviales de los ríos (suelos muy permeables).
 2. limos, como los que se encuentran en los suelos orgánicos originados en los depósitos de vertiente o coluviones (suelos permeables).
 3. Arcillas, como las que se encuentran en las zonas de antiguos cuerpos de agua (suelos impermeables).
 4. arcillas volcánicas (suelos muy impermeables).
- *Humedad antecedente*: factor relacionado con la cantidad de lluvia que cae en la cuenca durante los 5 días precedentes a la precipitación. Se definen 3
 - *Grupos*:
 - AMC I: suelos secos, AMC II: suelos intermedios,
 - AMC III suelos húmedos

Para el cálculo de la precipitación se tienen las ecuaciones (24) a la (26).

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (24)$$

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (25)$$

$$Ia = 0.2 * S \quad (26)$$

Donde:

Pe: Precipitación Efectiva En Pulgadas

P: Precipitación Media Sobre la cuenca en pulgadas

S: Es el factor de almacenamiento de cuenca en pulgadas

2.6 Caudales lluvia-escorrentía

Una vez establecido los tiempos de concentración, la precipitación e intensidad, se calculan los caudales mediante transformación Lluvia-Escorrentía correspondientes a la simulación de una tormenta de diseño en la cuenca hidrológica, para ello se ajustan los datos morfométricos y pluviométricos a modelos ya establecidos que facilitan la obtención de los mismos.

2.6.1 Método del hidrograma unitario de Williams y Hanns

El hidrograma unitario de Williams y Hanns es tal vez el modelo de lluvia escorrentía más utilizado en la hidrología. Este modelo asume que el efecto de cuenca que transforma precipitación en escorrentía se puede representar por una función lineal tipo convolutiva. Una vez estimada las características morfológicas requeridas, se puede calcular el hidrograma unitario, el cual se convoluciona con la precipitación efectiva, para producir el hidrograma de escorrentía directa respectivo. Si lo que se quiere es el caudal máximo asociado a cierto periodo de retorno, la convolución se hace con la precipitación efectiva que tiene ese periodo de retorno y se asume que el pico de hidrograma de escorrentía directa presenta el caudal máximo buscado con ese periodo de retorno, los parámetros del modelo son los siguientes:

- Constante de recesión (K), se tiene la ecuación (27).

$$K = 27x A_c^{0.231} x S_{cp}^{-0.777} x \left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0.124} \quad (27)$$

- Tiempo pico (Tp), se tiene la ecuación (28).

$$T_p = 4.63x A_c^{0.422} x S_{cp}^{-0.46} x \left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0.133} \quad (28)$$

Donde:

Ac, área de la cuenca en (milla²).

Scp, pendiente media del canal principal (pies/milla)

Lc/Wc, relación largo-ancho de la cuenca,

K, Constante de recesión (h).

Tp, tiempo al pico en (h).

2.6.2 Modelo del servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos

Consiste en un hidrograma unitario adimensional construido a partir de una serie de hidrógrafas reales, de 283 cuencas de los Estados Unidos de diversos tamaños, representadas con un hidrograma unitario triangular. Esta metodología brinda expresiones matemáticas con las que se puede construir el hidrograma unitario de T-horas de duración, a partir del hidrograma unitario adimensional del SCS. El hidrograma unitario de T-horas de duración se obtiene con el siguiente procedimiento:

- Conocido el tiempo de concentración se calcula el tiempo de rezago, TR en horas con la ecuación (29).

$$T_R = \frac{3}{5}T_c \quad (29)$$

- La duración T del hidrograma unitario, en horas, se obtiene con la ecuación (30).

$$T = 0.133T_0 \quad (30)$$

Donde Tc: Tiempo de concentración de la cuenca en horas.

- El tiempo al pico del hidrograma unitario, TP en horas, se obtiene con la ecuación (31).

$$T_P = \frac{T}{2}T_R \quad (31)$$

- El caudal pico del hidrograma unitario, en pie³/pulg, se obtiene con la ecuación (32).

$$U_P = \frac{484 \times A}{T_P} \quad (32)$$

Donde:

UP, es el caudal pico correspondiente a un hidrograma unitario.

A, es el área de la cuenca en millas cuadradas

TP, es el tiempo al pico en horas.

2.6.3 Método racional

La técnica conocida como método racional. Se utiliza en el presente estudio como método estimativo para comprobar los valores arrojados por los modelos lluvias escorrentía anteriormente tratados. Es de destacar que este, no se utiliza en cuencas hidrográficas de gran extensión dado la simplicidad del método y a la incertidumbre que representa el estimar el coeficiente de escorrentía que se utiliza en este método. Paralelo a esto, es un método que no cuantifica la variación espacio temporal de la lluvia, por lo que se concluye que su rango de aplicación es para cuencas menores de 50 km² y de carácter urbano. La estimación de caudales por el método racional se obtiene con la ecuación (33).

$$Q = \frac{CIA}{3.6} \quad (33)$$

Donde:

Q, Caudal pico en m³/s

C, Coeficiente de Escorrentía

I, Intensidad en mm/h

A, Área de la cuenca en km²

2.6.4 Método de Creager

Para la obtención de su fórmula, Creager graficó los gastos máximos por unidad de área observados en cuencas de todo el mundo, contra el área el área misma de la cuenca, después trazo una curva que fura envolvente de todos los puntos graficados y obtuvo la ecuación correspondiente la cual se indica a continuación (34).

$$q = 0.503 * C * (0.386 * A) * \left(\frac{0.894}{(0.386 * A)^{0.048}} \right)^{-1} \quad (34)$$

Donde:

q= gasto unitario $m^3/s/km^2$

A=área de la cuenca $Km^2=6.64km^2$

C= parámetro de región (cuando se consideran cuencas de todo el mundo $C=100$)

Como se observa en la simplicidad del método se presenta el inconveniente de que no se toma en cuenta las características fisiográficas de la cuenca al igual que la precipitación. De igual forma se desconoce el periodo de retorno asociado a tal caudal, lo que impide adoptar un criterio económico de diseño en función de la probabilidad de falla de la estructura.

2.6.5 Método de Lowry

Este método se basa en el mismo procedimiento que el de Creager, diferenciándose de este en la ecuación que define a la envolvente de caudal máximo, la cual es más sencilla, es la ecuación (35).

$$q = \frac{C}{(A+259)^{0.8}} \quad (35)$$

Donde:

q= gasto unitario $m^3/s/km^2$

A=área de la cuenca $Km^2=6.64km^2$

C= parámetro de región (cuando se consideran cuencas de todo el mundo $C=100$). Se obtiene mediante la ecuación (36).

$$q = \frac{100}{(6.64+259)^{0.8}} = 1.14 \frac{m^3}{s} * \frac{1}{km^2} \quad (36)$$

Como se observa en la simplicidad del método se presenta el inconveniente de que no se toma en cuenta las características fisiográficas de la cuenca al igual que la precipitación. De igual forma se desconoce el periodo de retorno asociado a tal caudal, lo que impide adoptar un criterio económico de diseño en función de la probabilidad de falla de la estructura, como limitante adicional por lo general este método da resultados más bajos que el Creager para cuencas menores a $10km^2$ o mayores de $10.000km^2$.

2.6.6 Método de Burkli-Ziegler

En 1880 el ingeniero hidráulico Burkli-Ziegler, publico en Zurich suiza su conocida fórmula para el cálculo de atajeas y colectores de drenaje ciudadanos. Las observaciones que sirvieron de base en la deducción de la formula se efectuaron en áreas relativamente pequeñas y de menos de 20ha.

No obstante, las limitaciones inherentes a su deducción se han usado la formula aplicada al drenaje de carreteras y vías férreas, para cuencas mucho mayores. Para la estimación de dichos caudales se presenta la ecuación (37).

$$Q = 0.022 * C * A * I * \left(\frac{S}{A} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (37)$$

Donde:

Q=caudal máximo m³/s

C= coeficiente De Escorrentía=0.50 (Para EL Caso De Estudio)

A= Área Tributaria en Ha

I=intensidad cm/hr

s=pendiente del terreno m/km

0.022 factor de conversión

2.6.7 Metodo de Mc-Math

Esta fórmula es inducida a partir de transformaciones hechas al método racional modificado (Batista,1983), la descarga de diseño se estima a partir de la ecuación (38).

$$Q = 0.0915 * C * i * s_o^{0.20} * A^{0.80} \quad (38)$$

Donde:

Q es el caudal máximo instantáneo anual (m³/s)

A es el área de la cuenca (km²), "S" es la pendiente del cauce (m/km)

I es la intensidad de la lluvia correspondiente al tiempo de concentración de la cuenca (mm/h) y

C es el coeficiente de escorrentía.

3. MÉTODO

3.1 Etapa 01: Recopilación de información secundaria

Consiste en la consecución de información secundaria cartográfica e hidrológica con las siguientes características:

3.1.1 Información cartográfica

La información cartográfica base para el análisis morfométricos, se generará con sistemas de información Geográfica SIG Libre, apoyados de igual forma con la hidrografía digital que referencia el Instituto Geográfico Agustín Codazzi abierto al público en su página WEB y al documento [6], específicamente para las Quebradas Corrientes Y Montera del municipio de Barbosa Antioquia.

3.1.2 Información hidrológica

Se utilizará como referente para generar las curvas IDF el documento [9], el cual permitirá definir parámetros para representar los regímenes de lluvia para las distintas zonas del país, al igual que los mapas de precipitación total anual, precipitación máxima mensual en 24h, y número de días con lluvia al año para Colombia los cuales pueden ser consultados de forma gratuita en el atlas climatológico de Colombia 1981-2010 en la página de libre acceso [3] y pueden ser asociados a los parámetros PT, M y N respectivamente. Se tomará como referente para la estimación de los números de curva el trabajo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín[6] del documento concretamente el parámetro CN (III), de igual forma con sistemas de información geográfica se determinaran los números de curva siguiendo la metodología expuesta por [10], tomando como base para determinar las coberturas y tipos de suelos en las cuencas objeto de estudio se tomaron como referencia [11] y [12].

3.2 Etapa 02: Número de curva

Para generar los números de curva asociados a las cuencas objeto de estudio se considera la metodología expuesta en [13] en el que se plantean la hipótesis conceptual de la escorrentia acumulada en una proporción de la cuenca es la infiltración acumulada como la precipitación bruta acumulada, una vez

descontada la fracción necesaria para que se produzca el encharcamiento, a la máxima infiltración acumulada. Para su cálculo se presenta la ecuación (39).

$$\frac{Q}{F} = \frac{P - P_o}{S} \quad (39)$$

Siendo s la máxima infiltración potencia; F la infiltración real después del encharcamiento, P la precipitación, Q la escorrentía superficial, y P_o el umbral de escorrentía, es decir, la cantidad de precipitación necesaria para que el suelo se encharque y la escorrentía superficial aparezca. Considerando que por continuidad se debe cumplir con la ecuación (40).

$$F = (P - P_o) - Q \quad (40)$$

Y asumiendo una relación media experimental entre el umbral de escorrentía y la máxima infiltración potencial se presenta en la siguiente ecuación (41).

$$P_o = 0.2 * S \quad (41)$$

Se llega a la ecuación (42).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)}{P + 0.8S} \quad (42)$$

Los estudios empíricos realizados por el SCS permitieron relacionar la máxima infiltración potencial con un parámetro de referencia, denominado número de curva CN, cuyos valores están tabulados entre 0 y 100, La máxima infiltración se obtiene con la ecuación (43).

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (43)$$

3.3 Etapa 03: Modelación Hidrológica- Computacional

Se desarrolla la herramienta computacional para estimar la variación de los caudales asociados a eventos extremos de precipitación en las cuencas Corrientes y Montera, ubicadas en el municipio de Barbosa departamento de Antioquia Colombia. Se toman como referencia los puntos de aforo en las coordenadas geográficas (6° 25' 01.11' N, 75° 22' 01.89' O) para la cuenca Corrientes, (6° 29' 35.36' N, 75° 15' 53.84' O), para la cuenca Montera. Se consideran, además, las condiciones actuales de las cuencas y sus crecientes tendencias a la variación espacial de los usos de suelo y mayores niveles de precipitación extrema asociada al cambio climático, parámetros morfométricos, precipitación, porcentaje de usos de suelo, números de curva y demás parámetros requeridos en las modelaciones en Hidro-Eos_VB.

4. RESULTADOS

Una vez realizados los procesos de modelación computacional se estimaron los caudales en el marco de los objetivos propuestos considerando los parámetros morfométricos de las cuencas descritos en el presente documento, en la Tabla 1 se presentan los datos como elementos de entrada tipo *fichero*. En las Figuras 1 y 2 se presenta la ubicación geográfica de las cuencas Corrientes y Montera respectivamente.

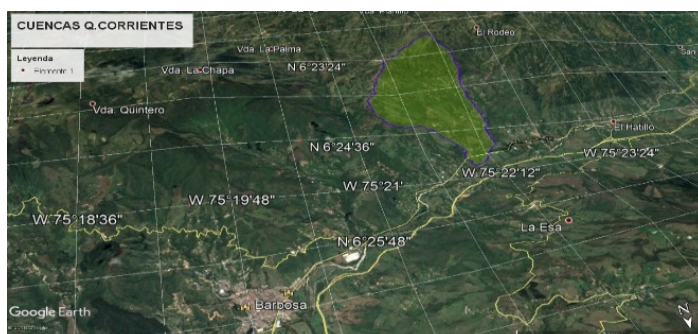


Figura 1. Cuenca quebrada Corrientes, municipio de Barbosa Antioquia [14]

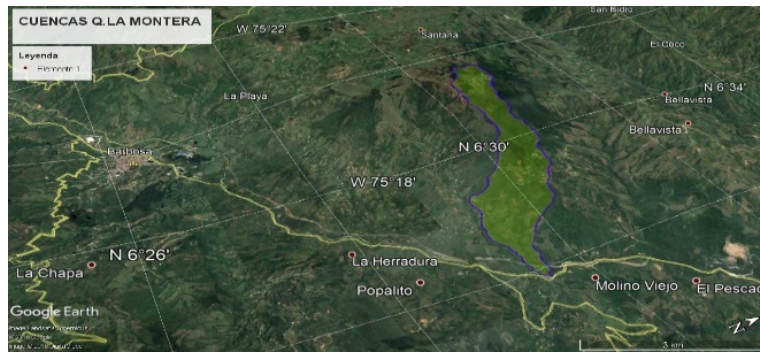


Figura 2. Cuenca quebrada Montera, municipio de Barbosa Antioquia [14]

4.1 Quebrada Montera

Se realizan las modelaciones computacionales en Hidro-Eos_VB, considerando los datos de entrada relacionados en el anexo 01, obteniendo los caudales de salida para distintos periodos de retorno por metodologías de hidrograma unitario y valores directos de caudal por metodologías empíricas y semi-empíricas como se describe a continuación en las Figuras 3 y 4.

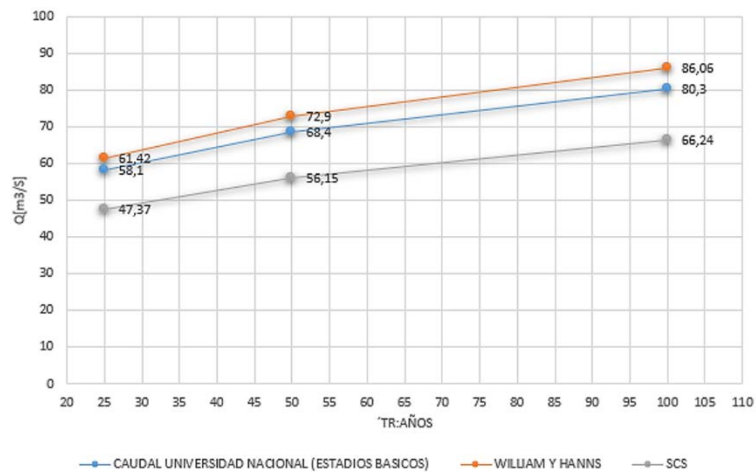


Figura 3. Resultados métodos del hidrograma unitario quebrada Montera

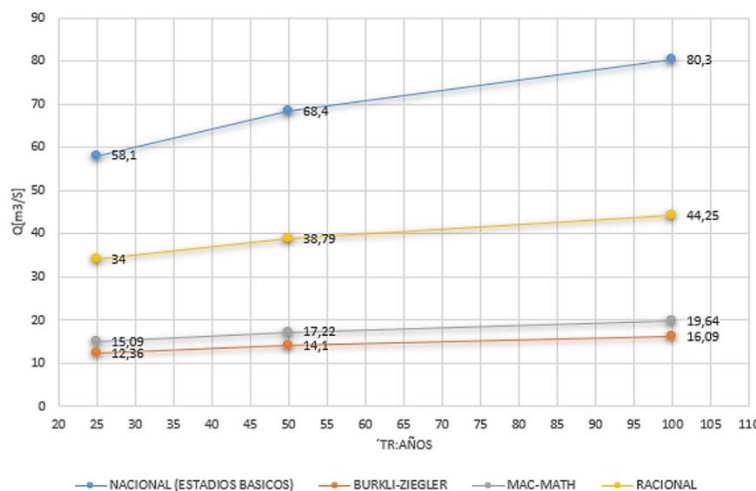


Figura 4. Resultados métodos semi-empíricos quebrada Montera

4.2 Quebrada Corrientes

Para la quebrada corrientes en el municipio de Barbosa, se realiza un procedimiento similar al realizado con la quebrada montera, resaltando además la diferencia en forma entre las mimas. Se realiza la modelación hidrológica computacional en Hidro-Eos_VB. Se evidencian los siguientes resultados como se relacionan a continuación en las Figuras 5 y 6.

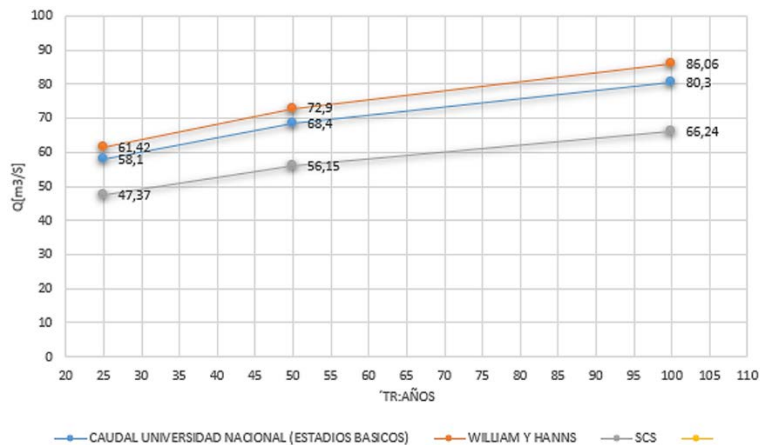


Figura 5. Resultados métodos del hidrograma unitario sintético quebradas Corrientes

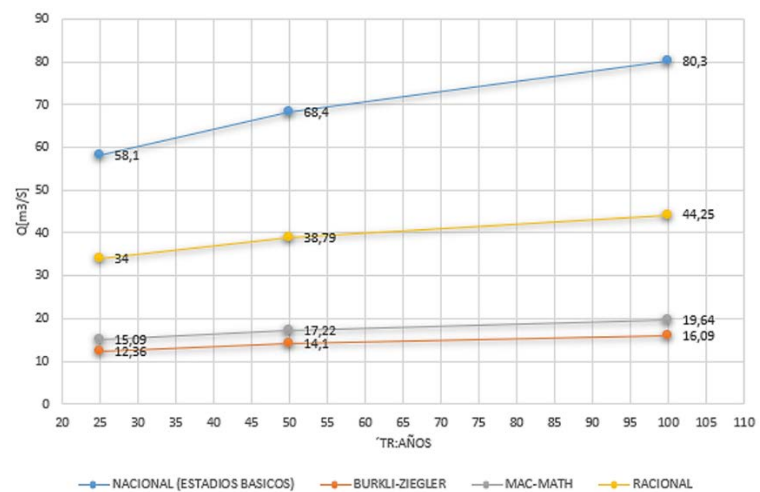


Figura 6. Resultados métodos semi-empíricos quebrada Corrientes

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Considerando como elemento de calibración el documento [6] y sus resultados de caudal mediante modelación lluvia escorrentía asociado a distintos periodos de retorno, se valida el orden de magnitud de los caudales obtenidos en la presente investigación con la herramienta computacional, Hidro-Eos_VB. Es de resaltar que se toma como base los resultados del estudio de la nacional [6], que, si bien tiene alcances y limitaciones por las diferencias metodológicas, al ser información secundaria de una fuente oficial, sirve de marco de referencia para cuantificar magnitudes de los caudales de salida en las cuencas objeto de estudio.

5.1 Quebrada Corrientes

Para los resultados obtenidos, se observa un mayor ajuste al valor de referencia, para la metodología del hidrograma unitario de William y Hann, validando los resultados obtenidos para el uso de la metodología. En [15] se estudian múltiples cuencas en el territorio antioqueño y se concluye el mayor ajuste que tiene el método para su selección en la estima de un hidrograma sintético de un proyecto.

Las metodologías empíricas como el método de Creager [16] y el método de Lowry[16], al no tomar en cuenta las características fisiográficas y de precipitación de la cuenca arrojan valores que no se pueden asociar a un periodo de retorno dado, por lo que no se recomienda su implementación. En cuanto a los valores calculados para las metodologías semi-empíricas si bien incluyen como variable la intensidad de la precipitación para diferentes periodos de retorno, los valores obtenidos subestiman el valor pico de caudal.

A continuación, en la Tabla 4 se presentan los errores relativos para las diferentes metodologías, considerando como dato de caudal para la respectiva calibración los resultados obtenidos por la

universidad nacional [4], al no contar con una serie de caudales dado que se trata de una cuenca no instrumentada.

Tabla 4. Cálculo del error absoluto y relativo para la quebrada Corriente

TR	Caudal Universidad Nacional [4] (m3/s)	Hidrograma unitario			Metodologías semi-empíricas		
		William y Hanns (m3/s)	SCS (m3/s)	Burkli-Ziegler (m3/s)	Mac-Math (m3/s)	Racional (m3/s)	
25	58.1	61.42	47.37	12.36	15.09	34	
50	68.4	72.9	56.15	14.1	17.22	38.79	
100	80.3	86.06	66.24	16.09	19.64	44.25	
TR	Cálculo del error absoluto = Eabs=A-A´						
25		3.32	10.73	45.74	43.01	24.1	
50		4.5	12.25	54.3	51.18	29.61	
100		5.76	14.06	64.21	60.66	36.05	
TR	Cálculo del error relativo= Eabs/Valor Referencia						
25		0.057	0.185	0.787	0.740	0.415	
50		0.066	0.179	0.794	0.748	0.433	
100		0.072	0.175	0.800	0.755	0.449	

5.2 Quebrada la Montera

En cuanto a la quebrada montera, se obtiene un mejor para los caudales calculados implementado la metodología de [17], si bien la cuenca es ligeramente más alargada en su forma, se obtienen resultados concluyentes para la dicha metodología, de forma similar a la quebrada montera, las metodologías empíricas presentan valores que no serán tomados en cuenta dado que no se pueden asociar a un valor específico de periodo de retorno, y las metodologías semi-empíricas de subestiman el valor al pico de caudal, a continuación en la tabla 5 se presentan los errores absolutos calculados.

Tabla 5. Cálculo del error absoluto y relativo para la quebrada montera

TR	Caudal Universidad Nacional [4]	Hidrograma unitario			Metodologías semi-empíricas		
		William y Hanns (m3/s)	SCS (m3/s)	Burkli-Ziegler (m3/s)	Mac-Math (m3/s)	Racional (m3/s)	
25	76.9	61.88	46.72	11	13.79	34.67	
50	84.7	73.63	55.61	12.54	15.74	39.55	
100	93.2	87.13	65.84	14.31	17.95	45.12	
TR	Cálculo del error absoluto = Eabs=A-A´						
25		15.02	30.18	65.9	63.11	42.23	
50		11.07	29.09	72.16	68.96	45.15	
100		6.07	27.36	78.89	75.25	48.08	
TR	Cálculo del error relativo= Eabs/Valor Referencia						
25		0.195	0.392	0.857	0.821	0.549	
50		0.131	0.343	0.852	0.814	0.533	
100		0.065	0.294	0.846	0.807	0.516	

6. CONCLUSIONES

Como resultado de la presente investigación se desarrolló una herramienta computacional que permite la estimación de caudales asociados a distintos periodos de retorno, mediante modelación lluvia escorrentía, para las metodologías de William-Hanns, SCS, métodos Racional, Creager, Lowry, Burkli Ziegler y Mac-Math si bien los dos primeros métodos son de Hidrograma Unitario Sintético y los otros de estimación directa, se presentan a manera de determinar su variación en cuanto al valor de caudales para los periodos de retorno 25-50-100 del estudio desarrollado por la universidad nacional [4].

En términos de gestión del riesgo de desastres, la herramienta desarrollada podrá servir para realizar análisis de susceptibilidad hidrológica en cuencas de altas montaña, toda vez que Hidro_Eos_VB permite la

variación espacial de los usos y tipos de suelo en la cuenca ingresado como un valor numérico asociado al número de curva NC y coeficiente de escorrentía C para el cálculo de las pérdidas hidrológicas, de igual manera se puede considerar en él, el incremento de las precipitaciones asociadas al cambio climático reflejados en los valores de N: número de días con lluvia al año, M: valor máximo de la precipitación en 23h y PT: valor de la precipitación total. Es de tener en cuenta que para el ingreso de la magnitud de los parámetros para el caso de investigación se basó en información secundaria con fuente del Instituto de meteorología y estudios ambientales IDEAM, la herramienta computacional admite valores de distintas procedencias quedando sujeto al criterio del usuario la validación de los datos con los que lo alimenta.

Si bien Hidro-Eos_VB, considera en su algoritmo la posibilidad de variación espacial de los números de curva en función de la cobertura vegetal y tipos de suelo, su implementación queda restringida a futuros desarrollos y a un mayor número de modelaciones en cuencas de alta montaña, para llegar a resultados concluyentes en cuanto a la validez de las metodologías empleadas. Es de considerar además que la introducción de los parámetros tiempo de concentración (TC) y número de curva (NC) es manual, se puede implementar como herramienta computacional de análisis en cuencas para modelación lluvia escorrentía de menor tamaño. (áreas menores 51 km²).

La información base para la generación de las curvas IDF se basa en la metodología de Díaz Granados [9], con información complementaria del IDEAM, es de tener en cuenta que para futuras investigaciones se puede considerar incluir un algoritmo complementario basado en una metodología más actual para la estimación de curvas IDF.

Para la estimación de los tiempos de concentración, se resalta para futuros desarrollos la escogencia de metodologías probadas que se ajusten a las condiciones morfométricos particulares de los Andes o en su defecto para zonas puntuales de análisis, de igual forma la inclusión de las metodologías de Snyder y Clark e Hidrograma Unitario Geomorfológico de Rodríguez-Iturbe y Valdés [18] para establecer un umbral de análisis mayor.

Si bien el método racional para la estimación de caudales en unidades hidrológicas resulta muy conveniente y práctico por su simplicidad comparado con el proceso de cálculo del Hidrograma Unitario, es importante conocer los criterios en cuanto a su uso para realizar estimaciones de manera eficiente y acertada, dado que es un método que se aplica para cuencas con tiempos de concentración menor a 6h [19].

En términos de gestión del riesgo queda para futuras investigaciones relacionar la variación espacial de las coberturas y tipos de suelos en la cuenca como medida estructural con relación directa en la escorrentía y caudales de salida en las cuencas de alta montaña, definiendo escenarios de cambios de usos de suelo por al menos 3 escenarios de análisis.

Es de tener presente que para validar los resultados obtenidos se consideró el estudio realizado por la Universidad Nacional [4], ya que de forma gráfica se posibilitará realizar una primera medida de aproximación a los resultados obtenidos en la modelación hidrológica computacional.

La utilización de la herramienta computacional está limitada a que los usuarios deben tener conocimientos mínimos en hidrología e hidráulica, que tengan criterio para validar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] C. Congreso de la república, *Gestión del riesgo, responsabilidad, principios, definiciones y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*, vol. 1, no. Abril 24. 2012, p. 58.
- [2] Qgis.org, "Qgis," 2021. <https://www.qgis.org/es/site/>.
- [3] M. y E. A. IDEAM - Instituto de Hidrología, "IDEAM," 2021. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/>
- [4] D. B. Kurtz, A. R. Perucca, D. D. Ybarra, C. Fernández López, S. Rey Montoya, and R. Barrios, "El fenómeno el Niño," *Comp. Superf. Afect. por excesos hídricos en Corrientes. Inf. técnico y Softw.*, 2015.
- [5] M. Caballero, S. Lozano, and B. Ortega, "Efecto invernal, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra," *Rev. Digit. Univ.*, vol. 8, no. 10, pp. 1–12, 2007.

- [6] S. M. Universidad nacional de Colombia, "Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, la Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial," 2018.
- [7] J. David, R. I. C. Hernández, and H. Recursos, "Estimación de caudales máximos usando hidrogramas unitarios sintéticos y el método racional."
- [8] F. Pedro C, "Diseño Hidrológico," 2011.
- [9] M. Vargas, Rodrigo. Díaz Granados, "Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia," *XIII Semin. Nac. hidrología e hidráulica*, p. 14, 1998.
- [10] T. E. Montserrat Ferrér, Joaquín Rodríguez, "Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica," vol. 4, no. diciembre, pp. 43-58, 1995.
- [11] Departamento de Antioquia, "Levantamiento semi-detallado de las Coberturas Terrestres," 2007.
- [12] Departamento de Antioquia, "Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras," 2007.
- [13] M. Ferrér, J. Rodríguez, and T. Estrela, "Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica," *Ing. del agua*, vol. 2, no. 4, pp. 43-58, 1995.
- [14] llc google, "Google earth," 2021.
- [15] O. J. Mesa, R. A. Smith, and C. P. Campuzano, "Análisis comparativo de algunos métodos de estimación del Hidrograma Unitario Sintético," *Av. en Recur. hidráulicos*, no. 04, pp. 91-113, 1997.
- [16] D. Dominguez, Ramón. Jimenez Zuñiga, Francisco. Rojas, *Metodos hidrológicos para predicción de escurrimientos*. 1992.
- [17] P. Fatorelli, Sergio. Fernandez, *Diseño hidrológico*, Segunda. 2011.
- [18] R. García-Bartual, "Estimación de la respuesta hidrológica de una cuenca sobre la base de la teoría del hidrograma unitario geomorfológico," *Cuaternalario y Geomorfol.*, vol. 3, pp. 1-4, 1989.
- [19] J. J. V. Upegui and A. B. Gutiérrez, "Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales," *Dyna*, vol. 78, no. 165, pp. 58-71, 2011.

Estudio de las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas de la hematita $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Luisa Fernanda Vargas Restrepo¹

Harrison Osfrey Salazar Tamayo²

César Augusto Barrero Meneses³

Universidad de Antioquia

Colombia

La hematita $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ es uno de los óxidos de hierro más comunes en la naturaleza y generalmente se encuentra en rocas y suelos provenientes de los procesos geológicos que ocurren en la Tierra. Por otro lado, sus propiedades físicas son de interés para la comunidad científica debido a sus potenciales aplicaciones en la industria. El objetivo principal del presente trabajo fue estudiar las propiedades estructurales, morfológicas y magnéticas del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ sometido a molienda mecánica. La muestra obtenida fue caracterizada usando las técnicas de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de rayos X por dispersión de energía, espectroscopía infrarroja y espectroscopía Mössbauer. El comportamiento magnético del material fue evaluado mediante el análisis de ciclos de histéresis a temperatura ambiente. De forma general, los resultados de todas las técnicas de caracterización confirmaron la presencia de hematita como única fase cristalina y la ausencia de contaminantes (impurezas) que podrían aparecer durante el proceso de molienda. En términos de morfología, la muestra de estudio consiste en aglomerados de partículas con formas irregulares y tamaños micrométricos. Los espectros infrarrojo y Mössbauer confirmaron la presencia de cationes de hierro con estados de oxidación +3 y coordinación octaédrica. Finalmente, se encontró que el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ tiene comportamiento ferromagnético débil a temperatura ambiente.

¹ Contacto: luisaf.vargas@udea.edu.co

² Contacto: harrison.salazar@udea.edu.co

³ Contacto: cesar.barrero@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La hematita $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ es un material inorgánico que se encuentra en la naturaleza en estado sólido. Este mineral corresponde a uno de los óxidos de hierro más estudiados debido a su abundancia natural e interesantes propiedades físicas. La hematita se encuentra de forma natural en rocas (suelos) provenientes de los procesos geológicos que ocurren en la Tierra. Debido a que estas rocas contienen un gran número de minerales, la hematita es extraída usando métodos físicos y químicos hasta obtener cristales con diferentes geometrías y tamaños.

Durante décadas, la hematita ha sido objeto de numerosas investigaciones con el propósito de encontrar potenciales aplicaciones en la industria. Entre las aplicaciones más comunes de la hematita encontramos la producción de catalizadores, pigmentos, sensores de gases, celdas solares y fotoelectrodos [1-3]. Este material también es usado para producir hierro y acero [4].

Por otro lado, la hematita tiene una fórmula química general de la forma $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, en donde los cationes de hierro y los aniones de oxígeno tienen estados de oxidación +3 y -2, respectivamente. La estructura cristalina del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ corresponde a un sistema cristalino trigonal con grupo espacial R3c. En la Figura 1 se puede observar la celda unitaria romboédrica de la hematita. Esta celda unitaria consiste en un arreglo de aniones de oxígeno en donde los cationes de hierro ocupan dos tercios de los sitios octaédricos disponibles. La celda unitaria romboédrica del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ está caracterizada por los parámetros de red $a=b=5.038 \text{ \AA}$ y $c=13.772 \text{ \AA}$ con una proporción $c/a=2.73$.

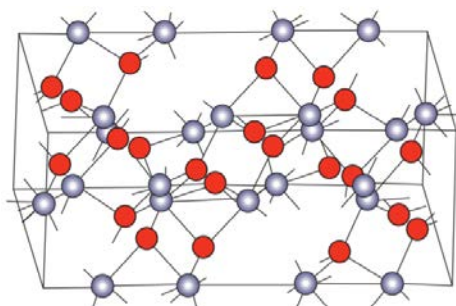


Figura 1. Celda unitaria romboédrica del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [5]. Las esferas rojas representan los átomos de oxígeno mientras que las esferas grises los átomos de hierro. Cada átomo de hierro está rodeado por seis átomos de oxígeno (sitios octaédricos)

Las propiedades físicas del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dependen principalmente del tamaño de partícula, el grado de cristalinidad, la morfología de las partículas y la porosidad [6-8]. En particular, la hematita es de especial interés para la comunidad científica debido a sus propiedades magnéticas. La hematita con tamaño micrométrico tiene comportamiento paramagnético a temperaturas superiores a la temperatura de Curie, por debajo de esta, su comportamiento es débilmente ferromagnético y presenta una transición de fase a un estado antiferromagnético cuando la temperatura de Morin es alrededor de $T_M=260 \text{ K}$ [9].

Si el tamaño de partícula es nanométrico, se presentan comportamientos magnéticos de la forma superparamagnetismo, spin glass, alta coercitividad y magnetización, y una disminución en las temperaturas de Curie y Morin [10].

Es importante mencionar que la hematita también es utilizada como material precursor en la síntesis de otros óxidos de hierro como las ferritas. El objetivo principal del presente trabajo es estudiar las propiedades estructurales, morfológicas, vibracionales y magnéticas de la hematita sometida a molienda mecánica. La caracterización física del material se llevará a cabo usando diferentes técnicas espectroscópicas.

2. MÉTODO

El material de estudio en el presente trabajo corresponde al óxido de hierro (III) conocido comúnmente como hematita. El material fue adquirido comercialmente (Merck) con una pureza de 99.9%. En la Figura 2a

se puede observar el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, el cual consiste en un polvo fino (color rojo-marrón) con tamaño de partícula de orden micrométrico.



Figura 2. a) Polvo de hematita con tamaño de partícula de orden micrométrico, y b) Mortero y pilón de ágata empleados para pulverizar el polvo de hematita

Inicialmente, el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fue pulverizado durante aproximadamente 50 minutos usando un mortero y pilón de ágata (Figura 2b). Sin embargo, con el propósito de obtener un polvo más fino y disminuir el tamaño de partícula, el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fue sometido a molienda mecánica. Es importante mencionar que en el presente trabajo no se desea inducir transformaciones químicas en el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ durante el proceso de molienda.

De forma general, la molienda mecánica es una técnica de procesamiento de polvos, en la cual los materiales sufren una continua fractura, deformación y soldadura. En la mayoría de los casos, la molienda mecánica es utilizada para disminuir el tamaño de partícula, mezclar reactivos y obtener mezclas homogéneas. En el proceso de molienda se utiliza un molino planetario en cuyo interior encontramos jarros que contienen pequeñas bolas y los materiales de estudio. La plataforma (disco) donde se encuentran los jarros comienza a girar, mientras que, al mismo tiempo, los jarros giran, pero en sentido contrario al giro de la plataforma. Estos dos movimientos en conjunto (disco y jarros) provocan que las bolas se muevan a altas velocidades en el interior de los jarros causando diferentes tipos de colisión como puede observarse en la Figura 3.

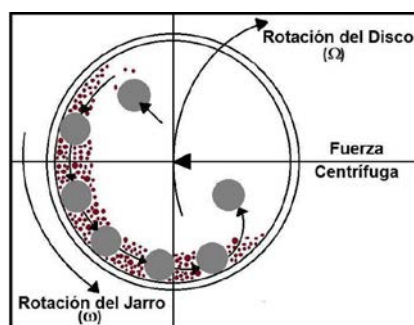


Figura 3. Movimiento de las bolas en el interior de los jarros durante el proceso de molienda. El material (color rojo) es fracturado y deformado debido a las colisiones entre las bolas y la superficie interna de los jarros, y las colisiones entre las bolas. Figura adaptada de C. Suryanarayana (2001) [11]

Los diferentes tipos de colisión provocan la fractura y deformación de los materiales en el interior de los jarros. La disminución del tamaño de partícula en los materiales sometidos a molienda mecánica se debe principalmente a las colisiones entre las bolas y la superficie interna de los jarros (colisión tipo bola-jarro). Las colisiones entre las bolas (colisión tipo bola-bola) son de menor frecuencia que las colisiones tipo bola-jarro.

Por otro lado, el proceso de molienda mecánica depende de muchos parámetros experimentales, en donde la mayoría pueden determinarse mediante ensayo-error o a través de trabajos de investigación reportados en la literatura. Entre los parámetros experimentales más importantes encontramos el tipo de molino, el material y tamaño de los jarros, la velocidad angular del disco, el material y tamaño de las bolas, la cantidad de material, la relación masa bola: masa polvo, el número de bolas por jarro y el tiempo de molienda.

En el presente trabajo, la molienda mecánica del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se llevó a cabo usando un molino planetario Fritsch Pulverisette 5 (Figura 4a). La molienda se realizó en aire, a presión atmosférica y a temperatura ambiente. Se utilizaron jarros de acero inoxidable de 80 mL de capacidad (Figura 4b) y bolas de 10 mm de diámetro hechas del mismo material de los jarros (Figura 4c). La relación masa bola:masa polvo fue 16:1 mientras que la velocidad angular del disco fue 160 rpm. El tiempo de molienda fue de 3 h con descanso de 30 min por cada hora para evitar el desgaste y sobrecalentamiento de las bolas.



Figura 4. a) Molino planetario Fritsch Pulverisette 5 empleado en la molienda mecánica del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. En el proceso de molienda se utilizaron: b) jarros, y c) bolas de acero inoxidable

Con el propósito de estudiar las propiedades estructurales, morfológicas, vibracionales y magnéticas del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, la muestra de estudio fue caracterizada usando las técnicas difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido SEM, espectroscopía de rayos X por dispersión de energía EDS, espectroscopía infrarroja FTIR y espectroscopía Mössbauer. El comportamiento magnético del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fue evaluado mediante el análisis de ciclos de histéresis a temperatura ambiente.

Los difractogramas fueron obtenidos a temperatura ambiente usando el difractómetro Malvern Panalytical modelo Empyrean. Este equipo posee un detector PIXcel^{3D} y una fuente de rayos X (CuK α) con longitud de onda de $\lambda=1.5405$ Å. Las medidas fueron realizadas en el intervalo de ángulos (2θ) $10^\circ\text{-}75^\circ$ con pasos de 0.04° y tiempo por paso de 23s. El análisis de los difractogramas se llevó a cabo mediante el programa X'Pert HighScore Plus, el cual permite cambiar escala de ejes, optimizar background, corregir línea base, y determinar posiciones, anchos a media altura e intensidades relativas de los picos de difracción.

Las micrográficas SEM fueron obtenidas usando el microscopio electrónico de barrido JSM-6490LV marca JEOL. En el análisis SEM se utilizó un voltaje acelerador de 20 kV y una magnificación de 5000x. Los espectros EDS fueron obtenidos usando el espectrómetro INCA PentaFETx3 marca Oxford Instruments, el cual está acoplado al microscopio electrónico de barrido descrito previamente. Por otro lado, los espectros FTIR fueron obtenidos a temperatura ambiente usando el espectrómetro infrarrojo IRTracer-100 marca Shimadzu. El rango de número de onda empleado fue $400\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ con pasos de 4.0 cm^{-1} .

Los espectros Mössbauer fueron obtenidos a temperatura ambiente y en la geometría estándar de transmisión usando una fuente radiactiva de ^{57}Co embebida en una matriz de Rodio (Rh). El ajuste de los espectros se llevó a cabo en el programa Mössbauer Spectral Analysis Software (Recoil) [12]. En los análisis se utilizó una lámina delgada de $\alpha\text{-Fe}$ como material de calibración. Finalmente, los ciclos de histéresis fueron obtenidos a temperatura ambiente usando el equipo Physical Property Measurement System PPMS, el cual tiene acoplado un módulo Vibrating Sample Magnetometer VSM que permite medir la magnetización en función del campo magnético aplicado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Difracción de Rayos X

La técnica difracción de rayos X fue utilizada en el presente trabajo para identificar las fases cristalinas presentes en la muestra de estudio. En la Figura 5 se puede observar el difractograma del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El espectro fue analizado usando el programa X'Pert HighScore Plus, el cual permite comparar el difractograma obtenido con difractogramas estándar (referencia) reportados en Inorganic Crystal Structure Database ICSD.

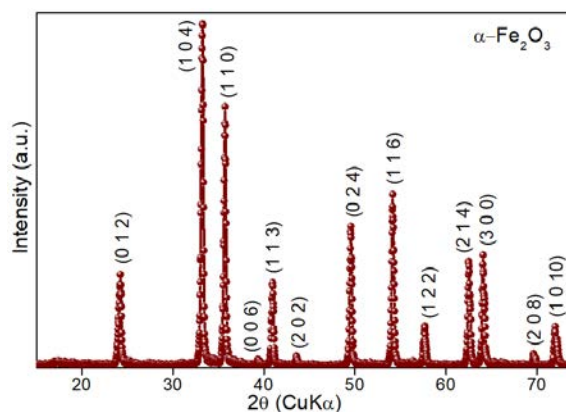


Figura 5. Difractograma del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

El difractograma consiste en 13 picos de difracción localizados en las posiciones (2θ) 24.3° , 33.3° , 35.7° , 39.3° , 41.0° , 43.6° , 49.5° , 54.1° , 57.7° , 62.6° , 64.1° , 69.7° y 72.0° e identificados con índices de Miller (0 1 2), (1 0 4), (1 1 0), (0 0 6), (1 1 3), (2 0 2), (0 2 4), (1 1 6), (1 2 2), (2 1 4), (3 0 0), (2 0 8) y (1 0 10), respectivamente. Todos los picos detectados en el difractograma coinciden en posición e intensidad relativa con picos de difracción reportados para el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [13]. Lo anterior confirma la alta pureza del material y la ausencia de contaminantes que podrían aparecer durante el proceso de molienda.

3.2 Microscopía Electrónica de Barrido

La técnica microscopía electrónica de barrido fue utilizada en el presente trabajo para estudiar morfología y distribución de tamaños de partícula en el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. En el análisis SEM se utilizó un voltaje acelerador de 20 kV y una magnificación de 5000x. En la Figura 6 se puede observar la micrografía SEM del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. De forma general, la micrografía SEM consiste en aglomerados de partículas con formas irregulares. Los tamaños de partícula en el material se encuentran en la escala micrométrica, sin embargo, se observa una distribución no homogénea de los tamaños de partícula.

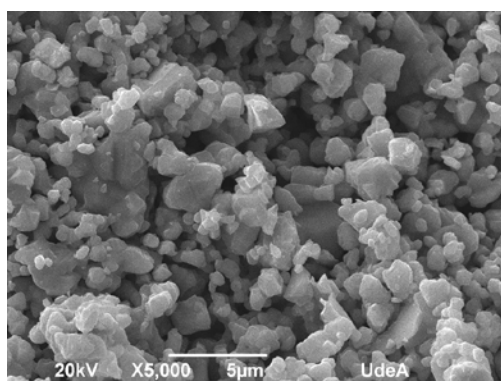


Figura 6. Micrografía SEM del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

3.3 Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía

La técnica espectroscopía de rayos X por dispersión de energía fue utilizada en el presente trabajo para estudiar la composición química elemental y la estequiometría de la muestra de estudio. En la Figura 7 se puede observar el espectro EDS del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El espectro fue graficado en los intervalos de energía 0.0-1.5 keV y 5.7-7.3 keV debido a que en estos rangos de valores se encuentran las contribuciones de los elementos químicos detectados en la muestra [14, 15].

En el espectro EDS del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se observa la presencia de los elementos químicos hierro (Fe) y oxígeno (O) confirmando la ausencia de impurezas u otros elementos químicos no deseados. Por otro lado, en la Tabla 1 se reportan los resultados cuantitativos del análisis EDS. Los valores obtenidos para los porcentajes en peso y los porcentajes atómicos de los diferentes elementos químicos confirman la estequiometría de la muestra.

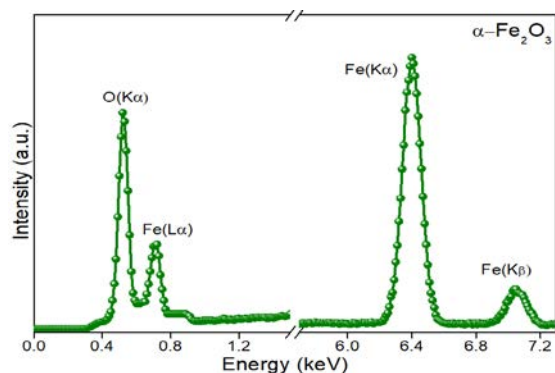


Figura 7. Espectro EDS del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Tabla 1. Porcentajes en peso (wt. %) y porcentajes atómicos (at. %) de los elementos químicos detectados en la muestra de estudio

Material	Fe	O	Fe	O	Fe/O
	(wt. %)	(wt. %)	(at. %)	(at. %)	---
$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	69.46	30.54	40.36	59.64	0.68

En particular, la razón entre los porcentajes atómicos de los elementos químicos Fe y O, es decir, el cociente Fe/O tiene un valor de 0.68, el cual es muy cercano al valor teórico (0.67) obtenido en los cálculos estequiométricos.

3.4 Espectroscopía Infrarroja

La técnica espectroscopía infrarroja fue utilizada en el presente trabajo para estudiar las propiedades vibracionales del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El objetivo principal es determinar las frecuencias fundamentales de vibración (modos vibracionales) en la estructura cristalina romboédrica de la hematita. En la Figura 8 se puede observar el espectro FTIR del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El espectro fue obtenido en el rango de número de onda 400-800 cm^{-1} debido a que el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ presenta sus principales bandas de absorción en este rango de valores.

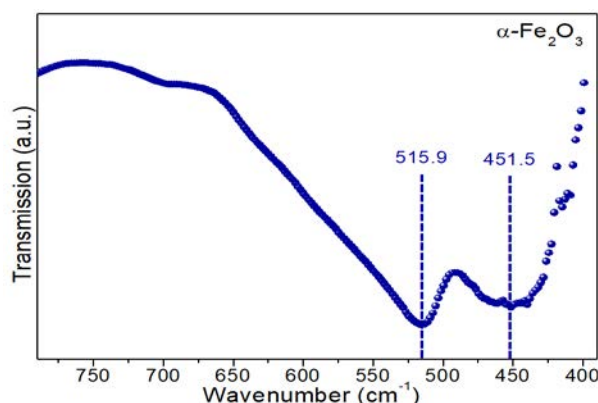


Figura 8. Espectro FTIR del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

El espectro FTIR del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ consiste en dos bandas de absorción situadas en 451.5 cm^{-1} y 515.9 cm^{-1} , las cuales fueron relacionadas con vibraciones tipo tensión (stretching vibrations) de los enlaces Fe-O en sitios octaédricos de la estructura romboédrica de la hematita [16]. No se observan bandas de absorción de otras fases cristalinas confirmando la alta pureza del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

3.5 Espectroscopía Mössbauer

La técnica espectroscopía Mössbauer fue utilizada en el presente trabajo para identificar y estudiar los materiales que contienen átomos de hierro (Fe) en su estructura cristalina. El objetivo principal es obtener información sobre sitios de coordinación, estados de oxidación y ordenamiento magnético en el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

En la Figura 9 se puede observar el espectro Mössbauer del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El espectro fue ajustado usando el programa Recoil. En el proceso de ajuste se utilizó un sexteto relacionado con los cationes Fe^{3+} que ocupan sitios octaédricos en la estructura romboédrica del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

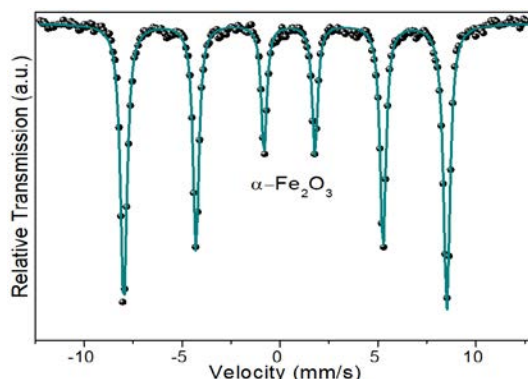


Figura 9. Espectro Mössbauer del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Los parámetros hiperfinos obtenidos a partir del ajuste fueron $\delta=0.38$ mm/s (isomer shift), $2\varepsilon=-0.11$ mm/s (quadrupole shift) y $H=51.1$ T (magnetic hyperfine field), los cuales confirman la presencia de cationes Fe^{3+} con coordinación octaédrica. Todos los anteriores parámetros están en acuerdo con parámetros hiperfinos reportados en la literatura para hematita con tamaño de partícula de orden micrométrico [17].

3.6 Medidas Magnéticas

Las propiedades magnéticas del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fueron evaluadas mediante el análisis de ciclos de histéresis a temperatura ambiente. En la Figura 10 se puede observar la curva de magnetización en función del campo magnético externo (ciclo de histéresis) del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. El análisis magnético se realizó a temperatura ambiente (300 K) aplicando campos magnéticos en el intervalo $[-1, +1]$ T.

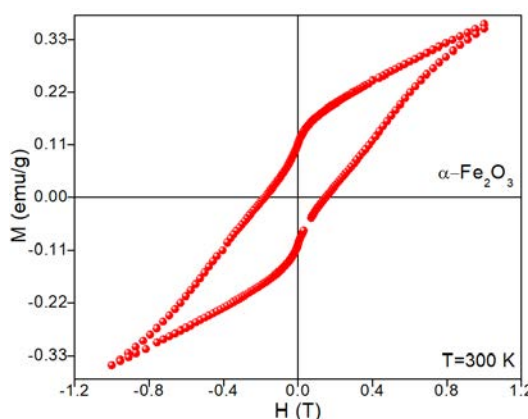


Figura 10. Ciclo de histéresis del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

De forma general, el ciclo de histéresis del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se caracteriza por tener baja magnetización de saturación y alto campo coercitivo. Lo anterior indica que la hematita tiene características de materiales magnéticos duros y comportamiento ferromagnético débil a temperatura ambiente. La magnetización máxima en la muestra alcanza un valor de 0.35 emu/g mientras que el campo coercitivo tiene un valor de 0.18 T. Todos los anteriores valores se encuentran en el rango de valores reportados en la literatura para el material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [18].

4. CONCLUSIONES

El material de estudio en el presente trabajo corresponde al óxido de hierro (III) conocido comúnmente como hematita. Este material fue adquirido comercialmente en forma de polvo con tamaño de partícula de orden micrométrico. El objetivo principal del presente trabajo fue estudiar las propiedades estructurales, morfológicas, vibracionales y magnéticas del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

El material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fue sometido a molienda mecánica con el propósito de disminuir el tamaño de partícula. La muestra obtenida por molienda fue caracterizada usando diferentes técnicas espectroscópicas. El difractograma del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ confirmó la presencia de la hematita como única fase cristalina y la ausencia de contaminantes que podrían aparecer durante el proceso de molienda.

Todos los picos de difracción detectados fueron relacionados con planos cristalográficos del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. La micrografía SEM del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mostró que el polvo de hematita consiste en aglomerados de partículas con formas irregulares y tamaños micrométricos. El espectro EDS del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ confirmó la estequiometría de la muestra y la ausencia de impurezas.

Por otro lado, en el espectro FTIR del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se observaron dos bandas de absorción relacionadas con vibraciones de los enlaces Fe-O en sitios octaédricos de la estructura cristalina romboédrica. El espectro Mössbauer del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ confirmó la presencia de cationes de hierro con estados de oxidación +3 y coordinación octaédrica. Finalmente, el ciclo de histéresis del material $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ indicó que la muestra de estudio tiene comportamiento ferromagnético débil a temperatura ambiente y presenta características de materiales magnéticos duros.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de Estrategia de Sostenibilidad del Grupo de Estado Sólido 2018-2019 CODI-UdeA y la Convocatoria 727 Doctorados Nacionales COLCIENCIAS.

REFERENCIAS

- [1] A. M. Escobaro, L. R. Pizzio, and G. P. Romanelli, "Catalizadores magnéticos basados en óxidos de hierro: Síntesis, propiedades y aplicaciones," *Ciencia en Desarrollo*, vol. 10, no. 1, pp. 79-101, 2019.
- [2] S. S. Shinde, R. A. Bansode, C. H. Bhosale, and K. Y. Rajpure, "Physical properties of hematite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ thin films: Application to photoelectrochemical solar cells," *Journal of Semiconductors*, vol. 32, no. 1, p. 013001, 2011.
- [3] K. Sivula, F. Le Formal, and M. Grätzel, "Solar water splitting: Progress using hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) photoelectrodes," *ChemSusChem*, vol. 4, pp. 432-449, 2011.
- [4] M. Groover. "Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas". México: McGraw, 2007.
- [5] G. Reddy and P. Smirniotis, "Mechanism and kinetics of the WGS reaction," in *Water gas shift reaction: Research developments and applications*, G. Reddy and P. Smirniotis, Elsevier, 2015, pp. 225-261.
- [6] L. C. Sánchez, J. D. Arboleda, C. Saragovi, R. D. Zysler, and C. A. Barrero, "Magnetic and structural properties of pure hematite submitted to mechanical milling in air and ethanol," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 389, pp. 145-149, 2007.
- [7] S. J. Stewart, R. A. Borzi, E. D. Cabanillas, G. Punte, and R. C. Mercader, "Effects of milling-induced disorder on the lattice parameters and magnetic properties of hematite," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 260, pp. 447-454, 2003.
- [8] K. R. Tolod, S. Hernández, E. A. Quadrelli, and N. Russo, "Visible light-driven catalysts for water oxidation: Towards solar fuel biorefineries," *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 178, pp. 65-84, 2019.
- [9] F. Bødker, M. F. Hansen, C. B. Koch, K. Lefmann, and S. Mørup, "Magnetic properties of hematite nanoparticles," *Physical Review B*, vol. 61, no. 10, pp. 6826-6838, 2000.
- [10] R. D. Zysler, D. Fiorani, A. M. Testa, L. Suber, E. Agostinelli, and M. Godinho, "Size dependence of the spin-flop transition in hematite nanoparticles," *Physical Review B*, vol. 68, p. 212408, 2003.
- [11] C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling," *Progress in Materials Science*, vol. 46, pp. 1-184, 2001.
- [12] K. Lagarec and D. Rancourt, "Recoil-Mössbauer spectral analysis software", University of Ottawa, Canadá, 1998.
- [13] H. Salazar-Tamayo, M. A. Márquez, and C. A. Barrero, "Effect of machine variables in the mechanosynthesis of NiFe_2O_4 : A microstructural and kinematical study," *Powder Technology*, vol. 289, pp. 126-134, 2016.
- [14] A. Ramzannezhad, A. Bahari, and P. Gill, "Optical and nano structural properties of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nanorods interacting with Bovine Serum Albumin (BSA) protein solution," *J. of Nanostructures*, vol. 9, no. 1, pp. 41-50, 2019.
- [15] R. Li et al., "Heterogeneous reaction of NO_2 with hematite, goethite and magnetite: Implications for nitrate formation and iron solubility enhancement," *Chemosphere*, vol. 242, p. 125273, 2020.
- [16] M. Tadic, D. Trpkov, L. Kopanja, S. Vojnovic, and M. Panjan, "Hydrothermal synthesis of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) nanoparticle forms: Synthesis conditions, structure, particle shape analysis, cytotoxicity and magnetic properties," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 792, pp. 599-609, 2019.
- [17] H. Salazar-Tamayo, K. E. Tellez, and C. A. Meneses, "Cation vacancies in NiFe_2O_4 during heat treatments at high temperatures: Structural, morphological and magnetic characterization," *Materials Research*, vol. 22, no. 5, p. e20190298, 2019.

- [18] S. Sivakumar, D. Anusuya, C. P. Khatiwada, J. Sivasubramanian, A. Venkatesan, and P. Soundhirarajan, "Characterizations of diverse mole of pure and Ni-doped α -Fe₂O₃ synthesized nanoparticles through chemical precipitation route," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 128, pp. 69-75, 2014.

Caracterización de cargas vehiculares en un puente con monitoreo estructural

Mauricio Marín¹

Diana Millán Yusti²

Sebastián Castellanos Toro³

Johannio Marulanda Casas⁴

Peter Thomson⁵

Universidad del Valle

Colombia

Los puentes son estructuras sometidas a cargas medioambientales y de servicio que, cuando sobrepasan las de diseño, sufren deterioro, daños e incluso el colapso. Esta situación se agrava por el aumento de las solicitaciones de carga debido al incremento del flujo vehicular y la capacidad de carga del parque automotor. En Colombia, solamente hasta 2014 se actualizaron los mapas de amenaza sísmica y la calibración de la carga viva vehicular de diseño para la práctica, evidenciando así que la sobrecarga representa una seria amenaza para la salud estructural de los puentes. Implementar una metodología de identificación de la carga vehicular en movimiento facilitaría tomar decisiones como restricción de uso, construcción de un puente nuevo, repotenciación o rehabilitación de la estructura. Este trabajo presenta la estimación de las cargas reales, de manera no invasiva, en un determinado escenario de carga que se presenta en un puente tipo de la ciudad de Cali, Colombia, mediante un sistema de monitoreo estructural. La instrumentación consta de acelerómetros y galgas extensiométricas ubicados bajo el puente, para medir aceleraciones y deformaciones unitarias en el tablero y en la parte inferior de las vigas, a la mitad de la luz, lo cual supone la ventaja de no afectar la funcionalidad del puente ni la velocidad de operación de los vehículos, a diferencia de métodos tradicionales de estimación de carga. Se implementa un algoritmo para estimar el peso bruto del vehículo, probado mediante simulaciones numéricas, usando un modelo ajustado del puente en elementos finitos, y se verifica en campo indicando resultados con precisión aceptable en la práctica. Además, se muestra que se puede lograr una estimación satisfactoria de la carga cuando la rugosidad de la superficie de rodadura y la inclinación de la aproximación al puente son altas.

¹ Contacto: mauricio.marin@correounivalle.edu.co

² Contacto: diana.c.millan@correounivalle.edu.co

³ Contacto: sebastian.castellanos@correounivalle.edu.co

⁴ Contacto: johannio.marulanda@correounivalle.edu.co

⁵ Contacto: peter.thomson@correounivalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1994 la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS desarrolla la reglamentación para el diseño de los puentes en Colombia con base en documentación internacional, como la especificación AASHTO LRFD Bridge Specifications for Highway Bridges [1]. Antes de esto, el diseño de puentes se hacía con base en especificaciones estadounidenses directamente. Desde su primera versión, la reglamentación colombiana ha tenido una única actualización en 2014, la cual tuvo cambios sustanciales, como la actualización de los mapas de amenaza sísmica y la calibración para la práctica colombiana de la carga viva vehicular de diseño.

En Colombia existen puentes con 50 años o más de funcionamiento y Cali no es ajena a este fenómeno y se estima que tiene puentes con edad promedio que oscila entre 30 y 50 años. Lo anterior indica que parte de los puentes de la red urbana de la ciudad se han diseñado con especificaciones que difieren de las solicitaciones locales vigentes. Además, en Cali, 258 de los puentes vehiculares, es decir el 90%, están construidos en concreto y de ellos el 92% son de una sola luz [2]. Asimismo, en años recientes se evidencia un incremento en el flujo vehicular y la capacidad de carga del parque automotor, lo que, sumado a la condición de deterioro presente en algunos de estos puentes de la ciudad, muestra la necesidad de estimar la carga real que transita sobre dichas estructuras.

La identificación de la carga que pasa por un puente se realiza de manera invasiva o no invasiva dependiendo si el tráfico y la funcionalidad del puente se ven afectados. En el caso de una identificación invasiva existen metodologías que implementan estaciones de control de peso que son muy precisas, sin embargo, presentan desventajas al ser evadidas por conductores, tener que desviar los vehículos de su ruta y su alta demanda de espacio, lo que las hace inviables de usar en zonas urbanas [3-5]. Por el contrario, las metodologías para la identificación de la carga de forma no invasiva no obstruyen el flujo vehicular, y se pueden desarrollar por medio de aforos o monitoreo estructural, pero presentan desventajas, como incongruencias en la determinación de cargas y problemas con los equipos utilizados (ruido excesivo o la seguridad de los operarios) [6].

El sistema de pesaje en movimiento en puentes B-WIM ofrece una solución a todos estos inconvenientes, el cual está compuesto de dispositivos portátiles capaces de entregar mediciones confiables del tipo de vehículo, tamaño y peso de los vehículos en movimiento [7].

Wiśniewski et al. [8] promueven el desarrollo de una nueva norma para la evaluación de puentes y, a su vez, el uso de información del tráfico derivada de sistemas de pesaje en movimiento -información WIM- para dicha evaluación. Otros estudios también han resaltado mediante información WIM, como se ha visto en algunos puentes [9-11]. Por el contrario, procedimientos de evaluación basados en información WIM evitan que dichas normas condenen puentes que en realidad son seguros [12]. En análisis de fatiga se resalta la importancia de implementar registros de sistemas de pesaje en movimiento como entrada para simular cargas vehiculares estocásticas [13-15].

La metodología de identificar la carga en movimiento sobre un puente, sin interrumpir su tráfico fue propuesta por Moses, utilizando contadores de líneas de tráfico para determinar velocidad y espaciamiento entre ejes del vehículo. Anticipa que la respuesta calculada y la respuesta registrada en el puente deben ser muy parecidas. Moses propuso un algoritmo para estimar el peso del vehículo con base en la información registrada en puntos de máxima respuesta, donde la velocidad y el espaciamiento entre ejes son información de entrada [16].

La relación entre el cambio de magnitud en la respuesta de la estructura y el tránsito de un vehículo, presentado por Moses, fue la base de proyectos como AXWAY y CULWAY desarrollados en Australia [17, 18]. En CULWAY se midió el peso por eje de camiones utilizando alcantarillas de luces cortas (box coulverts), en las cuales se continuó implementando cintas interruptoras antes de llegar a la alcantarilla para conocer la velocidad del vehículo y número de ejes. En los noventa, proyectos europeos de implementación de técnicas B-WIM se preocuparon por resolver inconvenientes relacionados con la detección de ejes [19], como encontrar alternativas a los equipos instalados sobre la capa de rodadura, solucionando su baja durabilidad al estar en contacto directo con los vehículos y previniendo que los conductores de vehículos

pesados se desvíen de la ruta [3, 20]. Kalin et al. [21] recurrieron a señales de sensores medidores de deformación ubicados de forma alineada bajo la losa del puente para calcular el espaciamiento entre ejes y la velocidad, resaltando que su precisión es buena en puentes de luces cortas. Marques et al. lo hicieron en los rieles de un puente de vía férrea [22]. De manera alternativa, en un puente de Manitoba, Canadá, se identificó la carga basándose en el principio de que el área bajo la curva de respuesta es expresada como el producto del peso total del vehículo y el área bajo la línea de influencia (área de influencia). En esta investigación se realizó un análisis de fatiga a partir de la identificación del peso de los vehículos. Todos los sensores fueron ubicados en la subestructura [23].

Yu et al. [24] reducen la cantidad de sensores en el sistema B-WIM, desplegando únicamente los necesarios para estimación de peso, transformando la información suministrada por estos, mediante una Onda Morlet para encontrar un grupo de picos con información del vehículo entrando y saliendo del puente. De esta manera, utilizaron la respuesta global del puente para identificar tanto velocidad como peso, limitando esta técnica a una buena condición en la superficie de rodadura [20]. Esta investigación, también presentó un complemento al método de Moses dándole importancia a la posición transversal PT por la cual pasa el vehículo sobre el puente, haciendo la estimación para diferentes PT supuestas y estableciendo como verdadera aquella que presente menor error entre las respuestas, la registrada en campo y la calculada mediante las líneas de influencia LI.

La metodología BWIM fue aplicada en Colombia utilizando detectores de eje puestos sobre la superficie de rodadura [25]. A pesar de encontrar resultados con gran confiabilidad, los detectores de eje tienen una baja durabilidad debido a su exposición directa al tráfico [20].

Por lo anterior, surge la necesidad de hacer una identificación no invasiva de la carga que pasa por un puente tipo de la ciudad. Este documento presenta la implementación del algoritmo de Moses, complementado por Yu et al. [24] en un puente de 19 metros de longitud, con una pobre condición en la superficie de rodadura y una alta pendiente en la aproximación, condiciones que representan un reto en la identificación de la carga [5, 7, 21, 26, 27]. Se realizaron simulaciones numéricas y se calibraron las LI a partir de una prueba de carga. Se encontró que la identificación de la carga vehicular es aceptable.

2. MÉTODO

La velocidad y el espaciamiento entre ejes son indispensables para una identificación con el algoritmo de Moses. En investigaciones como la de Zhao et al. [7] se ha recurrido a registrar señales bajo la losa en dos puntos colineales, en la misma dirección del tráfico, para identificar la velocidad de los vehículos y el espaciamiento entre ejes. Específicamente, estos puntos deben situarse al 20%-40% y al 60%-80% de la luz, siendo la distancia entre ellos no menor a dos metros Kalin et al. [21]. Esta posición es debido a que el elemento de la estructura que tiene contacto directo con los ejes de los vehículos es la losa, además, cerca de los apoyos se presenta un pico más definido en las señales, puesto que esta zona del puente es más rígida y los efectos dinámicos son menos pronunciados [27]. Valiéndose de una función de correlación, mostrada en la ecuación (1), lograron obtener el tiempo que tarda un eje de un vehículo en moverse del punto donde está un sensor a otro [21].

$$\text{corr}(f, g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t + \tau)d\tau \quad (1)$$

Donde $f(t)$ y $g(t)$ son las respectivas señales de los dos sensores mencionados. También, para detectar la velocidad se utiliza el método presentado en [20], donde se amplifican los cambios repentinos de pendiente en la respuesta, mediante una transformación de ondas, como en la ecuación (2).

$$W_{\psi}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (2)$$

Donde $s(t)$ es la señal en función del tiempo, $\psi_{a,b}(t)$ es la función de transformación en términos de factores y la Onda Morlet, como se muestra en la ecuación (3) y en la ecuación (4), respectivamente.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

$$\psi(t) = e^{-(t^2/2)} \cos(5t) \quad (4)$$

Siendo a factor de escala, b factor de desplazamiento y $\psi(t)$ la función Onda Morlet. El algoritmo de Moses trabaja bajo la suposición de que la respuesta calculada y la respuesta registrada en el puente deben ser muy parecidas. El error entre ambas, en el tiempo k , se define en la ecuación (5).

$$E = \sum_{k=1}^T (M_k^c - M_k^m)^2 \quad (5)$$

El momento calculado en el tiempo k se define en la ecuación (6) y en la ecuación (7).

$$M_k^c = \sum_i^N A_i I_i, (k - C_i) \quad (6)$$

$$C_i = \frac{D_i f}{v} \quad (7)$$

Donde A_i es el peso del i ésimo eje del vehículo, $I_i, (k - C_i)$ es la ordenada de influencia en la posición del i ésimo eje, D_i es la distancia entre el primer eje y el i ésimo eje, f es la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición y v es la velocidad constante del vehículo, es decir que C_i es el número de registros correspondientes a D_i . Para minimizar el error entre la respuesta teórica y experimental, es necesario derivar parcialmente la ecuación (8) con respecto a A_i (el peso del i ésimo eje) [27].

$$\sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N A_i I_i, (k - C_i) I_j, (k - C_j) = \sum_{k=1}^T M_k^m I_j, (k - C_j) \quad (8)$$

Donde cada miembro de la ecuación se define en la ecuación (9) y en la ecuación (10).

$$F = [F_{ij}] = \sum_{k=1}^T I_i, (k - C_i) I_j, (k - C_j) \quad (9)$$

$$M = [M_j] = \sum_{k=1}^T M_k^m I_j, (k - C_j) \quad (10)$$

Por tanto, la ecuación (8) puede ser escrita de forma matricial en la ecuación (11).

$$FA = M \quad (11)$$

Encontrando una configuración de peso por eje a partir de la ecuación (11), y recalculando la respuesta M_{ck} con ayuda de una LI a cierta PT, Yu et al. se valieron de la ecuación (5) para conocer qué tan parecida es dicha respuesta a la registrada en campo. Por ello, reformuló la ecuación (6) en la ecuación (12) [24].

$$M_{m,k}^c = \sum_j^N A_j SI_{m,j,k}(PT) \quad (12)$$

Donde $SI_{m,i,k}$ es la ordenada de la superficie de influencia SI en el punto m ésimo correspondiente a la PT del vehículo, en la posición longitudinal del eje j en el tiempo k . De esta manera se calculan diferentes respuestas, en función de PT y A . Se determina como el peso correcto aquel correspondiente al menor valor arrojado por la función de error.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Simulaciones numéricas

El puente seleccionado es de 19 metros de longitud cuenta con dos carriles vehiculares, un bicarril, un andén y un bordillo. La aproximación al puente tiene una inclinación de 8%. La estructura en sistema viga-losa está rigidizada con dos riostras intermedias separadas equidistantemente y dos riostras en cada apoyo, con una luz libre de 18 metros, cuyas vigas (siete en total) están sobre apoyos de 50 cm con neoprenos (Figura 1). La losa es prefabricada, en placas de concreto y están unidas en la parte superior por la capa de

rodadura. Se realizó la modelación del puente en el software de elementos finitos SAP 2000 de acuerdo con el levantamiento estructural.

Se llevaron a cabo simulaciones numéricas en el modelo: Un primer escenario de carga vehicular pasando por el centro del carril 1, el segundo por el centro del carril 2, y el tercero entre carriles, a una velocidad constante de 10 m/s. En la Tabla 1 se describen los tipos de vehículos empleados en los escenarios de carga y en la Figura 1 se muestran los carriles.

Tabla 1. Vehículos usados en las simulaciones. PBV: Peso bruto del vehículo.

Vehículo	Peso eje vehículo [kN]			PBV [kN]	Espaciamiento ejes (m)	
	1	2	3		1 a 2	2 a 3
1	100	150	150	400-	4	9
2	40	160	160	360	4.3	4.3
3	70	100	100	270	3.6	1.35
4	27	107	-	134	4	-

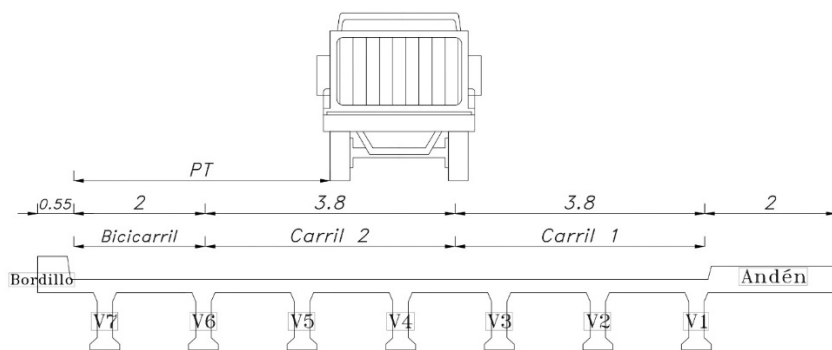


Figura 1. Localización de carriles, puntos de adquisición de datos y posición de la carga vehicular

Adicionalmente, se realizó una simulación con el Vehículo 1 viajando a 1 m/s para cada PT, definida como la distancia desde el bordillo hasta la llanta izquierda, como se ve en la Figura 1. Se estableció una serie de PT desde 0,7 hasta 7,31 metros, con 18 variaciones igualmente espaciadas. Para cada PT se construyó una LI según el procedimiento presentado en [28]. Las LI se alinearon para generar una gráfica de contorno de las SI. Se consiguieron SI para cada una de las vigas, según el efecto registrado en el modelo debido a una carga unitaria, a lo largo del puente. en la mitad de la luz, registrando el esfuerzo longitudinal en el patín inferior. La información fue filtrada para hacer más claro el cambio en la respuesta en diferentes zonas. En la Figura 2 se muestra la SI de los puntos V4 y de V7, siendo el más y menos sensible al tránsito del Vehículo 1, respectivamente. Se puede notar que el valor máximo se presenta cuando la carga se localiza sobre el punto de registro de la respuesta.

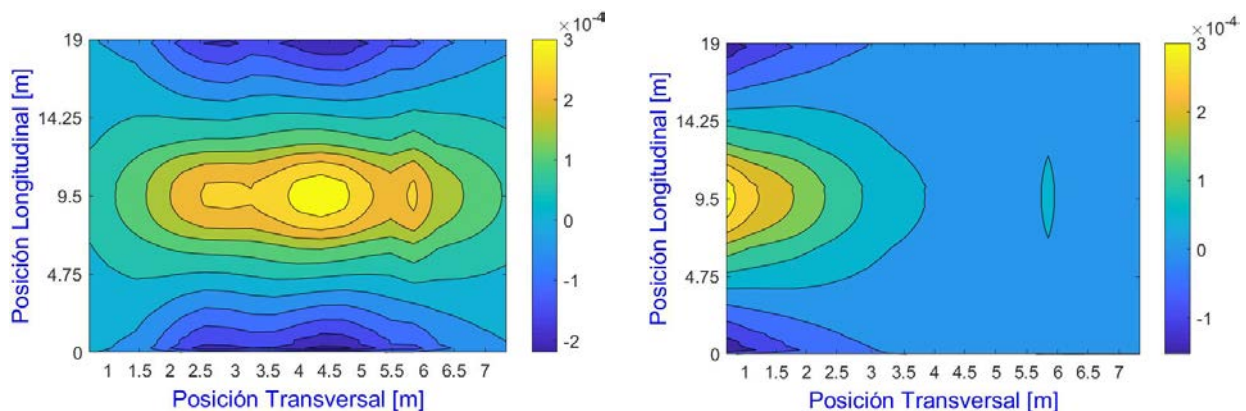


Figura 2. Gráficas de contorno de las áreas de influencia: a) viga 4, y b) viga 7 [unidades: $\frac{1}{N}$]

3.2 Identificación de la carga

De acuerdo a la metodología propuesta por Yu et al. [24] se identificó la carga para los tres escenarios de carga, con los diferentes vehículos. Los pesos identificados se analizan en la Figura 3 y en la Tabla 2. Debido

a la velocidad del vehículo, la respuesta medida presentó un ruido considerable con respecto a la respuesta calculada, por ello, la diferencia porcentual correspondiente al peso identificado no es cero.

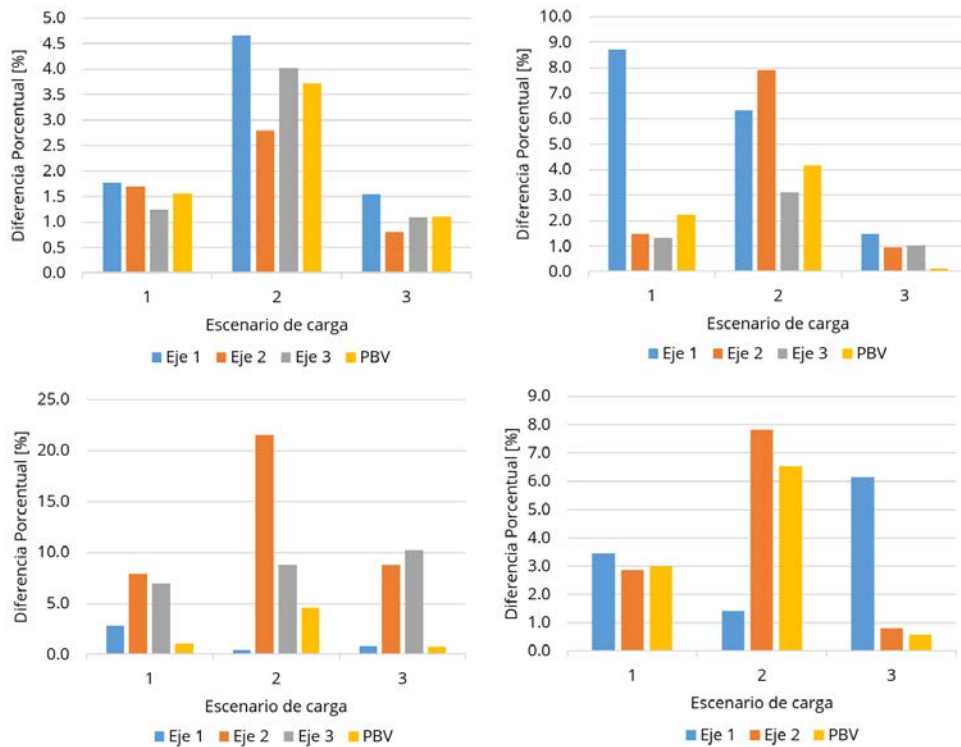


Figura 3. Diferencia porcentual en identificación del peso con algoritmo de Yu et al. [24]: a) Identificación del Vehículo 1, b) Identificación del Vehículo 2, c) Identificación del Vehículo 3, y d) Identificación del Vehículo 4

Tabla 2. Diferencia porcentual en identificación del peso con algoritmo de Yu et al. [24]

Vehículo	Escenario	Diferencia en identificación [%]			
		Eje 1	Eje 2	Eje 3	PBV
1	1	1.8	1.7	1.2	1.6
	2	4.7	2.8	4.0	3.7
	3	1.5	0.8	1.1	1.1
2	1	8.7	1.5	1.3	2.2
	2	6.3	7.9	3.1	4.2
	3	1.5	0.9	1.0	0.1
3	1	2.8	7.9	7.0	1.1
	2	0.4	21.5	8.8	4.6
	3	0.8	8.8	10.2	0.8
4	1	3.4	2.9	-	3.0
	2	1.4	7.8	-	6.5
	3	6.1	0.8	-	0.6

También se puede apreciar un acierto menor en la identificación por eje y en el peso bruto vehicular PBV para el Vehículo 4 (de dos ejes), lo cual se puede deber a que la SI fue calibrada con un vehículo de tres ejes.

Se nota una menor precisión en la identificación del peso de los ejes 2 y 3 del Vehículo 3, sin embargo, su peso total es identificado de manera satisfactoria. Esto se debe a que ambos ejes están muy juntos, por ello el algoritmo toma la respuesta debido a ambos ejes como la producida por uno solo [29]. Para todos los vehículos, la identificación menos precisa se presentó en el escenario de carga 2, debido a que la carga no se aplicó sobre el eje de una viga. La mayoría de las diferencias son menores del 3%, indicando una identificación muy acertada.

3.3 Instrumentación de la estructura

Se dispuso de un sistema de instrumentación permanente en el puente para garantizar el registro de su respuesta, tanto durante la prueba de carga, como en diferentes escenarios de carga operacionales. Debido

a que la prueba de carga sobre el puente hacía parte de un programa de evaluación estructural de una red de puentes de la ciudad, se registraron deformaciones y vibraciones, con el fin de monitorear el comportamiento de la estructura durante la prueba.

Para el registro de vibraciones y deformaciones se instalaron 5 acelerómetros triaxiales y 24 galgas extensiométricas, respectivamente. Se ubicó una galga en la losa al inicio del puente (a 3,5 metros) y otra en la losa al final (a 15,5 metros), y dicho par de galgas es usado para identificar la velocidad del vehículo en el carril derecho.

Estos puntos son colineales entre sí, están debajo de la losa y en zonas rígidas para apreciar mejor los picos debido al paso de los vehículos [7, 21, 27]. La posición de los acelerómetros se determinó según se indica en [30], mediante una función de optimización que evalúa matrices construidas a partir de la información modal. En la Figura 4 se muestra el arreglo de acelerómetros.

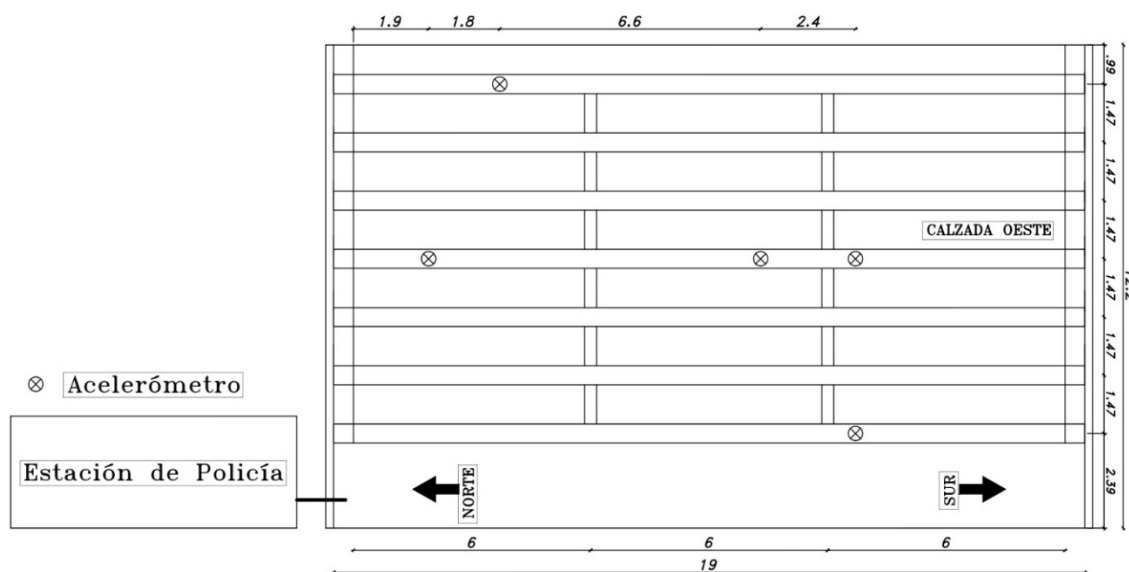


Figura 4. Arreglo de acelerómetros

Para estimar la carga del vehículo, las galgas fueron ubicadas en el centro de la luz de las vigas, en el patín inferior de éstas. Debido a las características estructurales, en esos puntos se presentan las mayores deformaciones longitudinales [27]. Para evitar poner las galgas sobre grietas existentes, se localizaron medio metro hacia el sur.

Teniendo en cuenta que la viga con menor respuesta ante cargas no dará información adicional o más relevante que las demás vigas, se dejará sin instrumentar. Dicha viga fue la 7, sin embargo, la información registrada en las vigas 1 y 7 (vigas extremas) es necesaria para conocer los factores de distribución de peso sobre el puente, por tanto, se decide no instrumentar la viga 6, cuyo comportamiento se puede inferir con la información obtenida de la prueba de carga. Dos vigas fueron instrumentadas en dos puntos de la sección transversal: patín superior y patín inferior. La viga 4 (viga central) fue instrumentada en el patín superior, alma y patín inferior.

El arreglo definitivo de galgas extensiométricas se muestra en la Figura 5. Nótese que se define una posición general al inicio y al final del puente para galgas y acelerómetros, haciendo así más práctica la instrumentación [21]. A los registros de deformación se les realizó corrección por temperatura para definir una línea base en la señal.

Las galgas de compensación se instalaron en la mitad de la luz al borde del andén, en la posición indicada en la Figura 5(a) como gCOMx12, haciendo referencia a que será el sitio de compensación de las 12 galgas distribuidas por todo el puente. Se eligió este punto para las galgas de compensación porque no presenta esfuerzos significativos y comparte las mismas condiciones ambientales de las demás galgas. En la Figura 6 se muestran las seis galgas ubicadas en el patín inferior de las vigas.

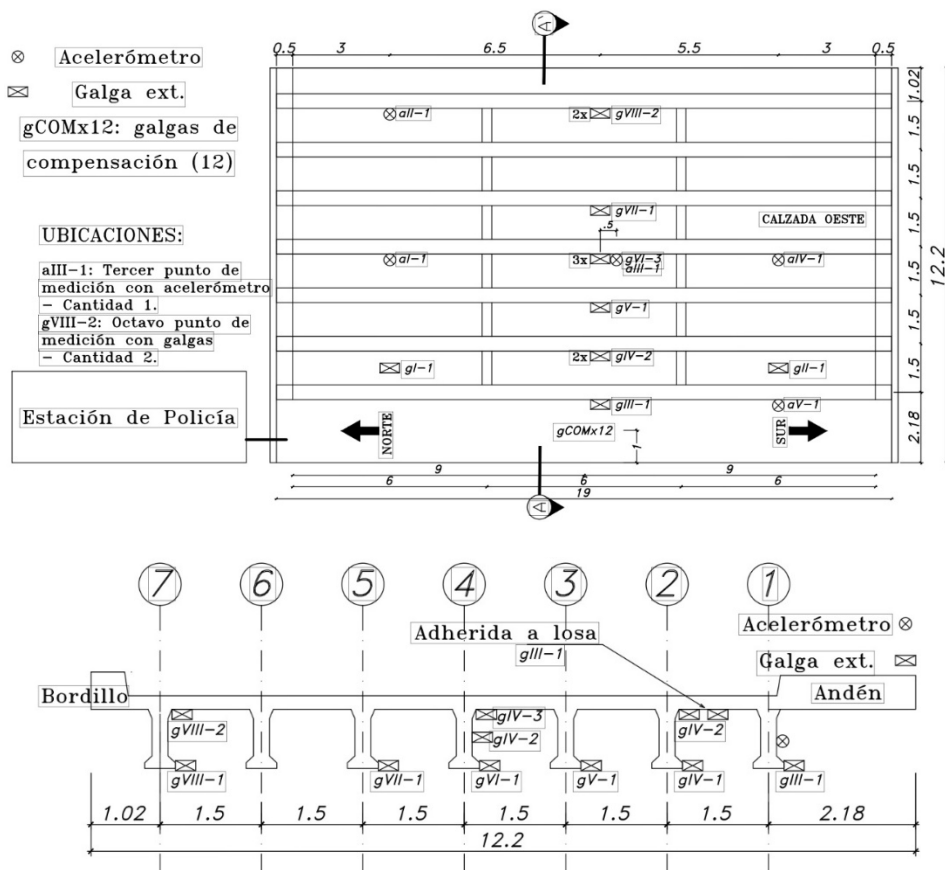


Figura 5. Arreglo definitivo de acelerómetros y galgas: a) vista en planta, y b) vista en elevación (corte A-A')

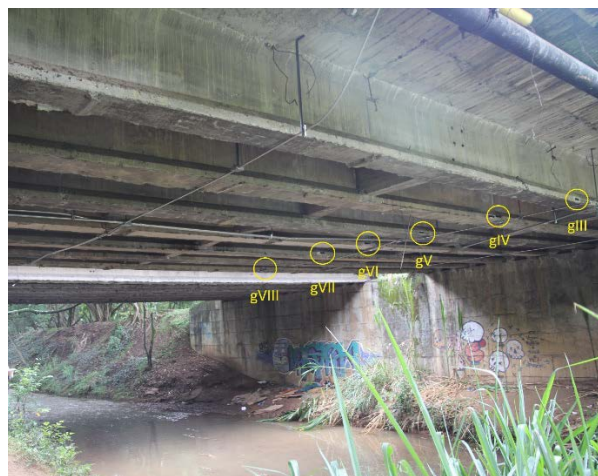


Figura 6. Vista en campo de la ubicación de las galgas en el patín inferior de las vigas

3.4 Prueba de carga

La estructura se sometió a una carga viva que constó de un camión de 55 kilonewtons, repartidos en dos ejes separados a 4.47 metros, con un ancho de 1.85 metros. Se aplicó una carga pseudoestática con el vehículo, ingresándolo a una velocidad muy baja para evitar efectos dinámicos, y deteniéndolo con su eje delantero a 11.5 metros de la entrada del puente, como se muestra en la Figura 7. Una vez se observó gráficamente en los registros que la respuesta se estabilizó, se evacuó el vehículo del puente a la misma velocidad de ingreso.

Este procedimiento se hizo tres veces, la primera orientando el vehículo hacia el borde derecho del carril 1, la segunda orientándolo hacia el borde izquierdo del carril 2, sin invadir el bicarril, y la tercera entre carriles (Figura 1). En la Figura 8 se muestra el vehículo usado. Luego se hizo la prueba de carga dinámica, cruzando tres veces una volqueta de 169.7 kilonewtons a una velocidad constante de 2.09 m/s, con las mismas orientaciones de la prueba de carga estática.

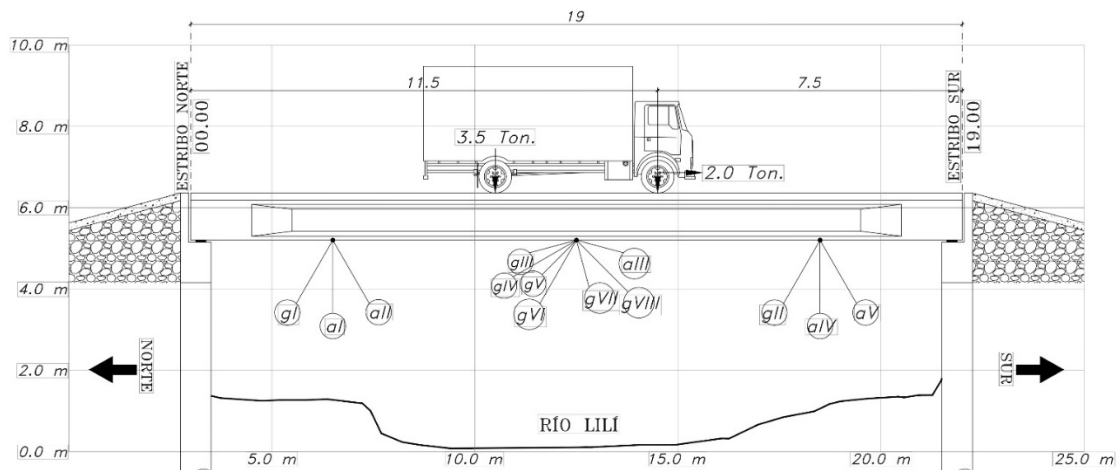


Figura 7. Configuración de vehículo para la prueba de carga estática



Figura 8. Vehículo utilizado en la prueba de carga estática

Para ambas pruebas, en cada uno de los tres casos, se adquirieron deformaciones unitarias y aceleraciones a una tasa de muestreo de 32 Hz y 250 Hz, respectivamente. En la Figura 9 se muestran los registros de 'gIII' y 'gV', correspondientes a la deformación unitaria en la viga 1 y 3, respectivamente, como se relaciona en la Figura 5. Estos registros se tomaron durante la prueba de carga estática, en la primera ubicación del vehículo. En los registros tomados en las tres posiciones se encontró una mayor respuesta en los puntos sobre los cuales estaba el vehículo.

En la Figura 9 es evidente el decrecimiento de la respuesta en las vigas más alejadas del borde derecho del carril, en donde se ubicó el camión. Sin embargo, en 'gV', punto de registro de la viga 2, no fue posible apreciar una respuesta a pesar de corroborar y corregir aspectos de la instrumentación. Probablemente, este problema se debe a la presencia de grietas cada 30 centímetros, con espesores mayores a 0.15 milímetros que llegan hasta la mitad del alma de la sección, causando una pérdida de rigidez del elemento, lo cual será verificado en futuros trabajos.

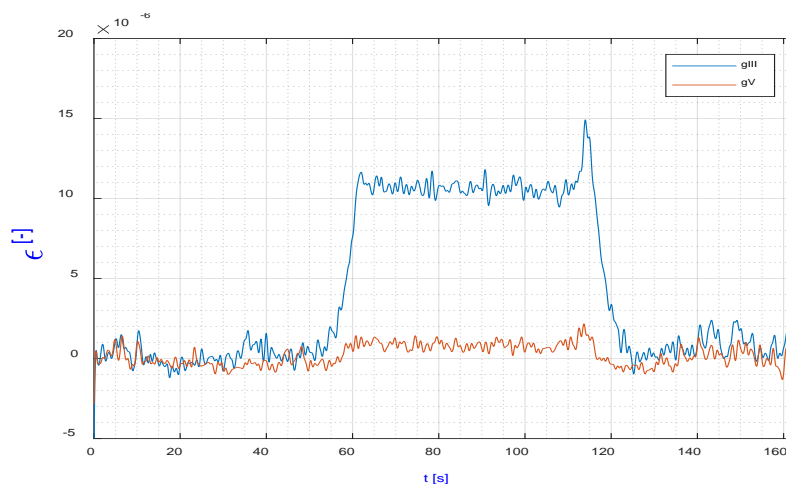


Figura 9. Registros adquiridos de la respuesta del puente (deformaciones unitarias) durante la prueba de carga estática, detenido en el borde derecho del carril 1

3.5 Calibración de la relación carga-respuesta

Con base en los registros de la prueba de carga estática y la inspección visual, se ajustó el modelo numérico en elementos finitos modificando la rigidez de las vigas para simular el daño. Se construyeron SI según el efecto registrado en los escenarios simulados de la prueba de carga, en cinco de las seis vigas instrumentadas, en su respectivo patín inferior, debido a una carga unitaria a lo largo del puente.

Debido a que la prueba de carga dinámica se realizó en tres posiciones diferentes, solo se construyeron 3 LI. Sin embargo, se agregaron más LI entre cada una de las PT, obtenidas mediante una interpolación cúbica [24]. En la Figura 10 se presentan dos de las AI construidas, correspondientes a los puntos 'gVI' y 'gVIII', de las vigas 4 y 7, respectivamente. Estas AI muestran mayor rango de sensibilidad y un decrecimiento en la magnitud de la respuesta con respecto a lo presentado en la Figura 2, correspondiente a la respuesta registrada en el modelo inicial. Para la viga 6 no se construyó AI debido a que no se instrumentó. Para la viga 2 no se construyó AI debido al problema estructural que presenta.

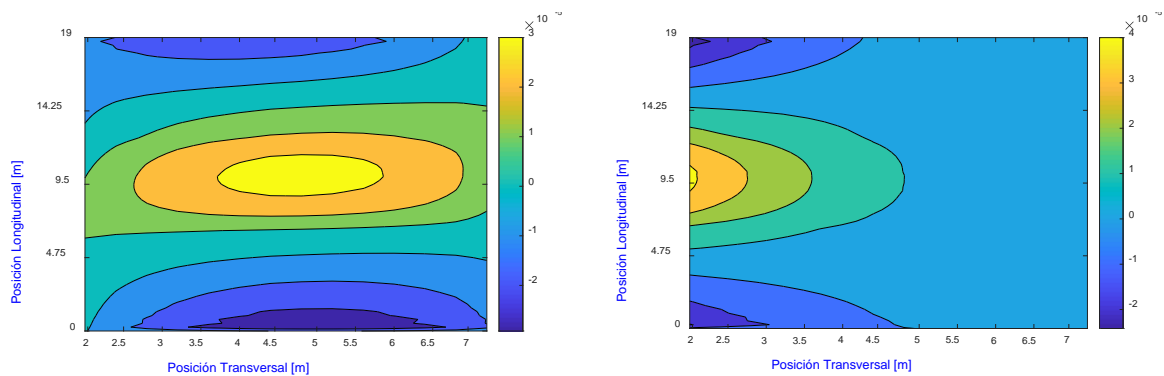


Figura 10. Gráficas de contorno de las áreas de influencia: a) viga 4, y b) viga 7 [unidades: $\frac{1}{N}$]

3.6 Identificación de la velocidad

Se pudo encontrar la velocidad mediante una correlación de picos máximos entre las señales registradas en los puntos 'gl' y 'gll', cuya ubicación se especifica en la Figura 5. En la Figura 11 se muestran dichas respuestas.

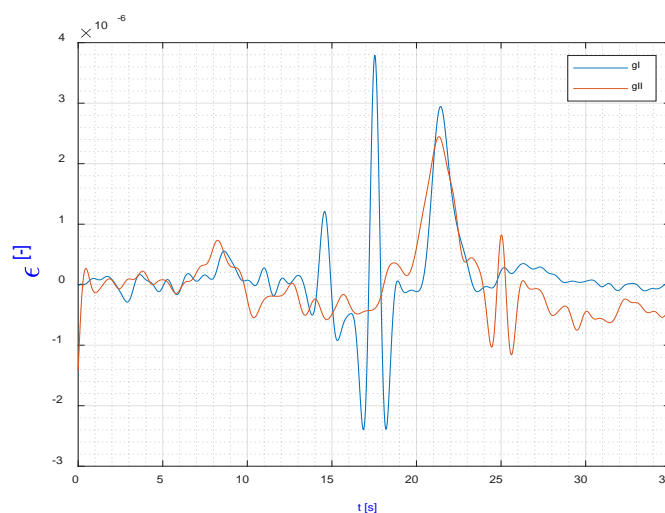


Figura 11. Respuesta en la losa a la entrada y a la salida del puente, 'gl' y 'gll', respectivamente

La identificación mediante esta técnica, correspondiente al paso del vehículo por el borde derecho del carril 1, estima una velocidad de 2.09 m/s, casi idéntica a lo reportado durante la prueba de carga. Adicionalmente, se trató la respuesta en 'glll' (viga 1) con una transformación de ondas, técnica explicada mediante la Ecuación 2. En la Figura 12(a) se muestra la señal sin transformar y en la Figura 12(b) se muestra su respectiva transformación en términos de coeficientes de onda.

Con la segunda técnica se determinó una velocidad de 2.12 m/s, congruente con lo reportado durante la prueba de carga, y una distancia entre ejes de 4.45 metros, muy similar a la tomada en campo. Al inicio de la respuesta en deformación unitaria de la Figura 12a se puede ver un cambio abrupto en la pendiente después de la entrada del vehículo al puente, el cual se hace perceptible en la transformada de onda Morlet de la Figura 12b.

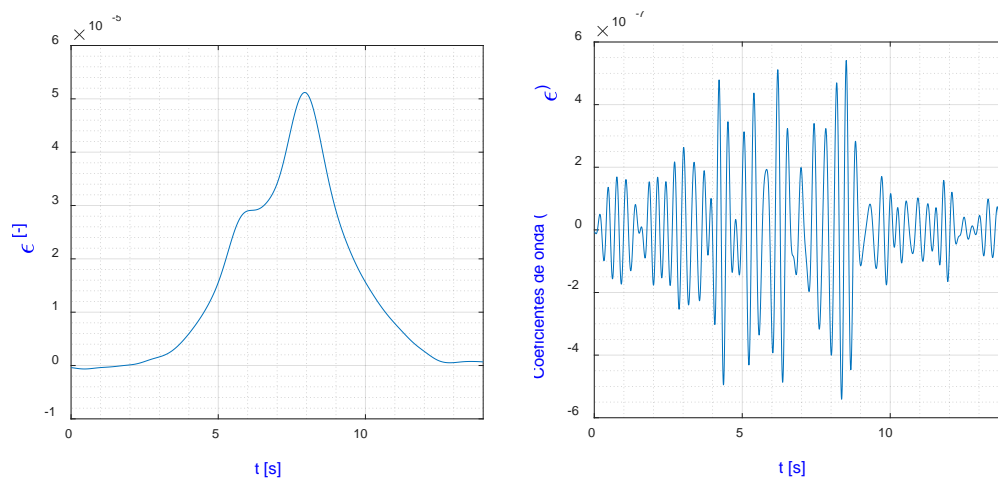


Figura 12. Respuesta en 'gIII' (viga 1) y su correspondiente transformación de onda: a) Deformación unitaria, y b) Transformada de la deformación unitaria

3.7 Identificación del peso

En la prueba de carga dinámica el punto 'gIII' (viga 1) presentó la mayor deformación durante el paso del vehículo por el borde derecho del carril 1, y entre carriles, escenario 1 y escenario 3, respectivamente. El punto 'gVII' (viga 5) presentó la mayor deformación durante el paso del vehículo por el borde izquierdo del carril 2, escenario 2. Dichas respuestas fueron utilizadas para identificar el peso, mientras que la respuesta en los demás puntos se empleó para calcular la diferencia entre la respuesta teórica y experimental, para inferir la posición transversal, PT, como se propone en [24].

La identificación del PBV en el escenario 1 arroja una diferencia porcentual de 13.8% y 13.5%, encontrando la velocidad y el espaciamiento entre ejes mediante relación de los picos máximos en 'gI' y 'gII' y transformación de onda de la señal, respectivamente. Por su parte, la diferencia porcentual en la identificación de la velocidad es de 0.2% y 1.6%, lo cual es muy aceptable teniendo en cuenta el factor humano, dada la dificultad para que el conductor del camión mantenga una velocidad constante durante la prueba. En la Tabla 3 se comparan los resultados de las dos identificaciones hechas para el escenario 1 de la prueba de carga dinámica, donde D1p es la identificación hecha partiendo de la relación de picos máximos y D1t es la identificación hecha partiendo de la transformación de onda de la señal. Se puede apreciar que las diferencias son muy similares en ambos casos.

Tabla 3. Comparación de la caracterización del vehículo, mediante relación de picos máximos y transformación de onda

Característica	Real	Estimada		Diferencia [%]	
		D1p	D1t	D1p	D1t
Velocidad [m/s]	2.09	2.12	2.09	1.6	0.2
Espaciamiento ejes [m]	4.47	4.45	4.29	0.4	4.0
PBV [kN]	170.60	194.06	193.60	13.8	13.5

PBV: Peso bruto del vehículo

En la Tabla 4 se resume la caracterización del vehículo en los tres escenarios de la prueba de carga dinámica, donde D1 corresponde al escenario 1, D2 al escenario 2 y D3 al escenario 3. Durante una jornada de monitoreo se registró la respuesta del puente a 32Hz. Varias veces se presentó el escenario 1 realizado durante la prueba de carga dinámica, un vehículo pasando por el carril 1 a una velocidad constante. En la Figura 13 se puede apreciar la respuesta en los puntos instrumentados, debido al paso de un camión transportador de refrescos. En la Figura 5 se relacionan estos puntos sobre la estructura.

Tabla 4. Resumen de la caracterización del vehículo usado en la prueba de carga dinámica

Característica	Real	Estimada			Diferencia [%]		
		D1	D2	D3	D1	D2	D3
Velocidad [m/s]	2.09	2.12	2.25	2.57	1.6	7.6	23.2
Espaciamiento ejes [m]	4.47	4.45	5.08	5.72	0.4	13.7	27.9
PBV [kN]	170.60	194.06	195.98	177.05	13.8	14.9	3.8

PBV: Peso bruto del vehículo

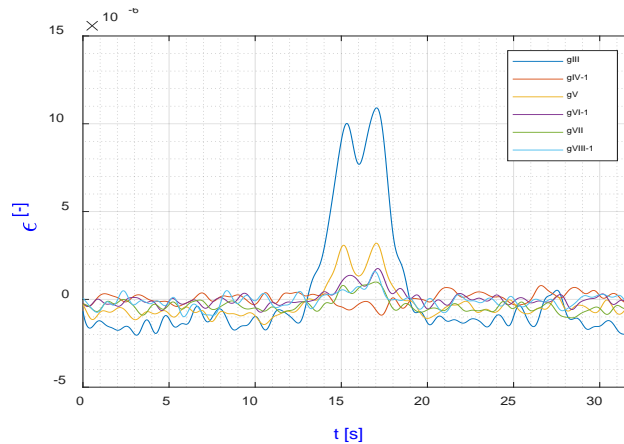


Figura 13. Respuesta en el escenario operacional para el camión transportador de refrescos

A pesar de no tener certeza del peso real del camión, la estimación se encuentra dentro del rango supuesto por el conductor. Sin embargo, la identificación del espaciamiento entre ejes está lejos de ser acertada. Debido a que un par de llantas pasó sobre la viga 2 y el otro par entre las vigas 3 y 4, el cambio en la respuesta debido a la entrada del vehículo al puente no se hace tan notoria y disminuye el acierto en la identificación del espaciamiento entre ejes. En la Tabla 5 se resume dicha identificación.

Tabla 5. Vehículo identificado, características no conocidas.

Vehículo	V [m/s]	Espaciamiento ejes [m]	PBV identificado [kN]	Peso real [kN]
Camión de refrescos	2.09	2.12	2.09	1.6

PBV: Peso bruto del vehículo

En la Figura 13 es evidente que no hay deformación unitaria en el punto 'gIV-1' (viga 2), por tanto, no existe una distribución lógica de la carga sobre las vigas. Según la respuesta del modelo en elementos finitos, actualizado con la información de la inspección visual, esto puede ser posible debido a la presencia de daño. Por tal razón, se descarta este punto y su respectiva SI para la estimación de cualquier característica de los vehículos. Es importante aclarar que justo sobre la viga 2 entran al puente todos los vehículos que pasan por el carril derecho, por tanto, tiene sentido la presencia de daño si se tiene en cuenta que dicho carril queda sobre el lado más solicitado del puente, el voladizo del andén.

4. CONCLUSIONES

En Colombia se utilizan las básculas como medida de control de la carga que circula en las carreteras. En algunos países se presentan casos en los que los conductores evaden los puestos de control o, peor aún, se ejercen controles de manera que afectan el flujo del tráfico. En los últimos 25 años se han realizado investigaciones para identificar la carga vehicular que pasa sobre un puente, de manera no invasiva. Dos aspectos importantes para la precisión en la identificación son la rugosidad de la superficie de rodadura y la inclinación de la aproximación al puente, los cuales deben ser bajos. Sin embargo, esta investigación se centra en una estructura con condiciones no ideales, mostrando que, en casos como el de la prueba de carga dinámica, se puede lograr una estimación aproximada de la carga.

A pesar de no tener unos resultados tan precisos en los escenarios de carga operacionales, numéricamente se mostró que la metodología implementada es acorde para la caracterización de las cargas. La falta de precisión en lo experimental se debe a:

- La solicitación insuficiente hecha a la estructura durante la prueba de carga estática, cuyas deformaciones solo permitieron un ajuste confiable del modelo en solo una de tres posiciones del vehículo.
- Vibraciones remanentes debido al paso de otros vehículos, registradas en los escenarios de carga operacionales. Esto puede significar cambiar las condiciones a un escenario equivalente a presencia de múltiples vehículos, lo cual reporta la literatura como uno de los principales retos a enfrentar en este problema inverso.
- Presencia de daño en la estructura, lo que demanda hacer un análisis no lineal para calibrar la relación carga-respuesta.

En cuanto a los resultados obtenidos, se encuentra que la precisión en la separación entre ejes no influye de manera crítica en la estimación del peso bruto vehicular. Adicionalmente, no es posible simplificar la instrumentación si se tratan las señales con una transformación de ondas, sirviendo un solo sensor para registrar información para identificar la velocidad, distancia entre ejes y peso del vehículo. Si bien se muestran resultados viables con esta técnica, la identificación de picos es poco clara y el uso de los coeficientes no es preciso.

Si bien existe incertidumbre en la precisión de la identificación de la carga en los escenarios operacionales, la estimación de cargas durante las pruebas controladas permite confiar en que la metodología empleada es viable en el tipo de puente estudiado.

Por resultados numéricos y experimentales, se infiere que la caracterización de las cargas pierde precisión cuando esta no se aplica sobre las vigas, sino entre ellas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por COLCIENCIAS, mediante el proyecto de investigación *Metodología para la Gestión de la Integridad Estructural de una Red Urbana de Puentes con Actualización en Tiempo Real*, CI 21051, según contrato 44842-128-2017, con el apoyo del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica y Estructural (G-7).

REFERENCIAS

- [1] Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica – AIS, Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP 14, AIS, 2014.
- [2] Research Group in Earthquake, Eolic, Geotechnical and Structural Engineering (G-7) and Laboratory of Cartography and Geographic Information Systems (CARSIG), "Desarrollo e implementación de un Sistema integrado de gestión de puentes para Cali - Etapa 1: inventario, diagnóstico e implementación en SIG," *Tech. Rep. Final*, 2015.
- [3] T. H. T. Chan, S. S. Law, T. H. Yung, and X. R. Yuan, "An interpretive method for moving force identification," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 219, no. 3, pp. 503–524, 1999.
- [4] A. Lansdell, W. Song, and B. Dixon, "Development and testing of a bridge weigh-in-motion method considering nonconstant vehicle speed," *Engineering Structures*, vol. 152, pp. 709–726, 2017.
- [5] R. Lalthlamuana and S. Talukdar, "Estimation of gross weight, suspension stiffness and damping of a loaded truck from bridge measurements," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 13, no. 11, pp. 1497–1512, 2017.
- [6] K. Wattana and M. Nishio, "Traffic volume estimation in a cable-stayed bridge using dynamic responses acquired in the structural health monitoring," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 24, no. 4, e1890, 2017.
- [7] H. Zhao, N. Uddin, E. J. O'Brien, X. Shao, and P. Zhu, "Identification of vehicular axle weights with a bridge weigh-in-motion system considering transverse distribution of wheel loads," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 19, no. 3, 2014.
- [8] D. F. Wiśniewski, J. R. Casas, and M. Ghosn, "Codes for safety assessment of existing bridges-current state and further development," *Structural Engineering International*, vol. 22, no. 4, pp. 552–561, 2012.
- [9] M. Ghosn, B. Sivakumar, and F. Miao, "Development of state-specific load and resistance factor rating method," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 351–361, 2013.
- [10] G. Anitori, J. R. Casas, and M. Ghosn, "WIM-Based live-load model for advanced analysis of simply supported short- and medium-span highway bridges," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, no. 10, 2017.
- [11] L. Zhang, H. Zhao, E. J. O'Brien, and X. Shao, "Virtual monitoring of orthotropic steel deck using bridge weigh-in-motion algorithm: Case study," *Structural Health Monitoring*, vol. 18, no. 2, pp. 610–620, 2019.

- [12] M. Soriano, J. R. Casas, and M. Ghosn, "Simplified probabilistic model for maximum traffic load from weigh-in-motion data," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 454–467, 2017.
- [13] P. Lou, H. Nassif, D. Su, and P. Truban, "Effect of overweight trucks on bridge deck deterioration based on weigh-in-motion data," *Transportation Research Record*, vol. 2592, pp. 86–87, 2016.
- [14] Y. Liu, D. Li, Z. Zhang, H. Zhang, and N. Jiang, "Fatigue load model using the weigh-in-motion system for highway bridges in China," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, no. 6, 2017.
- [15] N. Lu, Y. Liu, and Y. Deng, "Fatigue reliability evaluation of orthotropic steel bridge decks based on site-specific weigh-in-motion measurements," *International Journal of Steel Structures*, vol. 19, no. 1, pp. 181–192, 2019.
- [16] F. Moses, "Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges," *Transportation Engineering Journal of ASCE*, vol. 105, no. 3, pp. 233–249, 1979.
- [17] R. J. Peters, "AXWAY – a system to obtain vehicle axle weights," in *Proceedings of the 12th Australian Road Research Board Conference*, Hobart, TAS, Australia, pp. 10–18, 1984.
- [18] R. J. Peters, "CULWAY – an unmanned and undetectable highway speed vehicle weighing system," in *Proceedings of the 13th Australian Road Research Board Conference*, Adelaide, SA, Australia, pp. 70–83, 1986.
- [19] WAVE, "Weighing-in-motion of axles and vehicles for Europe (WAVE)", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, Tech. Rep. 1.2, 2001.
- [20] Y. Yu, C. S. Cai, and L. Deng, "Vehicle axle identification using wavelet analysis of bridge global responses," *JVC/Journal of Vibration and Control*, vol. 23, no. 17, pp. 2830–2840, 2017.
- [21] J. Kalin, A. Žnidarič, and I. Lavrič, "Practical Implementation of Nothing-on-the-Road Bridge Weigh-in-Motion System," Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Slovenia, 2006.
- [22] F. Marqués, C. Moutinho, W. H. Hu, Á. Cunha, and E. Caetano, "Weigh-in-motion implementation in an old metallic railway bridge," *Engineering Structures*, vol. 123, pp. 15–29, 2016.
- [23] S. Faraz, K. Helmi, B. Algohi, B. Bakht, and A. Mufti, "Sources of errors in fatigue assessment of steel bridges using BWIM," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 7, no. 3, pp. 291–302, 2017.
- [24] Y. Yu, C. S. Cai, and L. Deng, "Nothing-on-road bridge weigh-in-motion considering the transverse position of the vehicle," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 14, no. 8, pp. 1108–1122, 2018.
- [25] E. Muñoz, D. Gómez, F. Núñez, and C. Florez, "Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación," *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 26, no. 3, pp. 321–352, 2011.
- [26] R. Lalthlamuana and S. Talukdar, "Obtaining vehicle parameters from bridge dynamic response: a combined semi-analytical and particle filtering approach," *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, no. 1, pp. 50–66, 2015.
- [27] Y. Yu, C. S. Cai, and L. Deng, "State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology," *Advances in Structural Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 1514–1530, 2016.
- [28] E. J. OBrien, M. J. Quilligan, and R. Karoumi, "Calculating an influence line from direct measurements," *Proceedings of the Institution of Civil Engineering - Bridge Engineering*, vol. 159, no. 1, pp. 31–34, 2006.
- [29] E. J. OBrien, C. W. Rowley, A. González, and M. F. Green, "A regularised solution to the bridge weigh-in-motion equations," *International Journal of Heavy Vehicles Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 310–327, 2009.
- [30] R. Brincker and C. Ventura, "Measurement Technology," in *Introduction to Operational Modal Analysis*, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2015, pp. 149–199.

Modelo predictivo del potencial energético del gas de síntesis producido de la gasificación de biomasa

Andrés Fabián Solano-Pérez¹

Yesid Rueda-Ordóñez²

Universidad Industrial de Santander
Colombia

Un modelo termoquímico no-estequiométrico de gasificación fue desarrollado y simulado en Aspen Plus para un gasificador *downdraft* alimentado con biomasa y con aire como agente gasificante. El modelo busca predecir la composición del gas sintético extraído de la gasificación de biomasa, identificar el potencial energético de dicho gas, y caracterizar la eficiencia del proceso en términos de la eficiencia de conversión de carbono CCE y la eficiencia del gas frío CGE. Tres biomasa fueron estudiadas: tallos de café TC, cáscaras de arroz CA, y cáscaras de banano CB, las cuales fueron escogidas debido a su alto nivel de producción en terrenos colombianos y sobre las cuales puede hallarse registro de data experimental del proceso de gasificación bajo las mismas condiciones detalladas en el modelo. Los resultados muestran un acercamiento a los resultados experimentales, y de esta forma se valida que es oportuno para predecir la producción y composición del gas sintético bajo diferentes condiciones de temperatura, presión y ER. Teniendo en cuenta la conversión de carbón a gas y el potencial energético del gas sintético, se observó que el rango ideal de ER para biomasa está entre 0,25-0,35, puesto que se logra una buena producción de gas sintético con respecto al contenido de biomasa, al tiempo que mantiene un poder calorífico inferior PCI de 5-9 MJ/kg. Esto se reflejó en las CGE registradas, donde se obtuvieron valores de 78,861%, 89,739% y 90,330% para TC, CA y CB, respectivamente.

¹ Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica.

Contacto: andres_fabian_sp@hotmail.com

² Magíster en ingeniería mecánica y Doctor en Ingeniería Química.

Contacto: yjruedao@uis.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La gasificación de biomasa representa en la actualidad un tema de investigación sumamente importante, puesto que el planeta se halla en una transición energética hacia el uso de fuentes renovables que contribuyan a la preservación de la naturaleza y a suplir la demanda energética de la población [1]. El proceso de gasificación consiste en la producción de un gas combustible denominado gas sintético o sintegas a través de transformaciones termoquímicas de un material carbonoso, pudiendo ser carbón, coque, biomasa, u otros [2, 3]. Este sintegas se caracteriza por su alto contenido de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono CO , y por tanto, es aprovechado principalmente en procesos de combustión, producción de otros combustibles y producción de otros compuestos químicos [4]. Gasificar biomasa representa entonces un medio de producción de gases combustible que además de dar soporte al sistema energético de una población, permite tratar residuos agrícolas y emplear combustibles sólidos que impactan en menor medida al medio ambiente.

El proceso de gasificación involucra una serie de reacciones termoquímicas las cuales pueden clasificarse en cuatro diferentes etapas: secado, pirólisis, combustión y reducción, tal y como se muestra en la Figura 1. Para algunos tipos de reactores de gasificación, los cuales presenten bajas velocidades del proceso, es posible asumir que estas etapas se desarrollan de forma consecutiva, mientras que para aquellos de mayor velocidad es común asumir que todas las etapas ocurren de forma simultánea [5]. Durante la etapa de secado, el combustible a gasificar eleva su temperatura por encima del punto de ebullición del agua, evaporando el contenido de humedad presente en él.

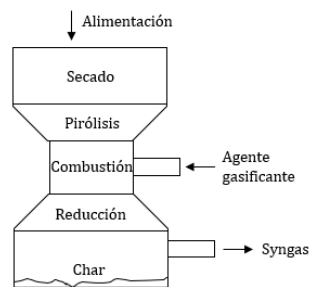


Figura 1. Esquema general del proceso de gasificación de un gasificador tipo *downdraft*

El combustible seco reacciona frente a un incremento de temperatura en ausencia de oxígeno, entrando a un proceso de pirólisis en donde se descompone en sólidos carbonosos (bio-carbón), y gas compuesto principalmente de CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , vapores y alquitranes. Tanto el material sólido como el gaseoso reaccionan con el agente gasificante que es ingresado al gasificador, llevando a cabo un proceso de combustión en donde principalmente es convertido el bio-carbón en gases de combustión. Una vez el bio-carbón y algunos gases hacen combustión, se llevan a cabo reacciones de reducción en donde principalmente es descompuesto el CO_2 , y el bio-carbón que aún no ha reaccionado reacciona con los gases post-combustión.

Las características del sintegas producido varían, entre otras razones, por el tipo de gasificador empleado, y sobre los que más se halla desarrollo tecnológico son los de lecho fluidizado, lecho arrastrado y lecho móvil. El esquema general de un gasificador de lecho fluidizado se muestra en la Figura 2.

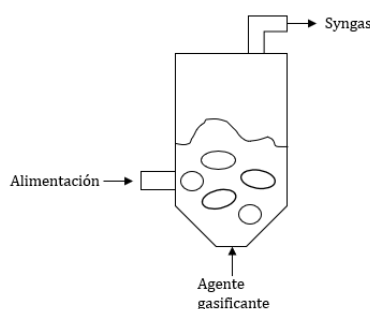


Figura 2. Esquema general de un gasificador de lecho fluidizado

Estos gasificadores trabajan de tal manera que el agente gasificante que es inyectado desde la parte inferior de la máquina permita una gran interacción con el combustible de alimentación con la formación de burbujas. Han demostrado un buen comportamiento especialmente dentro de procesos a mediana y gran escala [6, 7], alimentados con combustibles fósiles [8] y con biomasa [9].

Los gasificadores tipo *entrained flow* se caracterizan por el ingreso del combustible de alimentación en forma de lodo, e inyectarse desde la misma entrada del agente gasificante. Por lo general son gasificadores que permiten reaccionar grandes cantidades de combustible y, por tanto, son ampliamente investigados para aplicaciones a gran escala [10-14]. Por otra parte, los gasificadores de lecho fijo se caracterizan por llevar a cabo la gasificación de forma lenta, y puede identificarse cada etapa del proceso dentro de diferentes sectores de la máquina, tal y como se muestra en la Figura 3. Son gasificadores notablemente más sencillos en comparación con los dos anteriores, lo que los hace especialmente útiles en aplicaciones de pequeña escala [15 - 18], teniendo un gran impacto en procesos de gasificación de biomasa [19 - 22].

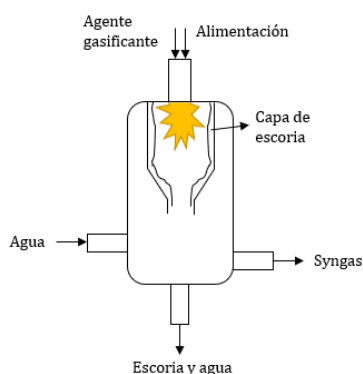


Figura 3. Esquema general de un gasificador tipo *entrained flow*

El sintegás que es producido del proceso de gasificación es empleado para diferentes fines, puede ser quemado directamente en un proceso de combustión para generación de potencia o de calor, o ser la base para la fabricación de otros compuestos que pueden ser combustibles, como gas natural sintético, alcoholes, u otros como amoníaco, metanol, monóxido de carbono, y más. Cualquiera de las aplicaciones en mención requiere de un apropiado nivel de limpieza o pureza del sintegás, lo cual se refleja en la eliminación de contaminantes, agua, u otros compuestos no deseados dentro del proceso. En este texto solo se mencionarán las herramientas más usadas para la eliminación de los indeseados presentes en el sintegás que son el común de cada proceso aplicativo, estos son el bio-carbón, alquitranes, agua y material inorgánico. El uso de separadores ciclónicos y depuradores ha demostrado ser ampliamente efectivos dentro del proceso de eliminación de alquitranes y de residuos sólidos [23-26], así como también el uso de catalizadores, los cuales benefician también la eliminación de material inorgánico, prometiendo ser el mejor recurso de cara al futuro [27 - 29].

La biomasa es todo material orgánico proveniente de seres vivos o que vivieron hasta un pasado reciente, que puede ser empleado como materia prima o combustible. La biomasa botánica se forma a través del proceso de fotosíntesis, y las especies biológicas crecen alimentándose de las especies botánicas u otras especies biológicas. La biomasa puede clasificarse según su origen como leñosa, herbácea, de frutos, o mezclas [30]. En este documento solo se tendrán en cuenta las biomásas de tipo vegetal, las cuales, frente a los combustibles fósiles convencionales como el carbón, se caracterizan por tener un mayor contenido de oxígeno, y en muchos casos contar con altos niveles de agua y estructuras fibrosas.

Efectuar proyectos que involucren la gasificación de biomasa requiere de un adecuado trabajo de ingeniería, puesto que el escenario varía según los objetivos, requerimientos, recursos y el tipo de biomasa en estudio. Por esto, entre más completo sea el diseño previo, buscando asemejarse a la realidad, más fácil será la instalación y puesta en marcha del proyecto, así como se verá reducida la probabilidad de inconvenientes o fallas imprevistas. Dentro del desarrollo del diseño es de gran ayuda efectuar un modelamiento termoquímico del proceso de gasificación, de tal manera que pueda estimarse la composición del sintegás y su correspondiente potencial energético [31 - 35].

Dentro de la presente investigación, se ha estudiado el modelamiento del proceso de gasificación de diferentes biomásas dentro de un gasificador de lecho fijo tipo *downdraft*, teniendo como objetivo determinar el potencial energético del sintegas producido con cada materia prima. Este modelamiento busca simular las condiciones de una planta de energía de pequeña escala, empleando un gasificador de 100 kW de potencia. Se determinó la razón de equivalencia ideal para cada una de las biomásas en estudio.

Se ha encontrado que el modelamiento de la gasificación se efectúa principalmente con métodos numéricos y métodos de análisis termoquímicos, los cuales pueden ser cero-dimensionales, uni-dimensionales, o multidimensionales, donde cada vez está más presente el uso de herramientas de simulación de procesos y dinámica de fluidos computacional CFD. Los métodos numéricos suelen ser empleados para analizar gasificadores rápidos, puesto que requieren mayor detalle sobre las reacciones que ocurren de forma simultánea, algunas de las cuales no alcanzan estados de equilibrio y por lo tanto precisan de un estudio en función del tiempo de residencia de las especies dentro del gasificador [36-38]. Con el desarrollo computacional actual, es común encontrar fuertemente soportado estos modelos con herramientas de desarrollo de métodos numéricos y CFD [39 - 41].

Métodos cero-dimensionales y uni-dimensionales han sido ampliamente desarrollados para modelar gasificadores lentos, puesto que sus condiciones permiten establecer varias asunciones que reducen la complejidad del proceso. Estos métodos suelen ser de equilibrio y sobresalen los modelos estequiométricos y no-estequiométricos, en el primero se desarrolla un análisis energético fundamentado en los balances estequiométricos asumiendo la gasificación como una sola reacción [42-44], y en el segundo se desarrolla un análisis energético basado en la energía libre de Gibbs [45-47].

El modelamiento cero y uni-dimensional de la gasificación también se ha beneficiado por el uso de herramientas computacionales, y por parte de los modelos no-estequiométricos existe un frecuente uso de softwares de simulación de procesos los cuales brindan grandes bases de datos de especies convencionales y no-convencionales. El software Aspen Plus ha facilitado el desarrollo de modelados, y en el presente trabajo se tomó como guía, puesto que se empleó para el desarrollo de la investigación, debido a sus pertinentes características, renombre, y disponibilidad de licencia académica.

Las reacciones del proceso de gasificación, así como una gran cantidad de procesos físicos y químicos, y la especificación del combustible empleado pueden efectuarse en Aspen plus, permitiendo detallar especies no-convencionales, facilitando el modelado de gasificación de biomasa [48-52].

2. MÉTODO

Se realizó el modelamiento del proceso de gasificación de diferentes biomásas, determinando la composición del sintegas extraído y comparando con resultados encontrados en el estado del arte.

2.1 Composición de biomásas

Se estudiaron 3 diferentes biomásas, las cuales fueron consideradas por su alto porcentaje de producción en territorios de Colombia. La caracterización de esta materia prima se realizó por medio de análisis próximos y últimos (desarrollados por otros investigadores), y en la Tabla 1 se presentan los respectivos resultados, donde se detallan para los análisis próximos los porcentajes de humedad Hum, material volátil MV, carbono fijo CF y cenizas Cen, y para el análisis último los porcentajes de carbono C, hidrógeno H, Oxígeno O, nitrógeno N y azufre S.

Tabla 1. Caracterización de las biomásas estudiadas, las cuales sobresalen por su alto nivel de producción en Colombia.

Biomasa	Análisis próximo (%peso)				Análisis último-base seca (%peso)					PCI (MJ/kg)	Ref.
	Hum	MV	CF	Cen	C	H	O*	N	S		
Tallos de café	8,70	75,58	15,44	0,98	48,21	5,61	45,81	0,37	0,0	18,25	[53]
Cáscara de arroz	9,2	65,1	16,40	9,30	46,6	6,2	37,4	0,7	0,10	17,28	[54]
Cáscaras de banano	15,87	59,30	19,59	6,23	35,42	5,35	51,10	1,90	0,0	13,00	[55]

* Los registros de oxígeno se determinan por diferencia y se les resta el contenido de cenizas.

2.2 Modelamiento termoquímico

Un modelado no-estequiométrico de la gasificación fue realizado, el cual se fundamenta en la minimización del total de la energía libre de Gibbs del proceso, y no en los balances químicos de las reacciones. A partir de esto, se optó por emplear el software Aspen Plus para el modelamiento.

La gasificación de la materia prima en un gasificador downdraft se modeló de forma uni-dimensional, es decir, analizando separadamente cada etapa del proceso: secado, pirólisis, combustión y reducción. En primera instancia, la biomasa es secada y separada en sus componentes elementales, después el material volátil y el bio-carbón son identificados por separado, posteriormente hacen combustión con el aire entrante, y por último las reacciones de reducción se llevan a cabo. Finalmente, el sintegas es enfriado y limpiado. El diagrama de flujo desarrollado en Aspen Plus se muestra en la Figura 4. Las líneas sólidas representan el flujo de masa, y las líneas discontinuas el flujo de calor. Los bloques empleados se especifican en la Tabla 2.

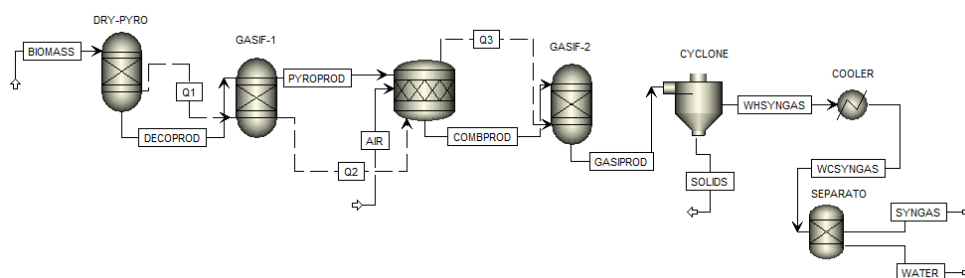


Figura 4. Diagrama de flujo en Aspen Plus para el modelamiento de la gasificación de biomasa

Tabla 2. Listado de bloques presentes en el diagrama de flujo de Aspen Plus

Nombre del bloque	Tipo	Descripción
DRY-PYRO	RYield	Descompone la biomasa no-convencional en especies elementales y agua con los balances estequiométricos definidos
GASIF-1	RGibbs	Simula las reacciones entre las especies elementales y agua a través de la minimización de la energía libre de Gibbs y la restricción del equilibrio químico
COMB	RStoic	Simula las reacciones de combustión con la estequiometría de las reacciones definida
GASIF-2	RGibbs	Simula las reacciones entre los gases de combustión y el bio-carbón a través de la minimización de la energía libre de Gibbs y la restricción del equilibrio químico
CYCLONE	SSplit	Separa los sólidos de los gases calientes
COOLER	Heater	Enfría los gases calientes a temperatura ambiente
SEPARATO	Sep	Separa el contenido de humedad de los gases fríos

Este modelamiento permitió simular el proceso a diferentes temperaturas para cada una de las etapas, puesto que éstas suelen estar demarcadas en los gasificadores downdraft. Asimismo, la composición del sintegas a la salida del proceso de gasificación se registró para diferentes flujos de aire entrante.

El método de propiedades seleccionado fue Peng-Robinson, puesto que resulta conveniente en procesos con hidrocarburos como materia prima. La clase de flujo empleada fue MICINCPD, debido a la presencia de mezcla de gases y sólidos convencionales y no-convencionales. Esta clase de flujo permitió ingresar la distribución del tamaño de partículas dentro del proceso, la cual simuló el uso de pellets de biomasa de 2 cm de diámetro. Las cenizas fueron tratadas como sólido no-convencional.

El diagrama de flujo de la Figura 4 se entiende de la siguiente manera: la biomasa húmeda WETSI ingresa al reactor DRY-PYRO, donde su contenido de humedad es evaporado y la etapa de descomposición propia del proceso de pirólisis se lleva a cabo, convirtiendo la biomasa seca en las especies elementales C , H_2 , O_2 , N_2 y S , y en cenizas. WETSI se define como un sólido no-convencional del cual se conocen los resultados de los análisis próximo y último, por lo que en los métodos de especificación de propiedades se emplearon los modelos HCOALGEN y DCOALIGT para la entalpía y densidad, respectivamente. Los productos del proceso de secado y descomposición fluyen en DECOPROD y reaccionan entre sí en el reactor GASIF-1, produciendo bio-carbón, H_2 , CO , CO_2 , CH_4 y H_2O (PYROPROD). PYROPROD ingresa al reactor COMB junto con aire

denotado como AIR, y las reacciones de combustión se llevan a cabo. Los productos de la combustión COMBPROD reaccionan entre sí en el reactor GASIF-2, cumpliendo con la última etapa de la gasificación, donde principalmente ocurren reacciones endotérmicas de reducción.

Los productos de la gasificación GASIPROD ingresan a un separador ciclónico donde el bio-carbón en SOLIDS es separado de los gases calientes WHSYNGAS. El bio-carbón extraído en SOLIDS se compone de carbono no reaccionado y cenizas. Los gases calientes son enfriados en el intercambiador de calor COOLER hasta temperatura ambiente, y en estas condiciones (WCSYNGAS) se llevan al separador SEPARATO donde se extraen el contenido de agua WATER y el sintegas SYNGAS por separado.

Para cada una de las biomazas en cuestión, se realizó un proceso iterativo con el ingreso de aire sobre el gasificador, a modo de identificar el rango ideal de la razón de equivalencia ER. Los ER se determinaron a partir de la ecuación (1), donde AC_r representa la relación aire-combustible real del proceso y AC_s la relación aire-combustible estequiométrica. Se entiende como rango ideal aquel que genera en la composición del sintegas la mayor producción de H_2 y CO , puesto que son las especies que más influyen en el aumento del poder calorífico del gas extraído del proceso de gasificación.

$$ER = \frac{AC_r}{AC_s} \quad (1)$$

2.3 Validación de resultados

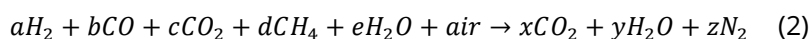
Los resultados registrados del modelamiento fueron contrastados con registros presentes en el estado del arte para trabajos similares, especialmente frente a registros experimentales del proceso de gasificación de las biomazas en cuestión.

2.4 Consideraciones

- Cada bloque del proceso está perfectamente aislado térmicamente con el entorno.
- En cada bloque se presentan mezclas perfectas y uniformidad en las temperaturas.
- El tiempo de residencia de las especies es el suficiente para alcanzar el equilibrio termodinámico en los bloques tipo RGibbs.
- Los gases son considerados como ideales, debido a las altas temperaturas y bajas presiones.

2.5 Evaluación del sintegas

El PCI del sintegas en MJ/kg fue determinado a partir de la aplicación de la ley de Hess sobre el proceso de combustión del sintegas, siguiendo la reacción de la ecuación (2).



A modo de comparar el PCI del sintegas calculado y el registrado en algunos datos experimentales, se determinó el PCI en MJ/Nm³ empleando la ecuación (3).

$$PCI = X_{H_2} PCI_{H_2} + X_{CO} PCI_{CO} + X_{CH_4} PCI_{CH_4} \quad (3)$$

Donde X representa la fracción en volumen de cada componente del sintegas, y los PCI del H_2 , CO y CH_4 son 11,2 MJ/Nm³, 13,1 MJ/Nm³ y 37,1 MJ/Nm³, respectivamente.

Además de especificar y analizar el contenido del sintegas generado por el modelamiento del proceso de gasificación, éste fue evaluado en términos de la eficiencia de conversión de carbón CCE y la eficiencia de gas frío CGE con las ecuaciones (4) y (5), respectivamente. Con CCE fue posible evaluar el contenido de residuos carbonosos presentes en el sintegas en comparación con el contenido de material carbonoso presente en la biomasa entrante. Con CGE se comparó la cantidad de energía presente en el sintegas con la cantidad de energía presente en la biomasa entrante.

$$CCE (\%) = \left(1 - \frac{C \text{ en sintegas}}{C \text{ en biomasa}}\right) * 100 \quad (4)$$

$$CGE (\%) = \frac{\dot{m}_{sin} * PCI_{sin}}{\dot{m}_{bio} * PCI_{bio}} * 100 \quad (5)$$

3. RESULTADOS

Las composiciones del sintegas a diferentes condiciones de ER se muestran para la gasificación de tallos de café, cáscaras de arroz y cáscaras de banano, en la Figura 5. Se observa que la gasificación de estas biomazas genera un sintegas que tiende a: incrementar su contenido de monóxido de carbono CO, y a reducir su contenido de hidrógeno H_2 , dióxido de carbono CO_2 y metano CH_4 , entre mayor es el ER. Puede notarse que para la gasificación de tallos de café con un ER=0,15 se registra el mayor potencial energético del sintegas con un valor de PCI de 6,204 MJ/kg, pues contiene el mayor porcentaje de hidrógeno y el más bajo porcentaje de nitrógeno, puesto que el ingreso de aire es el más bajo.

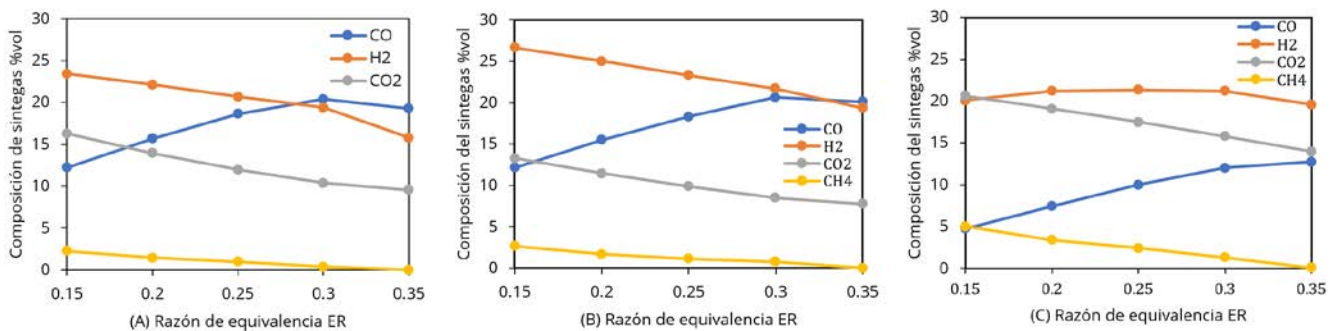


Figura 5. Composición de sintegas en función del ER para la simulación de la gasificación de: A) tallos de café, B) cáscaras de arroz, y C) cáscaras de banano

La simulación de la gasificación de cáscaras de arroz y de cáscaras de banano dejan ver que, al igual que los tallos de café, entre menor sea el ingreso de aire, mayor será el potencial energético del sintegas, en este caso los resultados de PCI fueron 7,051 y 6,914 MJ/kg, respectivamente, para un ER=0,15. El comportamiento del PCI de cada biomasa en función del ER se muestra en la Figura 6.

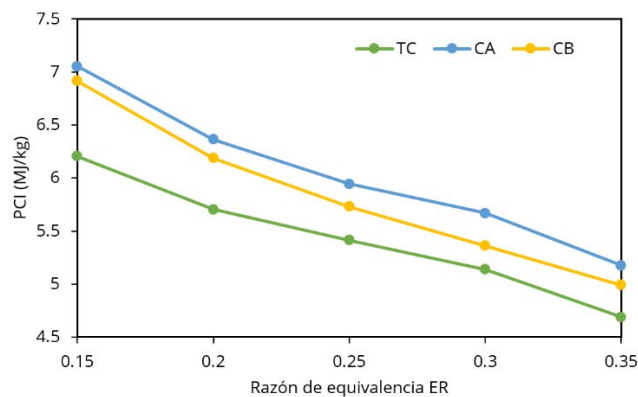


Figura 6. Poder calorífico inferior del sintegas con uso de diferentes biomazas en función del ER

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados previamente mostrados han sido contrastados con procesos experimentales, tal como se muestra en las Tablas 3, 4 y 5. Para las tres biomazas en estudio puede reflejarse un nivel de adaptación satisfactorio, donde las diferencias entre los porcentajes de composición, PCI y producción de sintegas permanecen entre 0 y 3 unidades, y solo en algunos apartados de la gasificación de CB excede las 10 unidades. Por lo tanto, puede inferirse que el modelo predictivo logra predecir con gran precisión la composición del sintegas extraído de la gasificación de diferentes biomazas, pudiendo determinar el correspondiente potencial energético para diferentes ER y, en términos generales, simular el proceso de gasificación bajo diferentes condiciones.

Tabla 3. Resultados de simulación vs datos experimentales de la gasificación de tallos de café

Especie	Simulación	Datos experimentales [53]	Diferencia	Unidades
CO	18,38	16,32	2,06	%vol
H ₂	20,56	19,53	1,03	%vol
CO ₂	12,08	13,77	1,69	%vol
CH ₄	0,5	3,42	2,92	%vol
N ₂	41,55	46,49	4,94	%vol
PCI	5,265	4,951	0,314	MJ/kg
Producción de sintegas	2,45	2,84	0,39	kg sintegas/kg TC

Tabla 4. Resultados de simulación vs datos experimentales de la gasificación de cáscaras de arroz

Especie	Simulación	Datos experimentales [54]	Diferencia	Unidades
CO	20,08	20,2	0,06	%vol
H ₂	19,36	18,6	0,76	%vol
CO ₂	7,78	8,1	0,32	%vol
CH ₄	0,023	1,5	1,477	%vol
N ₂	40,49	NR	NA	%vol
PCI	5,01	5,502	0,492	MJ/Nm ³
Producción de sintegas	3,00	NR	NA	kg sintegas/kg CA

Tabla 5. Resultados de simulación vs datos experimentales de la gasificación de cáscaras de banano

Especie		Simulación	Datos experimentales [55]	Diferencia	Unidades
CO	ER=0,1	6,47	32,5	26,03	%vol
H ₂		35,96	35,0	0,96	%vol
CO ₂		41,57	25,0	16,57	%vol
CH ₄		13,83	5,0	8,83	%vol
N ₂		2,17	NR	NA	%vol
PCI		5,40	9,41	4,01	MJ/Nm ³
Producción de sintegas		0,997	1,05	0,053	kg sintegas/kg CB
CO	ER=0,2	19,39	35,0	15,61	%vol
H ₂		41,31	31,0	10,31	%vol
CO ₂		32,18	27,5	4,68	%vol
CH ₄		5,62	5,0	0,62	%vol
N ₂		1,50	NR	NA	%vol
PCI		7,71	8,02	0,31	MJ/Nm ³
Producción de sintegas		1,55	1,47	0,08	kg sintegas/kg CB
CO	ER=0,3	30,91	35,0	4,09	%vol
H ₂		42,52	22,5	20,02	%vol
CO ₂		25,08	35,0	9,92	%vol
CH ₄		0,2	4,0	3,8	%vol
N ₂		1,29	NR	NA	%vol
PCI		9,32	6,22	3,1	MJ/Nm ³
Producción de sintegas		1,98	1,75	0,23	kg sintegas/kg CB
CO	ER=0,4	41,79	35,0	6,79	%vol
H ₂		32,28	22,5	9,78	%vol
CO ₂		24,40	40,0	15,6	%vol
CH ₄		0	3,0	3,0	%vol
N ₂		1,52	NR	NA	%vol
PCI		9,39	4,96	4,43	MJ/Nm ³
Producción de sintegas		2,26	2,10	0,16	kg sintegas/kg CB
CO	ER=0,5	34,12	34,0	0,12	%vol
H ₂		17,67	15,0	2,67	%vol
CO ₂		22,37	45,0	22,63	%vol
CH ₄		0	3,0	3,0	%vol
N ₂		1,30	NR	NA	%vol
PCI		6,56	3,57	2,99	MJ/Nm ³
Producción de sintegas		2,59	2,49	0,1	kg sintegas/kg CB

La eficiencia de conversión de carbono CCE fue determinada para cada una de las corridas de las simulaciones de la gasificación de las 3 biomásas, y se graficó en la Figura 7 en función del ER. Se aprecia que para la gasificación de TC es necesario un ER de aproximadamente 0,30 para convertir en su totalidad el material carbonoso sólido, mientras que puede quedar sin convertir hasta un 34,25% para un ER=0,15.

Dentro de la gasificación de CA, las condiciones de ER mínimas para convertir todo el carbono están por encima de 0,3, de lo contrario a la salida del proceso el material sólido puede representar hasta un 38,24% del material carbonoso entrante para un ER=0,15.

Por último, los resultados de la gasificación de CB mostraron que para ER cercanos o superiores a 0,30 ya es convertido en su totalidad el material carbonoso sólido a gas, mientras que para condiciones de ER menores a 0,30 los residuos sólidos pueden representar hasta un 32,68% para un ER=0,15.

Los resultados del modelamiento de la gasificación muestran que entre menor sea el ingreso de aire como agente gasificador, mayor será el PCI del sintegas, puesto que el ingreso de partículas de O_2 será cada vez más reducido y limitará la formación de CO y CO_2 , haciendo que la concentración de H_2 y CH_4 , quienes tienen un mayor poder calorífico, sea más alta. Sin embargo, como se muestra en la Figura 7, bajos ER ocasionan que el material carbonoso entrante no sea convertido en gas en su totalidad, y por lo tanto la proporción entre el sintegas y la biomasa sea más baja.

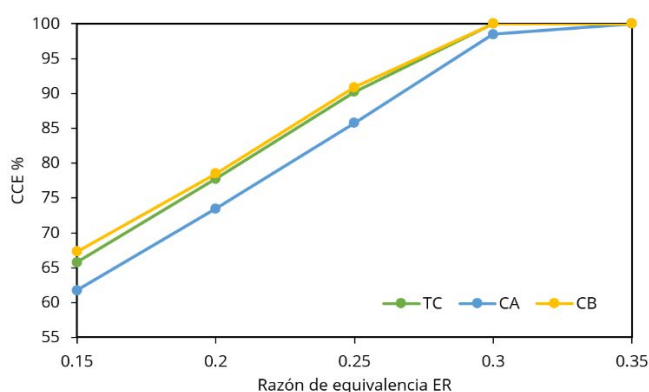


Figura 7. Eficiencia de conversión de carbono CCE de la gasificación de diferentes biomazas

Esta condición de bajos CCE también puede traer problemas con el tratamiento de sólidos dentro del gasificador, y hacer que requiera configuraciones diferentes, ocasionando que el proceso sea económicamente más costoso. Por lo anterior, en un buen número de publicaciones de resultados de gasificación de biomasa [56 - 60], se asume como ER óptimo un rango entre 0,25 y 0,35, dependiendo de la biomasa empleada, puesto que crea unas condiciones donde el sintegas extraído cuenta aún con un aceptable PCI y se espera que todo el combustible entrante sea convertido a gas, dejando siempre un espacio a excepciones, ya que las condiciones del proceso y los usos posteriores del sintegas pueden variar.

Para las condiciones en las cuales el proceso de gasificación de cada una de las biomazas presenta un 100% de CCE se calculó la eficiencia de gas frío CGE (Figura 8), y los resultados se muestran en la Tabla 6. Estos valores de CGE indican que, para la gasificación de TC, más del 75% de la energía contenida en la biomasa entrante se mantiene en el sintegas de salida, mientras que, según los resultados del modelado, la gasificación de CA y CB conserva aproximadamente el 90% de la energía de la materia prima en el gas producido, para las condiciones presentadas.

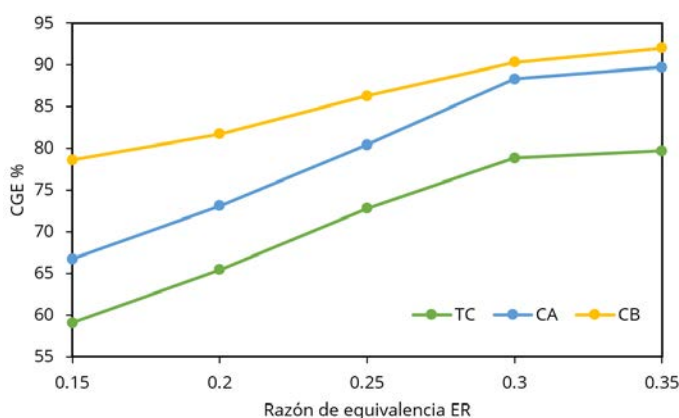


Figura 8. Eficiencia de gas frío CGE de la gasificación de diferentes biomazas

Tabla 6. Eficiencia de gas frío CGE del sintegas en condiciones óptimas producto de la gasificación de TC, CA y CB

Biomasa	CGE (%)	
	ER	
Tallos de café	0,30	78,861
Cáscaras de arroz	0,35	89,739
Cáscaras de banano	0,30	90,330

Nótese que para las condiciones de ER expresadas como óptimas, no solo se extrae sintegas con un PCI aceptable para procesos de combustión, sino que además representa una producción que puede duplicar o triplicar el contenido de biomasa. Así pues, si se compara la biomasa sólida frente a su respectivo sintegas como combustibles, la primera contará con un mayor PCI, pero el sintegas producto de su gasificación representará una mayor disposición de combustible, mayor facilidad y rapidez en el proceso de quemado, y será notablemente más práctico de transportar, sin dejar de lado que el contenido energético de ambos, como ya se mostró en la Tabla 6, puede tener varianzas pequeñas o insignificantes.

La proporción H_2/CO calculada se muestra en la Figura 9, siendo un índice que permite generar una idea del PCI del sintegas con diferentes ER, además del potencial de emisiones que puede traer la combustión de este gas. Así, un sintegas más rico en H_2 en proporción al contenido de CO, representará un mayor PCI que un sintegas con alto contenido de CO, tal como lo muestran las Figuras 6 y 9. De la misma manera, un alto contenido de H_2 permitirá que la combustión del sintegas (asumida como completa) produzca mayores niveles de agua al reaccionar con oxígeno, mientras que una alta concentración de CO reaccionando con oxígeno representará una mayor producción de CO_2 , siendo un gas de especial cuidado para la preservación del medio ambiente.

La Figura 9 muestra cómo, para las tres biomásas, se presenta un decremento de la proporción H_2/CO entre mayor es el ER, el cual se ve reflejado también sobre el decremento del PCI presentado en la Figura 6. La interpretación del comportamiento de la proporción H_2/CO ayuda en el proceso de diseño de sistemas de gasificación de biomasa, pues como se mencionó anteriormente, pueden identificarse condiciones de ER ideales para los objetivos del proceso, pudiendo ser incluso valores con CCE menores del 100%.

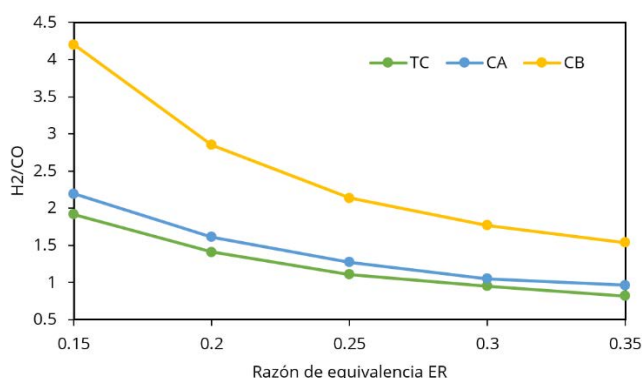


Figura 9. Relación H_2/CO del sintegas producido de la gasificación de TC, CA y CB

5. CONCLUSIONES

Los resultados del modelo muestran un gran acercamiento a los resultados experimentales, y de esta forma valida que es oportuno para predecir la producción y composición del sintegas bajo diferentes condiciones de temperatura, presión y ER.

Pudo notarse que bajos valores de ER producen altos porcentajes de carbón residual en el proceso, y por lo tanto menores CCE. El 100% de CCE se logró para valores de ER cercanos a 0,30, 0,35 y 0,30 para TC, CA y CB, respectivamente.

Teniendo en cuenta la conversión de carbón a gas y el potencial energético del sintegas, se concluyó que el rango ideal de ER para biomásas está entre 0,25-0,35, puesto que se logra una buena producción de sintegas con respecto al contenido de biomasa, al tiempo que este sintegas mantiene un importante PCI. Esto se

reflejó en las CGE registradas, donde se obtuvieron valores de 78,861%, 89,739% y 90,330% para TC, CA y CB, respectivamente.

También, este modelo predictivo permite realizar un primer análisis del proceso de gasificación previo a la fase de diseño de algún sistema de aprovechamiento de biomásas, donde el potencial energético es detallado junto a la producción de algunos contaminantes del proceso.

REFERENCIAS

- [1] International-Energy-Agency, "World Energy Balances 2019," 2019.
- [2] R. Thomson, P. Kwong, E. Ahmad, and K. D. P. Nigam, "Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 21087–21111, 2020.
- [3] L. Cao *et al.*, "Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects," *Environ. Res.*, vol. 186, no. February, p. 109547, 2020.
- [4] C. Higan and M. van der Burgt, *Gasification (2nd Edition)*. 2008.
- [5] S. De, A. Kumar, A. V. S. Moholkar Bhaskar, and T. Editors, *Coal and Biomass Gasification Energy, Environment, and Sustainability Recent Advances and Future Challenges*. 2018.
- [6] N. Hanchate, S. Ramani, C. S. Mathpati, and V. H. Dalvi, "Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p. 123148, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123148.
- [7] J. Zhao *et al.*, "Hydrogen-rich syngas produced from co-gasification of municipal solid waste and wheat straw in an oxygen-enriched air fluidized bed," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 34, pp. 18051–18063, 2021.
- [8] G. Li, Z. Liu, F. Liu, Y. Weng, S. Ma, and Y. Zhang, "Thermodynamic analysis and techno-economic assessment of synthetic natural gas production via ash agglomerating fluidized bed gasification using coal as fuel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 51, pp. 27359–27368, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.025.
- [9] S. Sezer and U. Özveren, "Investigation of syngas exergy value and hydrogen concentration in syngas from biomass gasification in a bubbling fluidized bed gasifier by using machine learning," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 6, 2021.
- [10] M. Saiful Alam, A. T. Wijayanta, K. Nakaso, and J. Fukai, "Study on coal gasification with soot formation in two-stage entrained-flow gasifier," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 255–265, 2015.
- [11] T. Shoji, K. Shindoh, H. Ozaki, and A. Sodeyama, "Waste Plastics Recycling by an Entrained-Flow Gasifier," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 3, no. 2, pp. 75–81, 2001.
- [12] A. F. Ryzhkov, N. A. Abaimov, I. G. Donskoi, and D. A. Svishchev, "Modernization of Air-Blown Entrained-Flow Gasifier of Integrated Gasification Combined Cycle Plant," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 54, no. 3, pp. 337–344, 2018.
- [13] Y. C. Choi, T. J. Park, J. H. Kim, J. G. Lee, J. C. Hong, and Y. G. Kim, "Experimental Studies of 1 Ton/Day Coal Slurry Feed Type Oxygen Blown, Entrained Flow Gasifier," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 493–498, 2001.
- [14] N. A. Abaimov and A. F. Ryzhkov, "Development of a model of entrained flow coal gasification and study of aerodynamic mechanisms of action on gasifier operation," *Therm. Eng. (English Transl. Teploenerg.)*, vol. 62, no. 11, pp. 767–772, 2015.
- [15] R. D. Gomez, M. Palacio, J. F. Arango, A. E. Avila, and J. M. Mendoza, "Evaluation of the energy generation potential by an experimental characterization of residual biomass blends from Córdoba, Colombia in a downdraft gasifier," *Waste Manag.*, vol. 120, pp. 522–529, 2021.
- [16] A. Wiyono, I. M. Gandidi, E. T. Berman, Mutaufiq, and N. A. Pambudi, "Design, development and testing of integrated downdraft gasifier and multi IGCS system of MSW for remote areas," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 20, no. October 2019, pp. 1–11, 2020.
- [17] S. Safarian, S. M. E. Saryazdi, R. Unnthorsson, and C. Richter, "Dataset of biomass characteristics and net output power from downdraft biomass gasifier integrated power production unit," *Data Br.*, vol. 33, p. 106390, 2020.
- [18] S. Mazhko, H. Dadfar, M. S. HajiHashemi, and O. Pourali, "A comprehensive experimental and modeling investigation of walnut shell gasification process in a pilot-scale downdraft gasifier integrated with an internal combustion engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 231, p. 113836, 2021.
- [19] R. D. Gomez, M. Palacio, J. F. Arango, A. E. Avila, and J. M. Mendoza, "Evaluation of the energy generation potential by an experimental characterization of residual biomass blends from Córdoba, Colombia in a downdraft gasifier," *Waste Manag.*, vol. 120, pp. 522–529, 2021.
- [20] A. Wiyono, I. M. Gandidi, E. T. Berman, Mutaufiq, and N. A. Pambudi, "Design, development and testing of integrated downdraft gasifier and multi IGCS system of MSW for remote areas," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 20, no. October 2019, pp. 1–11, 2020.
- [21] S. Safarian, S. M. E. Saryazdi, R. Unnthorsson, and C. Richter, "Dataset of biomass characteristics and net output power from downdraft biomass gasifier integrated power production unit," *Data Br.*, vol. 33, p. 106390, 2020.

- [22] S. Mazhkoo, H. Dadfar, M. S. HajiHashemi, and O. Pourali, "A comprehensive experimental and modeling investigation of walnut shell gasification process in a pilot-scale downdraft gasifier integrated with an internal combustion engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 231, p. 113836, 2021.
- [23] M. Risberg, O. G. W. Öhrman, B. R. Gebart, P. T. Nilsson, A. Gudmundsson, and M. Sanati, "Influence from fuel type on the performance of an air-blown cyclone gasifier," *Fuel*, vol. 116, pp. 751–759, 2014.
- [24] M. Aqib, K. Umeki, M. Risberg, and A. Wingren, "Numerical simulation of a biomass cyclone gasifier: Effects of operating conditions on gasifier performance," *Fuel Process. Technol.*, vol. 218, no. February, p. 106861, 2021.
- [25] R. Dvořák, T. Pařízek, L. Bébar, and P. Stehlík, "Incineration and gasification technologies completed with up-to-date off-gas cleaning system for meeting environmental limits," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 11, no. 1, pp. 95–105, 2009.
- [26] M. Awais, W. Li, A. Munir, M. M. Omar, and M. Ajmal, "Experimental investigation of downdraft biomass gasifier fed by sugarcane bagasse and coconut shells," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 11, no. 2, pp. 429–444, 2021.
- [27] J. Zhang, J. Tang, L. Liu, and J. Wang, "The evolution of catalytically active calcium catalyst during steam gasification of lignite char," *Carbon N. Y.*, vol. 172, pp. 162–173, 2021.
- [28] Z. Chen *et al.*, "Novel application of red mud as disposal catalyst for pyrolysis and gasification of coal," *Carbon Resour. Convers.*, vol. 4, no. October 2020, pp. 10–18, 2021.
- [29] Y. Niu, Z. Song, Y. Li, W. Wang, J. Wen, and K. Zheng, "Performance research of lanthanum-loaded dolomite catalyst for pine catalytic gasification," *Journal Fuel Chem. Technol.*, vol. 49, no. 1, pp. 47–54, 2021.
- [30] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory*, 3rd ed. Elsevier, 2018.
- [31] W. Lan, G. Chen, X. Zhu, X. Wang, C. Liu, and B. Xu, "Biomass gasification-gas turbine combustion for power generation system model based on ASPEN PLUS," *Sci. Total Environ.*, vol. 628–629, pp. 1278–1286, 2018.
- [32] J. Han *et al.*, "Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus," *Energy Convers. Manag.*, vol. 153, no. August, pp. 641–648, 2017.
- [33] S. Mazhkoo, H. Dadfar, M. S. HajiHashemi, and O. Pourali, "A comprehensive experimental and modeling investigation of walnut shell gasification process in a pilot-scale downdraft gasifier integrated with an internal combustion engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 231, p. 113836, 2021.
- [34] M. I. Bagus Setyawan, H. Dafiqurrohman, M. H. Akbar, and A. Surjosatyo, "Characterizing a two-stage downdraft biomass gasifier using a representative particle model," *Renew. Energy*, vol. 173, pp. 750–767, 2021.
- [35] N. Gao, C. Chen, A. Magdziarz, L. Zhang, and C. Quan, "Modeling and simulation of pine sawdust gasification considering gas mixture reflux," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 155, no. March, p. 105094, 2021.
- [36] B. B. Rokhman, "Modeling and Numerical Investigation of the Process of Vapor-Oxygen Gasification of Solid Fuels in a Vertical Flow Reactor Under Pressure," *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 87, no. 5, pp. 1103–1115, 2014.
- [37] J. Cai, W. Zheng, M. Luo, and X. Tang, "Gasification of biomass waste in the moving-grate gasifier with the addition of all air into the oxidizing stage: Experimental and numerical investigation," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 147, pp. 985–992, 2021.
- [38] S. Yang, S. Wang, and H. Wang, "Numerical study of biomass gasification in a 0.3 MWth full-loop circulating fluidized bed gasifier," *Energy Convers. Manag.*, vol. 223, no. October, p. 113439, 2020.
- [39] B. Pandey, Y. K. Prajapati, and P. N. Sheth, "CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 4107–4111, 2020.
- [40] I. Hwang, J. Sohn, U. Do Lee, and J. Hwang, "CFD-DEM simulation of air-blown gasification of biomass in a bubbling fluidized bed gasifier: Effects of equivalence ratio and fluidization number," *Energy*, vol. 219, p. 119533, 2021.
- [41] Z. Li, H. Xu, W. Yang, A. Zhou, and M. Xu, "CFD simulation of a fluidized bed reactor for biomass chemical looping gasification with continuous feedstock," *Energy Convers. Manag.*, vol. 201, no. September, p. 112143, 2019.
- [42] Z. Akyurek, A. Akyuz, M. Y. Naz, S. A. Sulaiman, B. C. Lütüoğlu, and A. Gungor, "Numerical Simulation of Stoichiometric Thermodynamic Equilibrium Model of a Downdraft Biomass Air Gasifier," *Solid Fuel Chem.*, vol. 53, no. 6, pp. 426–435, 2019.
- [43] M. Said, W. Ghani, H. Tan, and D. Ng, "Prediction and optimization of syngas production from air gasification of Napier grass via stoichiometric equilibrium model," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 10, p. 100057, 2020.
- [44] A. Z. Mendiburu, J. A. Carvalho, and C. J. R. Coronado, "Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models," *Energy*, vol. 66, pp. 189–201, 2014.
- [45] J. F. de Oliveira, M. L. Corazza, and F. A. P. Voll, "Thermodynamic Analysis of Municipal Solid Waste Gasification Under Isothermal and Adiabatic Conditions by a Gibbs Free Energy Minimization Model," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 5, pp. 1383–1393, 2019.
- [46] S. Das, P. Kumar Sarkar, and S. Mahapatra, "Thermodynamic optimization of coal-biomass co-gasification process by using non-stoichiometric equilibrium modeling," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 23089–23098, 2018.
- [47] A. Gambarotta, M. Morini, and A. Zubani, "A non-stoichiometric equilibrium model for the simulation of the biomass gasification process," *Appl. Energy*, vol. 227, no. August 2017, pp. 119–127, 2018.
- [48] M. Puig-Gamero, J. Argudo-Santamaria, J. L. Valverde, P. Sánchez, and L. Sanchez-Silva, "Three integrated process simulation using aspen plus®: Pine gasification, syngas cleaning and methanol synthesis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, no. June, pp. 416–427, 2018.

- [49] H. Y. Ismail, A. Abbas, F. Azizi, and J. Zeaiter, "Pyrolysis of waste tires: A modeling and parameter estimation study using Aspen Plus®," *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 482–493, 2017.
- [50] J. F. Peters, S. W. Banks, A. V. Bridgwater, and J. Dufour, "A kinetic reaction model for biomass pyrolysis processes in Aspen Plus," *Appl. Energy*, vol. 188, pp. 595–603, 2017.
- [51] K. N. Dhanavath, K. Shah, S. K. Bhargava, S. Bankupalli, and R. Parthasarathy, "Oxygen-steam gasification of karanja press seed cake: Fixed bed experiments, ASPEN Plus process model development and benchmarking with saw dust, rice husk and sunflower husk," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 3061–3069, 2018.
- [52] A. Gagliano, F. Nocera, M. Bruno, and G. Cardillo, "Development of an Equilibrium-based Model of Gasification of Biomass by Aspen Plus," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 1010–1019, 2017.
- [53] S. Garcia-Freites, A. Welfle, A. Lea-Langton, P. Gilbert, and P. Thornley, "The potential of coffee stems gasification to provide bioenergy for coffee farms: a case study in the Colombian coffee sector," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 10, no. 4, pp. 1137–1152, 2020.
- [54] S. J. Yoon, Y. Il Son, Y. K. Kim, and J. G. Lee, "Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 163–167, 2012.
- [55] S. Cardona, L. Orozco, C. Gómez, W. Solís, J. Velásquez, and L. Rios, "Valorization of banana residues via gasification coupled with electricity generation," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 44, no. 2020, 2021.
- [56] K. Arun, M. Venkata Ramanan, and S. Mohanasutan, "Comparative studies and analysis on gasification of coconut shells and corn cobs in a perforated fixed bed downdraft reactor by admitting air through equally spaced conduits," *Biomass Convers. Biorefinery*, 2020.
- [57] F. Mansur, C. Faizal, N. Samad, S. At Naw, and S. Sulaiman, "Gasification performance of sawdust, pelletized sawdust and sub-bituminous coal in a downdraft gasifier," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 9, pp. 1–10, 2020.
- [58] J. Han *et al.*, "Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus," *Energy Convers. Manag.*, vol. 153, no. August, pp. 641–648, 2017.
- [59] M. Trninić, D. Stojiljković, N. Manić, Ø. Skreiberg, L. Wang, and A. Jovović, "A mathematical model of biomass downdraft gasification with an integrated pyrolysis model," *Fuel*, vol. 265, no. November 2019, p. 116867, 2020.
- [60] R. Jahromi, M. Rezaei, S. Hashem Samadi, and H. Jahromi, "Biomass gasification in a downdraft fixed-bed gasifier: Optimization of operating conditions," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 231, p. 116249, 2021.

Comparación cualitativa de estimaciones de la fracción volumétrica de aceite en flujo anular aceite-agua *Core-Flow*

Adriana Bonilla Riaño¹
Hugo Fernando Velasco²

Iván Darío Ruiz³

^{1,2}*Universidad de La Salle*

³*Universidad del Valle*

Colombia

En este trabajo se presenta la aplicación de una simulación utilizando dinámica computacional de fluidos CFD para investigar el comportamiento de flujo anular, el cual es importante en procesos como la extracción de petróleo. Se llevaron a cabo simulaciones de flujo para diferentes condiciones de velocidades y tres diferentes diámetros, con el fin de comparar los resultados con mediciones experimentales reportadas en la literatura. Se utilizó un dominio 3D con un modelo de turbulencia $k-\omega$ SST en conjunto con la técnica VOF en estado de transición. Se compararon los patrones de flujo encontrando una buena concordancia entre los resultados experimentales y los patrones de flujo encontrados utilizando CFD. También se comparó la fracción volumétrica de fase encontrando variaciones respecto a las ecuaciones empíricas de alrededor del 12%.

¹ Ingeniera Electrónica, Magíster en Ingeniería Electrónica y Doctora en Ciencias e Ingeniería de Petróleo.

Contacto: abonillar@gmail.com

² Ingeniero Electrónico, Magíster en Automatización Industrial y Doctor en Ingeniería Mecánica. Director del Programa en Ingeniería Eléctrica y de la Especialización en Gestión Energética y Ambiental.

Contacto: hvelasco@lasalle.edu.co

³ Ingeniero Mecánico y Magíster en Ingeniería, Doctor(c) en Ingeniería Mecánica.

Contacto: ivan.ruiz@correounivalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El flujo liquido-liquido en tubos, conocido como *Core-Flow*, se presenta en casos donde los dos fluidos (líquidos) son inmiscibles y tienen viscosidades muy diferentes entre sí. Este patrón de flujo ha sido ampliamente estudiado por su relevancia en la producción de petróleo pesado, ya que ha demostrado ser un método eficiente y de bajo costo para la producción de este tipo de petróleo [2–5]. Se debe tener en cuenta que la extracción y transporte de petróleo pesado, debido a sus características, es difícil y costoso de extraer ya que requiere de disolventes, calentamiento o una combinación de estos, para poder hacerlo circular [6].

En el método *Core Flow* se inyectan pequeñas cantidades de agua al aceite (petróleo), de tal forma que el aceite fluya en el centro del tubo y este circundado por un anillo de agua obteniendo un flujo anular, logrando una lubricación del aceite y por lo tanto una disminución significativa de las pérdidas de carga asociadas a la fricción. Debido a que el aceite no entra en contacto con la pared del tubo, la fuerza de cizalla en la pared disminuye acercándose más a la fuerza que tendría un flujo de solo agua [6, 7]. Lo que reduce la potencia de bombeo necesaria para la extracción y su costo [5].

A medida que el petróleo ligero, con viscosidades medias y bajas, va disminuyendo, la importancia del pesado aumenta y se hace necesario continuar desarrollando tecnologías que permitan su recuperación de forma más eficiente, económica y segura [6]. Sin duda hay muchos desafíos aún por enfrentar. Solo refiriéndose a la viscosidad, los petróleos convencionales tienen una viscosidad de entre 1 cP (0.001 Pa.s) y 10 cP (0.01 Pa.s), mientras la viscosidad de los petróleos pesados y extrapesados puede fluctuar entre 20 cP (0.02 Pa.s) y más de 1,000,000 cP (1000 Pa.s) y está directamente relacionada con la temperatura [8].

La mayoría de los estudios experimentales de *Core-Flow* fueron realizados en tubos horizontales, habiendo pocos datos de este patrón en tuberías verticales. Dentro de los parámetros medidos en estos trabajos se encuentran: los diferentes patrones de flujo (mapas de flujo), el gradiente o la caída de presión, y la fracción volumétrica de los fluidos o *Holdup*. Estos parámetros son claves o se deben tener en cuenta para el diseño de las tuberías que llevarán flujos multifásicos, los equipos de separación, las bombas, entre otros equipos de extracción y transporte.

Algunos de estos estudios tienen como objetivo proponer modelos mecánicos generalizados que permitan predecir estas variables para diferentes condiciones de operación como: velocidades de los fluidos, diámetros de las tuberías, viscosidades del aceite, entre otros [6]. A continuación, se presentan algunos de estos trabajos en tubos verticales.

Brauner [9] presentó un modelo para predecir la pérdida de carga y la fracción volumétrica para flujo *Core-Flow*. El autor llegó a la conclusión de que si los dos fluidos, fluyen laminarmente, es decir con un número de Reynolds menor a 2300, la pérdida de carga es independiente de las densidades de los fluidos y para el caso en el que ambos fluyen turbulentamente, entre mayor sea la diferencia entre las densidades de los fluidos, son mayores los factores de reducción.

Bai et al. [10] presentaron un estudio experimental en tubería vertical, ascendente y descendente, para las variables patrón de flujo, fracción volumétrica y gradiente de presión. Un resultado interesante de este trabajo fue la identificación de nuevos patrones conocidos como *Bamboo waves* y *Disturbed bamboo waves*. Por otro lado, reportaron que la caída de presión en el flujo de solo aceite fue 200 veces mayor que cuando se presentaba el flujo *Core-Flow*, con la misma velocidad superficial del aceite.

Bannwart [3] propuso modelos fenomenológicos para la fracción volumétrica y caída de presión en flujos *Core-Flow* en tubos horizontales y verticales, que comparadas con datos experimentales de diferentes bases de datos, tienen buena concordancia. El autor concluyó que la tensión interfacial juega un papel clave en la formación del patrón anular, en tubos con diámetros menores a 5cm.

Prada y Bannwart [11] desarrollaron un modelo para la caída de presión en flujo *Core-Flow* vertical ascendente. Dentro de sus resultados experimentales encontraron una disminución de la pérdida de carga

de hasta mil veces cuando se comparaba Core-Flow con un flujo monofásico de aceite. Y que la caída de presión total era 45 veces menor que el flujo de aceite. Bannwart et al. [12] realizaron un estudio experimental en tubo vertical y horizontal de flujo de aceite pesado y agua. Visualmente pudieron establecer el mapa de flujo e identificar los patrones que se presentan en el rango de velocidades estudiadas.

En la Figura 1 se muestra los patrones identificados en tubo vertical. En este trabajo, los autores propusieron una relación determinar la condición límite para que el flujo anular ocurra.

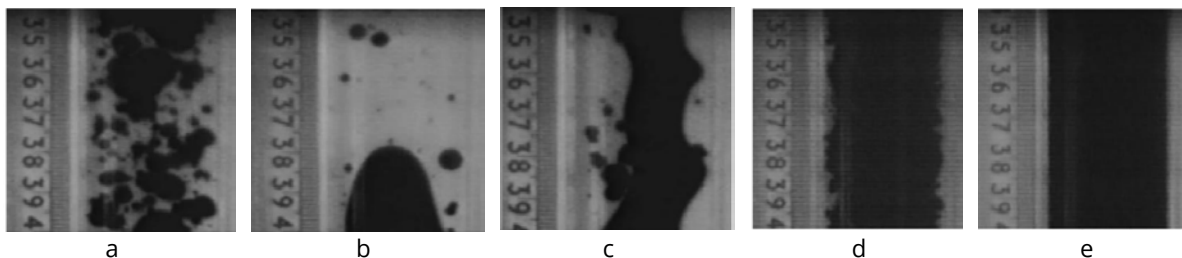


Figura 1. Patrones de flujo observados en un tubo vertical [12]: a) Flujo burbujas dispersas, b) Flujo intermitente con burbujas dispersas, c) Flujo anular perturbado con burbujas dispersas, d) Flujo anular con ondas bambú, y e) Flujo anular perfecto

Rodríguez y Bannwart [1] midieron fracción volumétrica de aceite, velocidad, longitud y amplitud de las ondas que se forman en la interface agua-aceite en flujo *Core-Flow* vertical ascendente y propusieron un modelo para el cálculo de la fracción de aceite. Concluyeron que en flujo vertical ascendente la velocidad del aceite era ligeramente mayor que la del agua.

Vuong et al. [13] realizaron experimentos de flujo Core-Flow en tubos vertical y horizontal enfocados en relacionar la viscosidad del aceite con el patrón de flujo, el gradiente de presión y la fracción volumétrica del agua. Concluyeron que el patrón de flujo y la fracción volumétrica, para las velocidades usadas, cambian muy poco con la viscosidad. Mientras que el gradiente de presión aumenta directamente proporcionalmente con el aumento de la viscosidad.

Cavicchio et al. [14] realizaron un estudio experimental sobre la influencia de la viscosidad en los parámetros de flujo en *Core-Flow* en tubo vertical. Dentro de estos parámetros se encuentran: La relación de deslizamiento entre fases, la fracción volumétrica del aceite y el gradiente de presión friccional. Dentro de los hallazgos a resaltar los autores mencionan que, para las velocidades estudiadas, la disminución de la viscosidad no conlleva a un cambio significativo en la caída de presión por fracción ni en el gradiente de presión total. El gradiente de presión por fricción presentó la misma magnitud que el de un flujo monofásico de agua con el mismo caudal de la mezcla.

Coelho et al. [6] presentan los patrones de flujo que se forman en tres secciones diferentes de un tubo y su relación con el gasto de energía en cada situación. Los autores afirman que usando la técnica de *Core-Flow* se requiere la mitad de energía para transportar una cantidad determinada de petróleo que si se transportara sin agua.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Fracción volumétrica de fase o Holdup

Es la fracción del volumen del tubo ocupado por la fase líquida en el caso de flujos bifásicos [15]. Específicamente, en el caso de flujo agua-aceite, el *holdup* es la fracción volumétrica del aceite. La fracción de fase h_o puede considerarse como una cantidad local y definirse por la ecuación (1).

$$h_o = \frac{A_o}{A} \quad (1)$$

Donde A es el área de la sección transversal del tubo y A_o es la sección transversal del tubo ocupada por el aceite. Sin embargo, frecuentemente las medidas de fracción de fase se realizan en volúmenes y no en áreas transversales, entonces la fracción volumétrica de aceite está definida como se muestra en la ecuación (2).

$$\tilde{h}_o = \frac{V_o}{V} \quad (2)$$

Donde V_o y V son el volumen del aceite y el volumen total, respectivamente. En el caso específico de una geometría cilíndrica, caso de los tubos, la ecuación (2) se puede reacomodar para obtener la ecuación (3).

$$\tilde{h}_o = \frac{\int_0^L A_o(x) dx}{\pi R^2 L} \quad (3)$$

Donde L es el largo del tubo, x es la dirección axial y R es el radio del tubo.

Experimentalmente se han usado muchas técnicas para determinar el *holdup* como por ejemplo: técnicas basadas en radiación como rayos gamma, rayos x y neutrones [16]; válvulas de cierre rápido [17], sensores de conductancia y capacitancia [18], entre otros. Las más ampliamente usadas son las válvulas de cierre rápido que son sencillas de implementar, pero no pueden medir comportamiento transientes o locales. Las técnicas basadas en radiación tienen algunas ventajas como la alta resolución temporal y la medición local, pero normalmente son caras y requieren de condiciones de seguridad especiales. Los sensores eléctricos, de conductancia y capacitancia, son baratos y fáciles de construir, y sus desventajas están relacionadas con la baja sensibilidad y la dependencia de procesos de calibración y reconstrucción.

A partir de los datos experimentales se han desarrollado correlaciones empíricas para calcular el *holdup*, en la Tabla 1 se presentan ejemplos de correlaciones encontradas en la literatura, que han sido validadas con una gran cantidad de datos tal y como se puede observar desde la ecuación (4) a la ecuación (13).

Tabla 1. Correlaciones empíricas para fracción volumétrica de fase (h_w de agua y h_o de aceite) en flujo Core-Flow de aceite y agua.

Autor	Correlación	
Oliemans et al. [19]	$h_w = c_w [1 + 0.2(1 - c_w)^5]$	(4)
Bai et al. [10]	Para flujo vertical ascendente: $\frac{h_w}{L} = \frac{1}{(1+0.72\frac{V_{so}}{V_{sw}})}$	(5)
	$V_{so}(1 - h_o) - s_o V_{sw} h_o = 0$ Para flujo horizontal	(6)
	$V_{so}(1 - h_o) - s_o V_{sw} h_o - V_{ref} F(h_o) = 0$ Para flujo vertical	(7)
Bannwart [20]	donde $s_o = 2$, $V_{ref} = \frac{(\rho_o - \rho_w)gD^2}{16\mu_o}$	(8)
	$F(h_o) = -h_o^2 [2(1 - h_o) + (1 + h_o) \ln(h_o)]$	(9)
	$V_{so}(1 - h_o) - s_o V_{sw} h_o - c V_{ref} h_o^q (1 - h_o)^m = 0$ donde V_{so} es la velocidad superficial del aceite, V_{sw} es la velocidad superficial del agua y V_{ref} es:	(10)
Rodríguez y Bannwart [1]	$V_{ref} = a_i \frac{1}{n_i - 2} \sqrt{gD} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \right)^{\frac{1}{2-n_i}} \left(\frac{\rho_2 \sqrt{gD} D}{\mu_2} \right)^{\frac{n_i}{2-n_i}}$	(11)
	$q = \frac{7 - 3n_i}{4 - 2n_i}$ donde, $s_o = 1.17$, $c = 0.0122$, $m = 0$, g es la constante gravitacional, D es el diametro del tubo, ρ es la densidad, μ es la viscosidad, y los subindices 1 y 2 se refieren al aceite y al agua, respectivamente. Las constantes a_i y n_i son 0.079 y 0.25, para flujo turbulento en el anillo de agua o $a_i = 16$ and $n_i = 1$ para flujo laminar en el anillo de agua.	(12)
Rodríguez et al. [21]	El holdup puede ser obtenido solucionando la ecuación: $V_{so}(1 - h_o) - 1.17 V_{sw} h_o - 0.02 h_o^{1.79} = 0$	(13)

2.2 Dinámica de fluidos computacional de flujo Core-Flow en tuberías

Los flujos multifásicos al interior de tuberías han sido estudiados haciendo uso de la mecánica computacional de fluidos CFD. Ya que debido a la complejidad de los fenómenos presentes en dichos flujos no es posible tener una solución analítica completa. Es decir, una solución que tome en cuenta todas o la mayoría de las variables que actúan en esos casos. Y adicionalmente, porque las ecuaciones que modelan los flujos, en la mayoría de los casos, son ecuaciones diferenciales parciales no lineales.

Los métodos numéricos implementados en software de mecánica de fluidos computacional CFD permiten predecir y estudiar los comportamientos de dichos flujos y han ganado gran interés en años recientes. Por

ejemplo, para el caso de flujos bifásicos se encuentran trabajos como los de Mazdak et al. [22], Fadhl et al. [23] y Shine et al. [24]. Estos trabajos se enfocan en simular y predecir comportamiento determinados, como la evaporación o la mezcla entre los fluidos.

En el caso de flujo *Core-Flow* se han realizado estudios computacionales con el objetivo de comparar los datos experimentales y verificar que las aproximaciones numéricas tienen gran concordancia a lo observado en los experimentos. Encontrando que la dinámica de fluidos computacional tiene la capacidad de capturar comportamientos reales de los flujos, como ondas en la interface, espesor del anillo de agua, dependencia de la viscosidad, por ejemplo.

El trabajo de Ghosh et al. [25] presenta los resultados de varios experimentos en flujo vertical descendente partiendo de datos experimentales encontrados en la literatura. Los autores compararon la pérdida de carga y el espesor del núcleo de aceite. Utilizaron el método *Volume of Fluid* VOF y el modelo de turbulencia k-ε. Y concluyeron que con los parámetros seleccionados la interface aceite-agua no tenía la ondulación esperada. También concluyeron que el gradiente de presión aumenta con la velocidad superficial de los fluidos.

Silva et al. [26] realizaron simulaciones de *Core-Flow* ascendente en tubo vertical usando el método VOF consiguiendo reproducir el comportamiento ondulado de la interface aceite-agua. Las ondas tienen diferentes comportamientos, como alargamientos o acortamientos, dependiendo de las velocidades superficiales de los fluidos, como en los experimentos físicos. Los resultados fueron comparados con las fotos obtenidas por Rodríguez y Bannwart [1]. Los autores proponen como trabajo futuro extender el estudio a simulaciones en espacio tridimensional.

Dado que hay muy pocos trabajos de simulación usando CFD de flujos *Core-Flow* en tubos verticales y los existentes usan espacios 2D, este trabajo presenta un estudio de la fracción volumétrica del aceite en este tipo de flujo en el espacio 3D, usando el método VOF y el modelo de turbulencia k-ω SST y los resultados son comparados con datos experimentales y algunas correlaciones encontradas en la literatura.

3. MÉTODO

3.1 Puntos de trabajo

El desempeño del modelo VOF fue validado con algunos datos presentados por diferentes autores, Rodríguez y Bannwart [1], Vuong et al. [13] y Bonilla et al. [27]. Las condiciones de operación se resumen en la Tabla 2. Y en la Figura 2 se puede ver el mapa de flujo de los puntos experimentales usados en este trabajo.

Tabla 2. Condiciones experimentales

Experimento	Diámetro del tubo (m)	Viscosidad del aceite (Pa.s)	Densidad del aceite (kg/m ³)	Tensión superficial (N/m)	Autor
Experimento 1	0,0284	0,5	930	0,029	Rodríguez y Bannwart [1]
Experimento 2	0,0508	1,07	884,4	0,0304	Vuong et al. [13]
Experimento 3	0,062	2	950	0,02	Bonilla et al. [27]

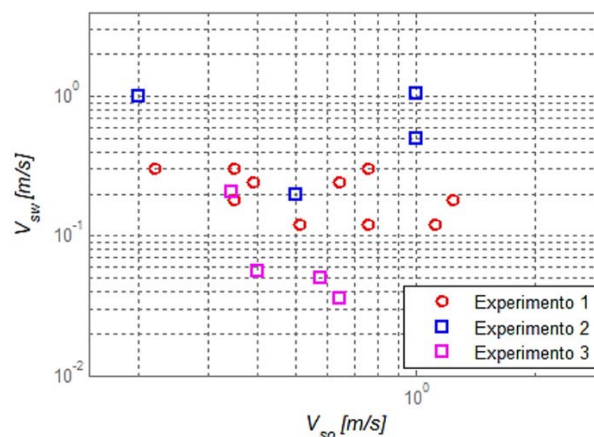


Figura 2. Mapa de flujo experimental

3.2 Modelo CFD

En este trabajo fue usado el modelo de volumen de fluido (*Volume of Fluid*, VOF). Este modelo ofrece una solución numérica a las ecuaciones de Navier-Stokes para la conservación de la masa y la conservación del movimiento, junto con una variable que se llama fracción de volumen.

El modelo VOF permite modelar fluidos inmiscibles, como es el caso el agua y el aceite, resolviendo un conjunto de ecuaciones de movimiento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio computacional.

Este modelo fue creado especialmente para flujos donde hay interfaces acentuadas, continuas y bien definidas. Las ecuaciones solucionadas por el modelo en cada nodo se presentan a continuación. La ecuación (14) muestra la conservación de masa.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (14)$$

Donde ρ , \mathbf{u} , t son la densidad, velocidad y tiempo, respectivamente. La ecuación (15) define la conservación del movimiento.

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (15)$$

Donde p es la presión estática, \mathbf{g} es la gravedad y \mathbf{F} es la fuerza de tensión interfacial. La ecuación (16) define la fracción volumétrica.

$$\frac{\partial(\rho_o \alpha_o)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_o \alpha_o \mathbf{u}) = 0 \quad (16)$$

Donde ρ_o es la densidad del aceite, α_o es la fracción de aceite. Y de acuerdo con la ecuación de continuidad, la suma de las fracciones de agua y de aceite son iguales a 1, tal y como muestra la ecuación (17).

$$\alpha_o + \alpha_w = 1 \quad (17)$$

Además del modelo de flujo multifásico VOF se usó el modelo de turbulencia k - ω para modelar la turbulencia. Las ecuaciones gobernantes de este modelo son, la energía cinética turbulenta, descrita en la ecuación (18), y la tasa de disipación específica de la ecuación (19).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot k \right) + G_k - Y_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \cdot \omega \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (19)$$

Donde G_k es la generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes de velocidad media, G_ω es la tasa específica de disipación de ω , Y_k y Y_ω representan la dispersión de k y ω debido a la turbulencia, μ_t es la viscosidad turbulenta y D_ω es la difusión térmica cruzada.

3.3 Parámetros de simulación

Para las simulaciones computacionales, se hizo uso de un dominio 3D en estado de transición. La simulación fue llevada a cabo con 6000 pasos de simulación utilizando 1 milisegundo como *time step*. A continuación, se describe las consideraciones que se tuvieron en cuenta.

- *Dominio computacional y condiciones de borde.* La Figura 3 muestra el dominio computacional que se desarrolló para la simulación de los 3 experimentos. Las dimensiones son $L = 1m$ y $D_{oil} = 0.8D$, donde D depende del experimento mostrado en la Tabla 2.

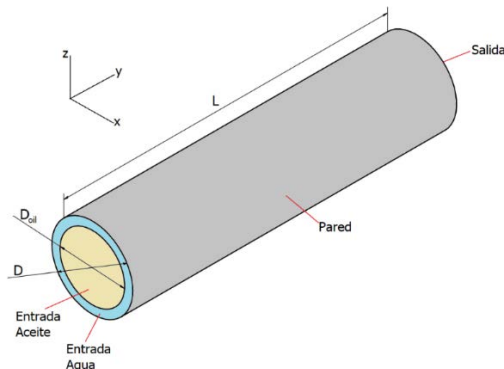


Figura 3. Dominio computacional

De esta manera, las condiciones de borde implementadas fueron las siguientes:

- Velocidad de entrada constante del agua y del aceite positiva a lo largo del eje y como se muestra.
 - A la salida se configuró una condición de *outflow* tratando de darle continuidad al flujo.
 - La pared cilíndrica fue configurada con una condición de no-deslizamiento.
 - Cambios de temperatura, así como cambios de densidad no fueron tenidos en cuenta.
 - La gravedad fue configurada en dirección contraria al flujo (dirección $-y$).
- *Proceso de enmallado.* Debido a la naturaleza del estudio, y con el objetivo de obtener una independencia de los elementos, se utilizaron, para cada experimento, los elementos mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Elementos utilizados en las simulaciones

Experimento	Elementos
Experimento 1	78882
Experimento 2	84825
Experimento 3	272436

Se hizo uso principalmente hexaedros de primer orden. En las paredes se utilizó una condición de *inflation* con 17 capas, con una tasa de crecimiento de 1.1. La malla resultante se muestra en la Figura 4.

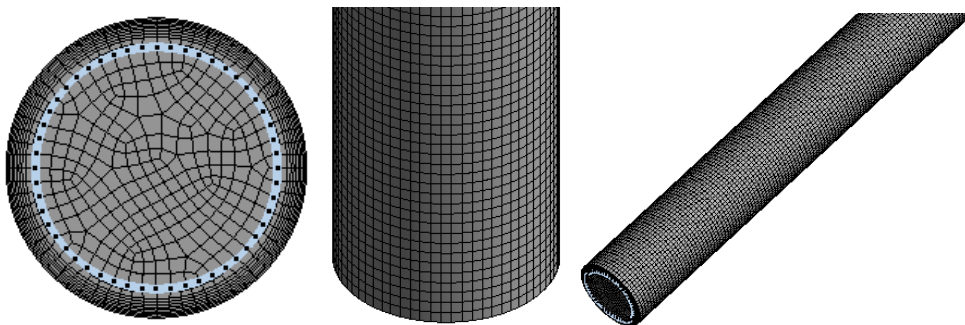


Figura 4. Enmallado utilizado

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizaron un total de 19 experimentos usando CFD. Las condiciones de contorno de velocidad superficial del aceite y velocidad superficial del agua fueron cambiadas para cada experimento. La fracción volumétrica del aceite fue calculada y fue comparada con dos correlaciones de la literatura y la aproximación del modelo homogéneo.

4.1 Patrones de flujo

En las Figuras 5, 6 y 7 se puede observar las formas interfaciales de las simulaciones en CFD y los resultados experimentales, en estas figuras (ítem a) el color rojo indica aceite y el color azul representa al agua. Se pudieron reproducir patrones de flujo reportados en la literatura, es decir se comprobó que las simulaciones

computacionales capturan la forma de la interface entre los fluidos. Los flujos identificados, fueron *Core-Flow* perfecto, *Core-Flow* con ondas bambú y *Core-Flow* con interfase ondulada.

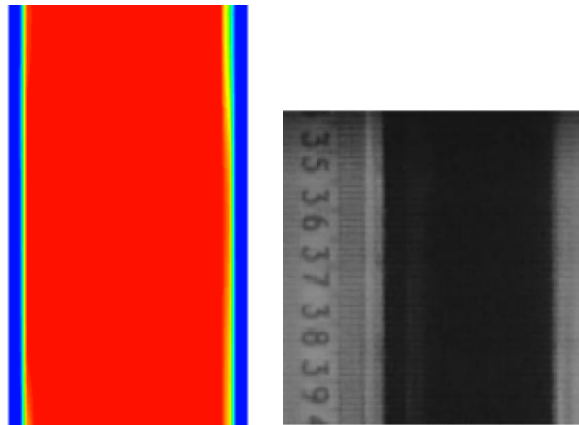


Figura 5. *Core-Flow* perfecto: a) Experimento 1, $V_{so}=0,51\text{m/s}$ y $V_{sw}=0,12\text{m/s}$, y b) Fotografía de *Core-Flow* perfecto [12]

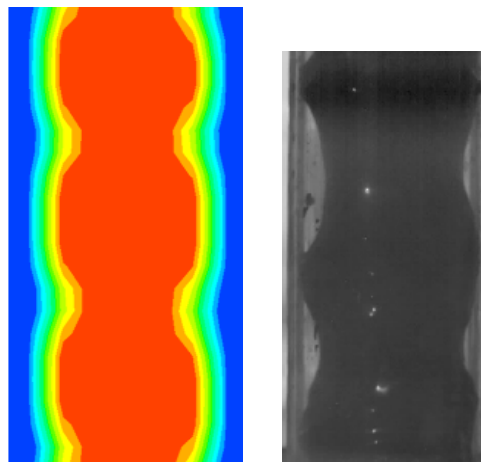


Figura 6. *Core-Flow* con ondas bambú: a) Experimento 3, $V_{so}=0,35\text{m/s}$ y $V_{sw}=0,3\text{m/s}$, y b) Fotografía de *Core-Flow* con ondas bambú

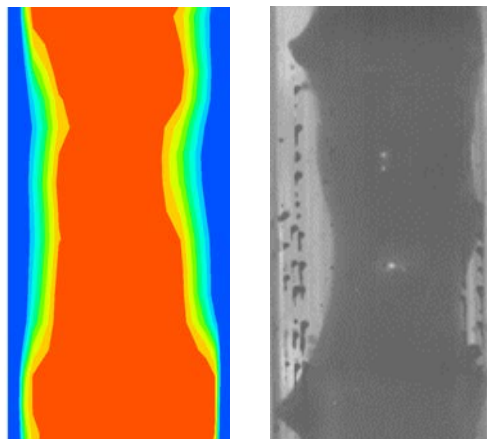


Figura 7. *Core-Flow* con interfase ondulada: a) Experimento 3, $V_{so}=0,398\text{m/s}$ y $V_{sw}=0,056\text{m/s}$, y b) Fotografía de *Core-Flow* con interfase ondulada

4.2 Comparación con datos experimentales y con correlaciones

Para comparar los datos obtenidos con las simulaciones y las correlaciones se usa el error relativo promedio, que está definido por la ecuación (20). Donde N es el número de experimentos y el subíndice i indica un experimento determinado.

$$Error = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Abs(x_{CFD_i} - x_{Experimental_i})}{x_{Experimental_i}} \times 100\% \quad (20)$$

En la Tabla 4 se muestran los errores relativos de cada uno de los experimentos. Es importante mencionar que cada autor realizó un procedimiento de medición o una medida diferente, en los experimentos 1 y 3 el *holdup* fue estimado a través de tratamiento de imágenes del flujo, mientras que en el experimento 2 fueron usadas válvulas de cierre rápido.

Tabla 4. Error relativo promedio

Experimento	Error relativo promedio CFD comparado con datos experimentales [%]
Experimento 1	12,6
Experimento 2	3,91
Experimento 3	5,13

En el caso del experimento 1 se usó un filtrado clásico y en el del experimento 3 se evaluaron diferentes filtros para encontrar la mejor opción, lo que significaría un refinamiento en los resultados y por lo cual podría haber la diferencia de 7% en el error de uno y el otro.

En la Tabla 5 se encuentran los errores relativos promedio de cada uno de ellos. Según el modelo homogéneo el *holdup* se calcula de acuerdo a la ecuación (21). Donde V_{so} es la velocidad superficial del aceite, V_{sw} es la velocidad superficial del agua.

$$h_o = \frac{V_{so}}{V_{so} + V_{sw}} \quad (21)$$

Tabla 5. Error relativo promedio modelo homogéneo y correlaciones empíricas

Experimento	Modelo homogéneo [%]	Correlación Rodriguez y Bannwart [%]	Correlación Bai et al. [10] [%]
Experimento 1	18,78	11,22	7,76
Experimento 2	7,93	15,07	22,3
Experimento 3	19,81	13,52	13,3

El experimento 1 tuvo una mejor concordancia con la correlación de Bai et al. [10] con un error de 7,76%, los resultados del experimento 2 fueron mejor estimados con el modelo homogéneo, y por último el *holdup* del experimento 3 fue estimado de forma muy similar por la correlación de Rodriguez y Bannwart y por la de Bai et al. [10].

Esto corrobora el hecho de que cada correlación y modelo describe bien los flujos bajo ciertos parámetros y características y no pueden ser tomados como modelos generalizados.

Por otro lado, se puede concluir que el modelo CFD usado se ajusta mejor a los datos experimentales que las correlaciones. Teniendo la ventaja de que se ajusta a cada una de las características de los flujos.

En las Figuras 8 a 10 se presenta los resultados de dos correlaciones encontradas en la literatura y el modelo homogéneo, los resultados de las simulaciones y los datos experimentales para cada experimento.

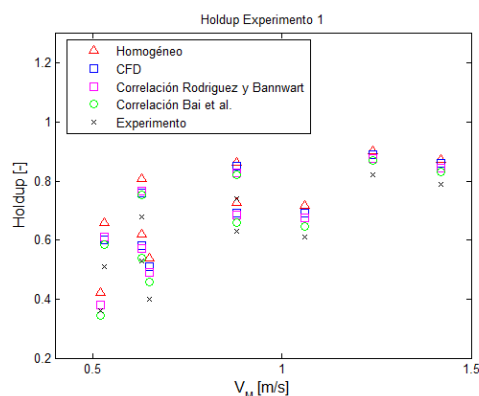


Figura 8. Comparación de *Holdup* usando correlaciones, modelo homogéneo, CFD y datos experimentales para el experimento 1

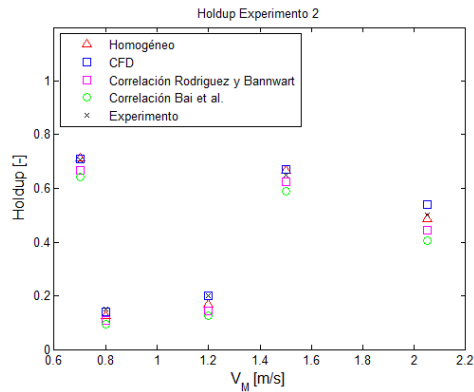


Figura 9. Comparación de *Holdup* usando correlaciones, modelo homogéneo, CFD y datos experimentales para el experimento 2

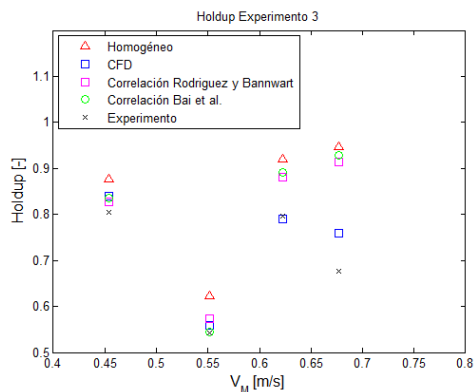


Figura 10. Comparación de *Holdup* usando correlaciones, modelo homogéneo, CFD y datos experimentales para el experimento 3

5. CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones computacionales utilizando CFD para analizar la interacción agua-aceite de un flujo anular utilizando el modelo VOF para la interacción entre los fluidos y el modelo $k-\omega$ SST para el modelado de la turbulencia. Para tal fin, se hizo uso de un dominio tridimensional.

Como se puede ver en la Figura 5 a 7, los patrones de flujo encontrados tienen un comportamiento similar a los patrones observados de forma experimental. También, los resultados cuantitativos de la fracción volumétrica, mostraron una buena concordancia con los datos experimentales, con un error máximo en el Experimento 1 de alrededor del 12%, mientras que los otros experimentos mostraron porcentajes de error menores al 6% (ver Tabla 4). Esto muestra que las simulaciones computacionales son una forma efectiva de estimar tanto el patrón de flujo como la fracción volumétrica.

Es interesante verificar como aparecen variaciones del flujo anular inclusive con cambios pequeños en las velocidades superficiales, y que CFD es capaz de detectar esas variaciones.

Por último, una extensión directa de este trabajo sería estudiar el gradiente de presión y verificar su dependencia del tipo de patrón y la dimensión o espesor del anillo de agua.

REFERENCIAS

- [1] O. M. H. Rodriguez and A. C. Bannwart, "Experimental study on interfacial waves in vertical core flow," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 54, no. 3-4, pp. 140-148, 2006.
- [2] A. C. Bannwart, O. M. H. Rodriguez, C. H. M. de Carvalho, I. S. Wang, and R. M. O. Vara, "Flow Patterns in Heavy Crude Oil-Water Flow," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 126, no. 3, p. 184, 2004.
- [3] A. C. Bannwart, "Modeling aspects of oil - water core - annular flows," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 32, pp. 127-143, 2001.
- [4] A. C. Bannwart, O. M. H. Rodriguez, J. L. Biazussi, F. N. Martini, M. F. Selli, and C. H. M. De Carvalho, "Water-assisted flow of heavy oil in a vertical pipe: Pilot-scale experiments," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 10, p. A32, 2011.

- [5] S. Ghosh, T. K. Mandal, G. Das, and P. K. Das, "Review of oil water core annular flow," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 1957–1965, Oct. 2009.
- [6] N. M. de A. Coelho *et al.*, "Energy savings on heavy oil transportation through core annular flow pattern: An experimental approach," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 122, p. 103127, 2020.
- [7] A. C. Bannwart, O. M. H. Rodriguez, J. L. Biazussi, F. N. Martins, M. F. Selli, and C. H. M. De Carvalho, "Water-assisted flow of heavy oil in a vertical pipe: Pilot-scale experiments," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 10, no. 1, 2012.
- [8] K. Guo, H. Li, and Z. Yu, "In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review," *Fuel*, vol. 185, pp. 886–902, 2016.
- [9] N. Brauner, "Two-phase liquid-liquid annular flow," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 17, no. 1, pp. 59–76, 1991.
- [10] R. Bai, K. Chen, and D. D. Joseph, "Lubricated Pipelining: Stability of Core-Annular Flow V: Experiments and comparison with theory," *J. fluid mech.*, pp. 97–132, 1992.
- [11] J. W. V. Prada and A. C. Bannwart, "Modeling of Vertical Core-Annular Flows and Application to Heavy Oil Production," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 123, no. 3, pp. 194–199, Sep. 2001.
- [12] A. C. Bannwart, O. M. H. Rodriguez, C. H. M. de Carvalho, I. S. Wang, and R. M. O. Vara, "Flow Patterns in Heavy Crude Oil-Water Flow," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 126, no. 3, p. 184, 2004.
- [13] D. H. Vuong, H. Q. Zhang, C. Sarica, and M. Li, "Experimental study on high viscosity oil/water flow in horizontal and vertical pipes," *Proc. - SPE Annu. Tech. Conf. Exhib.*, vol. 4, no. October, pp. 2454–2463, 2009.
- [14] C. A. M. Cavicchio, J. L. Biazussi, M. S. de Castro, A. C. Bannwart, O. M. H. Rodriguez, and C. H. M. de Carvalho, "Experimental study of viscosity effects on heavy crude oil-water core-annular flow pattern," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 92, no. November 2017, pp. 270–285, 2018.
- [15] G. A. Payne, C. M. Palmer, J. P. Brill, and H. D. Beggs, "Evaluation of Inclined-Pipe, Two-Phase Liquid Holdup and Pressure-Loss Correlation Using Experimental Data," *J. Pet. Technol.*, vol. 31, no. 9, pp. 1198–1208, 1979.
- [16] S. Aslina, S. Mazlina, M. J. W. Hassan, and S. D. Ehsan, "In-situ phase fractions for oil and water occupied in pipe," *Int. J. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 248–256, 2006.
- [17] G. Oddie, H. Shi, L. J. Durlinsky, K. Aziz, B. Pfeffer, and J. a. Holmes, "Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 29, no. 4, pp. 527–558, Apr. 2003.
- [18] D. Strazza, M. Demori, V. Ferrari, and P. Poesio, "Capacitance sensor for hold-up measurement in high-viscous-oil/conductive-water core-annular flows," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 22, no. 5, pp. 360–369, Oct. 2011.
- [19] R. V. A. Oliemans, G. Ooms, H. L. Wu, and A. Duijvestijn, "Core-Annular Oil/Water flow: Turbulent-Lubricating-Film Model and Measurement in a 5cm Pipe Loop," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 13, no. 1, pp. 23–31, 1987.
- [20] A. C. Bannwart, "Wavespeed and volumetric fraction in core annular flow," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 24, pp. 961–974, 1998.
- [21] O. M. H. Rodriguez, a. C. Bannwart, and C. H. M. de Carvalho, "Pressure loss in core-annular flow: Modeling, experimental investigation and full-scale experiments," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 65, no. 1–2, pp. 67–75, Mar. 2009.
- [22] P. Mazdak *et al.*, "Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 105, pp. 71–84, 2016.
- [23] B. Fadhl, L. C. Wrobel, and H. Jouhara, "CFD modelling of a two-phase closed thermosyphon charged with R134a and R404a," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, pp. 482–490, 2015.
- [24] S. R. Shine, S. Sunil Kumar, and B. N. Suresh, "Numerical study of wave disturbance in liquid cooling film," *Propuls. Power Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 107–118, 2013.
- [25] S. Ghosh, G. Das, and P. K. Das, "Simulation of core annular downflow through CFD-A comprehensive study," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 49, no. 11, pp. 1222–1228, 2010.
- [26] R. Gupta, C. K. Turangan, and R. Manica, "Oil-water core-annular flow in vertical pipes: A CFD study," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94, no. 5, pp. 980–987, 2016.
- [27] A. Bonilla Riano, A. C. Bannwart, and O. M. H. Rodriguez, "Holdup estimation in core flow using image processing," in *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013, pp. 334–338.

Diseño de un recipiente de alta presión con accesos ópticos para la caracterización de chorros de inyección en estado no reactivo

Javier Andrés Urbano Tole¹

Oscar Hernando Venegas Pereira²

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

En este capítulo se describe el proceso de diseño y selección de componentes para desarrollar un sistema que permita caracterizar chorros de inyección en condiciones no-reativas. Para tal fin se muestra el diseño y simulación del principal componente: el recipiente a presión con accesos ópticos, que permite inyectar el chorro en una atmósfera en unas condiciones similares a las de la cámara en un motor de combustión interna alternativo y, en conjunto con la selección adecuada de elementos ópticos y el sistema de alimentación de combustible, evaluar tanto la caracterización hidráulica del inyector como el comportamiento macroscópico y/o microscópico del chorro en condiciones no reactivas.

¹ Ingeniero Mecánico y Magíster en Ingeniería Mecánica.

Contacto: javier.urbano@escuelaing.edu.co

² Ingeniero Mecánico, Magíster en Motores de Combustión Interna y Doctor en Sistemas Propulsivos.

Contacto: oscar.venegas@escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los temas más tratados a nivel mundial es la búsqueda y uso de fuentes de energía autosostenibles y a su vez con un impacto ambiental bajo. Durante los últimos años, en el sector automotor, el desarrollo tecnológico y en especial los nuevos sistemas de inyección han permitido estar alineados con las exigencias cada vez mayores en cuanto a emisiones en vehículos de transporte operados con motores de combustión interna.

No obstante, en Colombia aún existe una brecha científica en el campo del conocimiento de saber cómo es la degradación de un sistema de inyección a medida que transcurre el tiempo bajo las condiciones de operación locales (condiciones geográficas, combustibles locales, condiciones de manejo, entre otros), lo cual hace necesario la implementación de equipos que permitan estudiar los cambios en la morfología del chorro de inyección en condiciones cercanas a las reales.

Con el fin de cerrar dicha brecha en el conocimiento se diseña y pone a punto un sistema que permita la caracterización de chorros de inyección en motores de combustión interna con el propósito de estudiar las características del chorro de inyección, en estado no reactivo tanto a nivel macroscópico como microscópico. Uno de los elementos más relevantes en el sistema es el recipiente de alta presión, el cual permite simular las condiciones al interior de un motor de combustión interna alternativo MCI en estado no reactivo.

Para su diseño, se han realizado cálculos analíticos usando la teoría en recipientes a presión y se ha llevado a cabo un estudio paramétrico tridimensional por elementos finitos con el fin de conocer el efecto de la relación de espesor, relación de tamaño del orificio y relación de esbeltez en el Factor de Concentración de Esfuerzo SCF en recipientes a presión cilíndricos con orificios circulares.

Adicionalmente para la visualización del chorro de inyección, se requiere que el recipiente de alta presión tenga unos accesos ópticos (ventanas transparentes) capaces de soportar la presión interna sin sufrir deformaciones significativas para evitar aberraciones en la formación de la imagen.

Por otro lado, se requiere de la selección de diferentes elementos ópticos (cámara, lentes, iluminación) que permitan obtener imágenes con una alta resolución espacial usando la técnica de iluminación trasera difusa.

Finalmente, para el correcto suministro de combustible hacia el inyector, se construye un carrito de inyección que permite variar las condiciones aguas arriba del inyector como la presión de inyección.

2. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección, se presentan los fundamentos conceptuales en relación con la caracterización hidráulica de un inyector y los principales parámetros que se usan para la caracterización de un chorro de inyección, además se dan a conocer las variables ópticas involucradas en la adquisición de una imagen y finalmente se expone la teoría de referencia para determinar los esfuerzos generados en recipientes a presión.

2.1 Caracterización hidráulica y del chorro de inyección

El comportamiento del flujo en el interior de los orificios de inyector son complejos de estudiar debido a las pequeñas dimensiones del orificio (cientos de micrómetros), las altas presiones de inyección (*200 bar* en motores de encendido provocado de inyección directa y *2000 bar* en motores de encendido por compresión) y así como las altas velocidades en dichos orificios (cientos de metros por segundo) hacen complicado el obtener información del comportamiento hidráulico de éstos [1-4].

En las Figuras 1 y 2 se muestra ejemplos de un inyector a gasolina de inyección directa y un inyector Diesel common rail respectivamente.

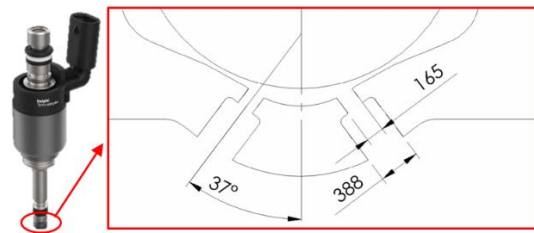


Figura 1. Inyector a gasolina de inyección directa Dimensiones en μm (adaptada de [5])

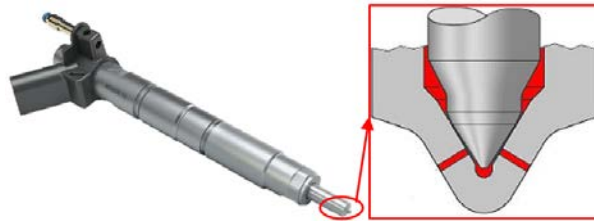


Figura 2. Inyector Diesel common rail

Sin embargo, varios estudios referentes a la caracterización hidráulica en orificios de inyección [6-8], han logrado conocer el comportamiento del fluido en el interior a partir de parámetros medidos a la salida de los orificios como el coeficiente de descarga y la presión aguas abajo del orificio. El coeficiente de descarga C_d se define como la relación entre el gasto másico real y el gasto másico teórico (obtenido a través de la ecuación de Bernoulli) y varía en función de la presión de inyección y la presión aguas abajo del orificio que simula las condiciones de presión en el interior de la cámara de combustión de un MCI. En la ecuación (1) se muestra el coeficiente de descarga y en la ecuación (2) el gasto másico teórico.

$$C_d = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_b} \quad (1)$$

$$\dot{m}_b = \rho_f \cdot A_o \cdot u_B \quad (2)$$

En (2) ρ_f es la densidad del fluido, A_o el área geométrica a la salida del orificio y u_B es la velocidad teórica calculada a partir de la ecuación de Bernoulli, ecuación (3), entre un punto aguas arriba y la salida del orificio. En la ecuación 3, se considera que la distancia entre la entrada y la salida de un inyector es tan pequeña que la diferencia de energía potencial es prácticamente nula. Además, se considera que el reservorio de combustible aguas arriba es tan grande comparado con las dimensiones del orificio que la velocidad u_i es considerada despreciable.

$$\frac{\rho_f \cdot u_i^2}{2} + p_{iny} + \rho_f \cdot g \cdot z_i = \frac{\rho_f \cdot u_B^2}{2} + p_b + \rho_f \cdot g \cdot z_b \quad (3)$$

Por tanto, despreciando la diferencia potencial y la velocidad a la entrada, la velocidad a la salida del orificio (u_B) queda expresada como se muestra en la ecuación (4) y por tanto el coeficiente de descarga se puede escribir en función del gasto másico medido (\dot{m}_f), la densidad del fluido (ρ_f), el área geométrica a la salida del orificio (A_o) y la diferencia de presión entre la entrada y la salida ($\Delta p = p_{iny} - p_b$) como se muestra en la ecuación (5).

$$u_B = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_f}} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{\dot{m}_f}{A_o \sqrt{2 \cdot \rho_f \cdot \Delta p}} \quad (5)$$

Finalmente para determinar el C_d se debe medir el gasto másico real (\dot{m}_f) a la salida de los orificios de inyección. Para medir dicho gasto másico, se puede realizar a partir de un equipo comercial denominado tasímetro que permite medir el flujo másico instantáneo (flujo pulsante con aguja) a partir método de

medida Bosch [9] tal como se describe en diferentes estudios [2, 4, 5]. No obstante, la adquisición de dichos equipos son de un costo elevado y otra forma de obtener el gasto másico es medirlo en flujo continuo (sin aguja) a partir de un recipiente a presión que permita controlar las condiciones de presión en el interior, tal como se llevará a cabo a futuro con el diseño mostrado en el presente documento.

Así, el principio de medida para determinar el gasto másico en flujo continuo es el siguiente: se llena por completo el recipiente a presión del mismo combustible a inyectar asegurando que no existen burbujas en el interior. Debido a que todo el recipiente a presión está lleno de combustible, el gasto másico de combustible que sale por los orificios de la tobera es el mismo gasto másico de combustible que sale del recipiente de alta presión [8]. Así, una vez se tiene el gasto másico estabilizado para una determinada condición de operación, es posible determinar el gasto másico tomando una masa inicial (m_1) y una masa final (m_2) en un determinado tiempo (Δt) como se muestra en la ecuación (6) [8].

$$\dot{m}_f = \frac{m_2 - m_1}{\Delta t} \quad (6)$$

Una vez determinado el \dot{m}_f y por tanto el C_d , es posible determinar el comportamiento hidráulico de un inyector en específico al graficar el coeficiente de descarga en función del número de Reynolds, mostrando una zona casi lineal donde el flujo se considera laminar, una zona en donde hay un cambio de tendencia y se considera un flujo en transición y por último cuando el coeficiente de descarga deja de depender del número de Reynolds se considera que el flujo tiene un alto grado de turbulencia [8].

En cuanto a la caracterización de los chorros de inyección en estado no reactivo, el combustible se inyecta en una atmósfera gaseosa (aire ó nitrógeno) y los parámetros macroscópicos más relevantes para evaluar el como se ve afectado el chorro por diferentes variables (presión de inyección, contrapresión, propiedades del fluido) son la penetración y ángulo de apertura del chorro. La penetración de un chorro se define como la distancia entre el orificio de salida de la tobera y el frente del chorro tanto para un inyector Diesel como para un inyector a gasolina. No obstante, en cuanto al ángulo de apertura (cone angle) existen dos diferencias bien marcadas: para el caso del chorro Diesel, el ángulo de apertura es el ángulo formado por uno de los chorros de inyección, mientras que para el inyector a gasolina se refiere al ángulo de apertura al ángulo que forma la cortina de varios chorros como se puede apreciar en la Figura 3.

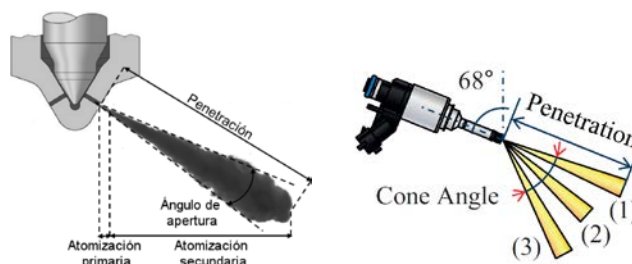


Figura 3. Caracterización macroscópica de un chorro Diesel (izquierda) [10], un chorro a gasolina (derecha) [11]

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de imágenes reales de un chorro Diesel y un chorro gasolina, donde es menos complejo observar el contorno de un solo chorro Diesel con respecto al de gasolina donde se forma una cortina entre diferentes chorros sin lograr diferenciar uno del otro. Evidentemente esto depende también de las particularidades de cada inyector, ya que inyectores con un mayor número de orificios (independiente que sea Diesel o gasolina) resulta más compleja la visualización de chorros independientes.

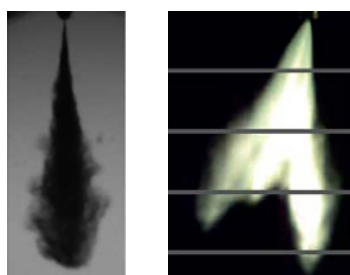


Figura 4. Visualización real de un chorro Diesel (izquierda) [12], un chorro a gasolina (derecha) [11]

2.2 Fundamentos ópticos

Con el fin de lograr determinar la penetración y el ángulo de apertura de un chorro y lograr así caracterizar su morfología, es necesario recurrir a técnicas ópticas que permitan visualizar adecuadamente la imagen del chorro, capturarla y registrarla para su posterior procesamiento de imágenes. Existen diversas técnicas de visualización del chorro en función del estado del chorro ya sea chorro no reactivo, chorro evaporado o chorro reactivo como muestra [13]. Dentro de las técnicas de visualización para el chorro no reactivo que permiten estudiar la geometría del chorro, su penetración líquida y ángulo de apertura se encuentran la iluminación mediante lámina láser [14-16], dispersión de luz blanca [13], iluminación trasera difusa [17-20].

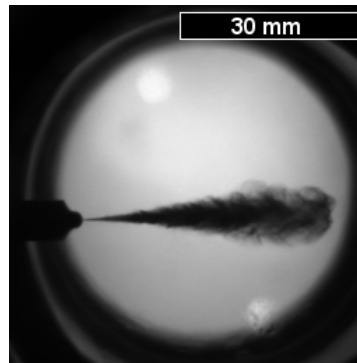


Figura 5. Ejemplo de un chorro visualizado por iluminación trasera [21]

De las anteriores técnicas, una de las más usadas es la iluminación trasera difusa ya que a diferencia de la iluminación láser no requiere de elementos costosos y grandes tiempos de setup y a diferencia de la dispersión de luz blanca, en función del tipo de iluminación seleccionada, se pueden tener imágenes del chorro mucho más definidas. La visualización por iluminación trasera difusa se basa en la diferencia entre el índice de refracción del fluido que se desea visualizar y el fluido que lo rodea. De esta forma, la luz que impacta con el chorro, se desvía como consecuencia de la refracción, mientras que el resto de la luz continúa su camino libremente hasta llegar al sensor de la cámara generando la geometría del chorro [8]. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de imagen adquirida por esta técnica.

Para llegar a obtener la imagen mostrada en la Figura 5, se requieren de diferentes elementos ópticos como lentes, iluminación, cámaras de alta resolución espacial y un sistema de sincronización. Dentro de los tipos de lentes usados frecuentemente se tienen lentes Fresnel que son fabricadas en vidrio o plástico y se pueden configurar de dos maneras: la primera es cuando los rayos de luz que llegan paralelos al eje óptico tienden a concentrarse en un punto o la segunda que los rayos que salen del foco atraviesan la lente y salen paralelos o colimados como se observa en la Figura 6.

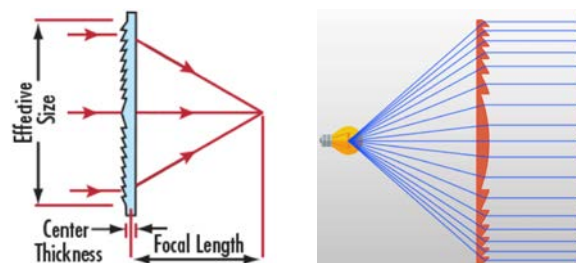


Figura 6. Lente Fresnel. Luz a un foco (izquierda), colimada (derecha)

Otro tipo de lente que habitualmente se usa en este tipo de arreglos ópticos, son lentes de tipo biconvexo, las cuales a diferencia de un objetivo típico de una cámara profesional, permite tener un alto grado de aproximación y magnificación de la imagen. En el caso de una lente delgada, las distancias entre estos elementos se relacionan según la ecuación (7), siendo S_1 la distancia entre el orificio y la lente; S_2 la distancia entre la lente y el sensor de la cámara y f la distancia focal de la lente. Al considerarse una lente delgada, la magnificación M de la imagen es posible determinarla a partir de la ecuación (8), siempre y cuando por el medio en el que viaja la luz sea el mismo (Figura 7). En caso de cambiar el medio o poner

algún elemento que permita el paso de la luz con diferente índice de refracción, será necesario ajustar experimentalmente las distancias S_1 y S_2 para lograr un buen enfoque de la imagen.

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f} \quad (7)$$

$$M = \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

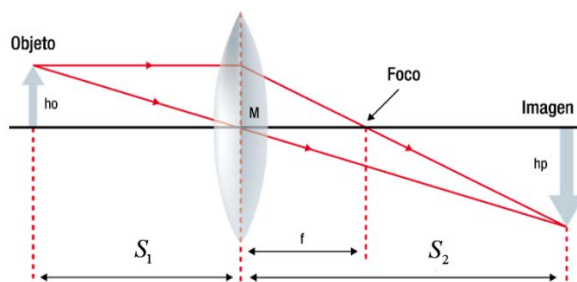


Figura 7. Lente biconvexa

En cuanto a la iluminación, se puede usar un flash de Xenon de luz blanca o un led de corta duración que emite luz de alta intensidad y concentración con una duración muy baja (a partir de 80 ns) que permite congelar por completo la imagen y evitar la distorsión de la misma [8]. Para la adquisición de la imagen, se puede utilizar una cámara de alta resolución espacial (gran cantidad de píxeles) ya sea con un sensor CMOS (Complementary Metal Oxide) o un sensor CCD (Charge Coupled Device). Habitualmente se prefiere un sensor CCD frente a un sensor CMOS para este tipo de aplicaciones, puesto que son mucho mejores en situaciones de poca luz ya que tienen un mayor rango dinámico que es el coeficiente entre la saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no captan señal. Adicionalmente, los CCD en comparación con los sensores CMOS, tienen un menor ruido al contar con un chip externo, una respuesta uniforme y menos propenso a fallos puesto que el sensor CMOS cuenta con píxeles individuales [13].

Por último, se requiere de un sistema de sincronización que permita generar de forma controlada señales lógicas de tipo TTL con diferentes desfases respecto a una señal de referencia (*trigger*). Dichas señales son empleadas en el accionamiento de los dispositivos como inyector, cámara e iluminación con el fin de estar debidamente sincronización para la adquisición de las imágenes como se muestra en la Figura 8.

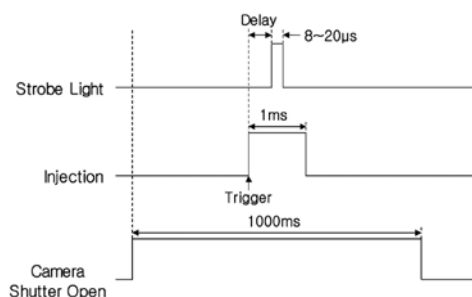


Figura 8. Diagrama de sincronización [22]

2.3 Esfuerzos en recipientes a presión

El diseño de recipientes a presión es un tema tratado en diferentes áreas y por lo cual desde el punto de vista teórico ha sido abordado en numerosas ocasiones. Desde el punto de vista analítico, las ecuaciones de Lamé son las más utilizadas para el diseño de recipientes. Las ecuaciones (9) y (10) de Lamé permiten calcular el esfuerzo tangencial y radial respectivamente de un punto r , en la pared de un cilindro estático de radio exterior (r_o), radio interior (r_i) y con presión interna (p_i), solo aplicables para cilindros de pared continua, es decir, cilindros sin agujeros sobre su superficie. Para evaluar el desempeño del material en el rango elástico, se utilizará la teoría de falla de máxima distorsión, más conocida como el esfuerzo Von Mises (ecuación (11)) calculada a partir de las ecuaciones (9) y (10) [23].

$$\sigma_t = \frac{p_i r_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{Von Mises} = \sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_r)^2 + (\sigma_t)^2]} \quad (11)$$

Cuando se consideran cilindros sometidos a presión interna con geometrías que requieren la presencia de agujeros la metodología más frecuente es utilizar los Factores de Concentración de Esfuerzos SCF. De los estudios experimentales o numéricos, diversos autores han encontrado relaciones entre los valores máximos de esfuerzo tangencial ($\sigma_{t\ max}$) para determinadas condiciones geométricas, y los valores nominales definidos por la ecuación (12). Un ejemplo de los valores SCF para este tipo de geometrías son los valores definidos por [24], y en la Figura 9 se muestra la tendencia de SCF para $r_o/r_i = 1,5$.

$$SCF = \sigma_{t\ max} / \sigma_t \quad (12)$$

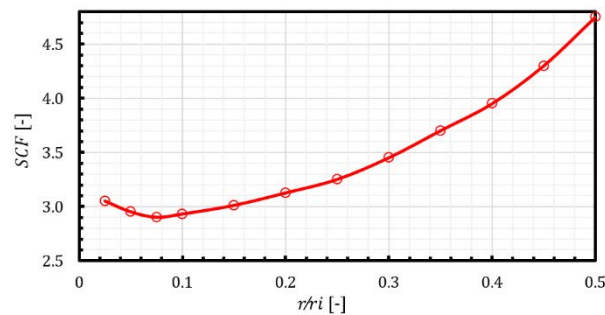


Figura 9. Factor de concentración de Esfuerzos para $r_o/r_i = 1,5$ (adaptada de [24])

2.4 Estado del arte de recipientes de alta presión

Dada la gran importancia del diseño de un recipiente de alta presión con unos accesos ópticos, en esta sección se dan a conocer los diferentes tipos de recipientes a presión existentes en diferentes estudios realizados en chorros de inyección. Una primera división de éstos recipientes se da en función del estado en el que se va a encontrar el chorro en su interior dividiéndose en recipientes a presión con una atmósfera no reactiva [25-28], recipientes evaporativos [29-31] y recipientes a presión con una atmósfera reactiva [14, 32, 33]. Una segunda clasificación, se puede dar en función del tipo de gas usado en el interior, en donde se encuentran recipientes a presión trabajando con aire [8, 31, 34], con nitrógeno (N_2) [35-37] con dióxido de carbono (CO_2) [26] y con hexafluoruro de azufre (SF_6) [21, 38, 39].

De los tipos de recipientes a presión enunciados anteriormente, en esta sección se hará énfasis a los recipientes a presión en estado no reactivo, puesto que el diseño actual está encaminado en diseñar un recipiente a presión con accesos ópticos que permita estudiar la visualización macroscópica del chorro (penetración y ángulo de apertura), micro-visualización en los primeros milímetros, visualización de la cavitación y la caracterización hidráulica. Al operar bajo condiciones no reactivas, la presión al interior del recipiente es elevada pero no se cuenta con resistencias eléctricas o arreglos para incrementar la temperatura al interior del recipiente a presión, como si ocurre en los recipientes en estado reactivo que no serán tratadas en el presente documento. No obstante, el recipiente si debe soportar la presión del gas en el interior que permita simular las condiciones de densidad en la cámara de combustión de un motor real y además debe alojar correctamente el inyector y elementos ópticos como las ventanas.

En las Figuras 10 y 11 se muestran algunos modelos de recipientes operando bajo condiciones no reactivas. En el caso de la Figura 10, se usa como gas en el interior N_2 con el fin de garantizar que no exista ningún tipo de reacción usando incluso como inyección gasolina que es un combustible muy inflamable. En la Figura 11 se usa como gas en el interior del recipiente a presión hexafluoruro de azufre (SF_6), lo cual permite trabajar con unas presiones no tan elevadas ($0,2$ a $0,5$ MPa), puesto que el SF_6 tiene un peso molecular bastante elevado y en condiciones no reactivas el comportamiento del chorro depende básicamente de la densidad del gas; por tanto, se logran valores de densidad elevados sin la necesidad de manejar presiones muy elevadas en el interior, lo cual simplifica el diseño de elementos de sellado.

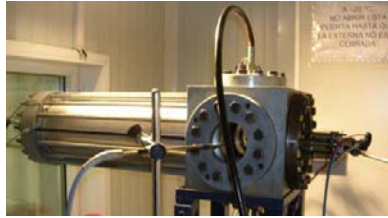


Figura 10. Recipiente a presión usando N_2 como gas en el interior [40]

En la Figura 11 los elementos de sellado son juntas de NBR planas. El hecho de usar juntas planas simplifica el diseño del portaventanas; no obstante, para garantizar una buena estanqueidad es necesario un ajuste uniforme de todo el portaventanas para asegurar que la junta plana se aplasta uniformemente. Por otro lado, aunque este tipo de recipiente a presión es muy sencillo, no permite trabajar a alta presión con gases como el aire para igualar las condiciones de densidad en cámaras de combustión de motores reales.

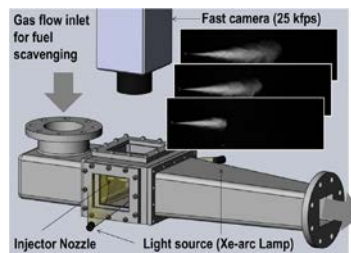


Figura 11. Recipiente a presión usando SF_6 como gas en el interior [41]

Así, una vez se ha mostrado el estado del arte de los diferentes recipientes a presión usados en estudios similares, se busca en el diseño del recipiente a presión del presente documento lo siguiente: garantizar una buena estanqueidad incluso en condiciones de alta presión, para lo cual se hace uso de juntas tóricas tanto en tapas, portainyector y portaventanas. Por otro lado, se busca un cierto tamaño de cilindro que evite el ensuciamiento de ventanas durante la inyección del chorro, una ventana de visualización de por lo menos 80 mm que permita ver la penetración de todo el chorro, que el recipiente diseñado permita estudiar chorros tanto multi-orificio como mono-orificio y por último que tenga un portainyector refrigerado, que permita mantener la superficie del inyector a una temperatura constante en condiciones cercanas a la temperatura real del motor (80°C aproximadamente).

3. MÉTODO

Para el diseño del cilindro a presión se seleccionó una metodología prescriptiva que contiene tres etapas básicas: 1) Definición de requerimientos, 2) Diseño conceptual, y 3) Diseño detallado. En la Figura 12 se muestra el detalle de las principales actividades contenidas en cada etapa. En la definición de requerimientos se abordará en detalle los requisitos del recipiente a presión desde el punto de las tareas y restricciones necesarias para determinar el comportamiento del chorro. El diseño conceptual se abordará aplicando el método de Ulrich de desglose funcional, que, desde la identificación y análisis de los detalles característicos de cada función principal, permite desglosar dichas funciones en subfunciones en diferentes niveles para encontrar soluciones conceptuales a cada una de ellas [42].

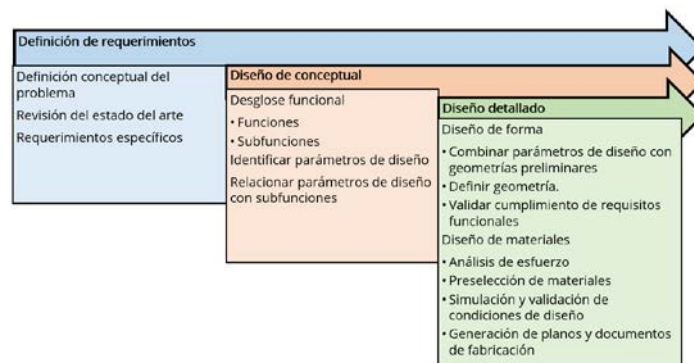


Figura 12. Principales actividades de la metodología

El diseño detallado incluirá generalidades de la definición de parámetros y las herramientas utilizadas para ello, especialmente lo requerido para garantizar la seguridad del dispositivo. Finalmente, en la etapa de fabricación, se presentan en detalle los parámetros de diseño definidos en las etapas posteriores y se define y ejecuta un plan de validación para asegurar el cumplimiento de requisitos del proyecto.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se muestra los principales resultados obtenidos durante el proceso de diseño, los estudios computacionales tanto de esfuerzos en el cilindro como los esfuerzos en las ventanas y por último la selección de los principales componentes ópticos y accesorios para la correcta operación del recipiente de alta presión.

4.1 Diseño conceptual

La metodología propuesta por Ulrich [42], indica que de acuerdo con los requisitos de diseño se deben identificar las funciones principales de objeto de diseño y plantear preguntas relacionadas al cómo lograr que dichas funciones se cumplan. El realizar esto de forma repetitiva resultará en desgloses funcionales (esquema de funciones y subfunciones) que de acuerdo con la experiencia y/o intuición del diseñador podrán conectarse con parámetros de diseño. Analizando la información de requerimientos funcionales para la prueba de inyectores se encontraron cuatro funciones principales:

1. *Suministrar Combustible:* Para generar el chorro se requiere combustible y adaptar el mecanismo típico de generación de chorros que es un inyector, por lo cual se hace necesario adaptarlo.
2. *Adaptar inyectores:* Se espera poder utilizar el recipiente a presión con diferentes tipos de inyectores (geometrías, sistemas de alimentación, tipos de chorros generados) y con diferentes tipos de condiciones del fluido a estudiar, principalmente variaciones discretas de temperatura.
3. *Acondicionar el interior del recipiente a presión:* Para lograr el objetivo del proyecto es importante simular las condiciones no reactivas en el volumen de descarga del inyector, presurizando el volumen de descarga del chorro de forma segura y coleccionar el fluido descargado para la caracterización hidráulica. Por condiciones de seguridad se proyecta una presión de prueba de 17,5 MPa, la cual es una presión 1,7 veces mayor a la nominal.
4. *Visualizar el chorro:* Debido a que la morfología del chorro influye directamente en el proceso de atomización, mezcla y posterior combustión, caracterizar dicha geometría es importante y una de las formas para hacerlo es a partir del análisis de imágenes. El recipiente a presión debe permitir la entrada de luz desde el exterior hasta el chorro y la salida de luz desde el interior hacia el sensor de una cámara de alta resolución espacial para aplicar la técnica de iluminación trasera.

Una vez analizadas las funciones se identificaron subfunciones y, de acuerdo con el estado del arte y la experiencia de los diseñadores, se relacionaron con algunos parámetros de diseño, resultado de esta actividad resulto el desglose funcional mostrado en la Figura 13.

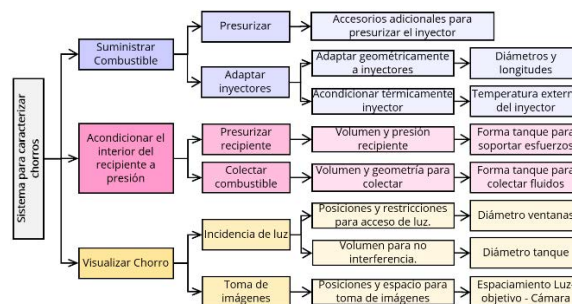


Figura 13. Desglose funcional del sistema para la caracterización de chorros

4.2 Diseño detallado

Esta fase se integran diferentes requerimientos identificados en la fase anterior en dos etapas: diseño de forma y diseño de materiales. En el diseño de forma se integraron los siguientes conceptos:

- *Recipiente a presión circular:* por la facilidad de consecución de material, mecanizado y análisis.
- *Tapa superior:* Se requiere al menos una tapa para acceder al interior.
- *Ventanas alineadas y perpendiculares entre sí.*
- *Ventanas perpendiculares al eje principal del cilindro:* Ventanas transparentes alineadas con la posible proyección de chorro y que permitan el paso de luz a través del cilindro.
- *Ventanas adicionales para inspección:* Usar la geometría de las ventanas perpendiculares y otras para realizar inspección, ajustar tamaño si es necesario.
- *Permitir colectar el fluido del chorro:* Geometría interna que reúna y colecte el fluido.
- *Adaptación del recipiente a inyectoros conocidos y otros:* Portainyector adaptable para instalar diferentes inyectoros.
- *Acondicionamiento térmico del inyector:* Adaptar en la geometría de la ventana del recipiente principal algún dispositivo que permita acondicionar térmicamente el inyector.

En la Figura 14 se puede ver la integración de los conceptos antes definidos. Nótese que se puede evidenciar la inclusión de los diferentes aspectos: tiene tres agujeros laterales que van a ser usados como portaventanas y un agujero en la parte trasera utilizada para la colocación del portainyector. Se incluyen también los agujeros que serán usados para la tornillería, acceso principal superior y conexiones roscadas para las tuberías de presurización, control y recolección de fluidos. Los parámetros geométricos usados en la definición de forma para el diseño se muestran en la Tabla 1. En el diseño de materiales se integraron los pasos: 1) Análisis de esfuerzos a partir de la geometría inicial, y 2) Selección de materiales y componentes.

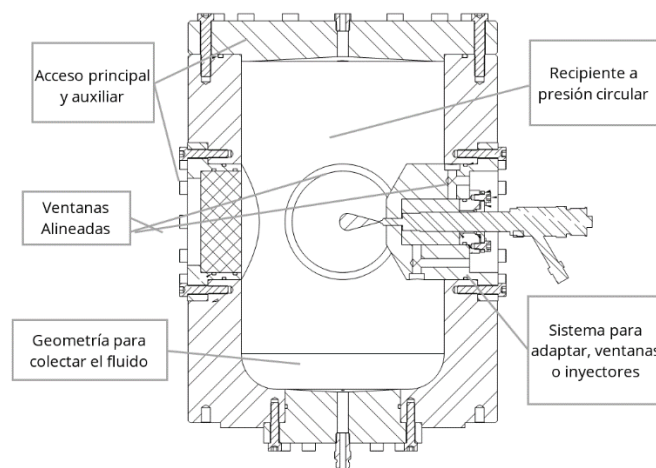


Figura 14. Diseño detallado del recipiente a presión con conceptos integrados

Tabla 1. Parámetros de cálculo para el cilindro

Parámetro	Valor
Presión interna, p_i	17,5 MPa
Radio externo, r_o	152,4 mm
Radio interno, r_i	100 mm
Radio ventanas, r	50 mm

4.3 Estudio de esfuerzos y simulación

Evaluando las ecuaciones (9) y (10) y a partir de los parámetros de la Tabla 1, se obtuvieron los valores teóricos de los esfuerzos tangencial y radial que son $43,96 \text{ MPa}$ y $-17,5 \text{ MPa}$ respectivamente. Aplicando la ecuación (12) y de acuerdo a las geometrías definidas en Tabla 1 se calculan las relaciones geométricas y el *SCF*. Para valores $r_o/r_i = 1,5$ y $r/r_i = 0,5$, el *SCF* es de aproximadamente es de $4,75$ y el esfuerzo tangencial máximo aproximado es de 209 MPa .

Es de particular interés conocer el esfuerzo de Von Mises que soportará la cara interna del cilindro, pues este, es un esfuerzo efectivo que representa la combinación de ambos esfuerzos (radial y tangencial) y que permite la designación de un material preliminarmente. A partir de la ecuación (11) se calcula teóricamente el esfuerzo de Von Mises y se obtiene un esfuerzo de $54,85 \text{ MPa}$.

4.3.1 Consideraciones del estudio computacional

Después de realizar el cálculo analítico de esfuerzos en el recipiente a presión con accesos ópticos, se realiza la simulación lineal elástica, utilizando el programa ANSYS® Workbench, donde se incluyeron en el análisis aspectos geométricos que el modelo analítico no puede tener en cuenta, cómo la superposición de concentradores de esfuerzo.

Varios autores han desarrollado aplicaciones que usan recipientes a presión incluyendo agujeros perpendiculares al eje principal, por ejemplo el uso de dispositivos para el manejo de componentes reactivos [43]. También otros autores [44-46] han desarrollado simulaciones de recipientes con discontinuidades sometidas a diversas condiciones a presión. Dixon [24] realizó un estudio diverso mostrando las posibles variaciones de esfuerzo de acuerdo con cambios geométricos. Masu [47] incluyó un estudio más detallado del comportamiento de los esfuerzos y las variaciones de estos esfuerzos en el espesor de la pared.

Teniendo en cuenta la geometría axisimétrica del cilindro se utiliza una octava parte del volumen mostrada en la parte derecha de la Figura 15, método también usado por otros autores. Este seccionamiento se realizó para poder simplificar el tiempo de la simulación aprovechando las condiciones simétricas de la geometría, aplicando los concentradores de esfuerzo más críticos y las condiciones de frontera [46].

Las condiciones de frontera se aplicaron teniendo en cuenta, las restricciones, las cargas que se van a aplicar en la geometría y el material de la pieza. En este caso, las condiciones de frontera fueron definidas para simular las restricciones del tanque específicamente la presión al interior y las ventanas, la superficie interior de anclaje y la superficies de simetría del modelo. La presión interna de funcionamiento se aplicó teniendo en cuenta el factor de seguridad respecto a la presión nominal de los ensayos utilizando una presión interna de $17,5 \text{ MPa}$. Se utilizó un material AISI-SAE4140 laminado en caliente.

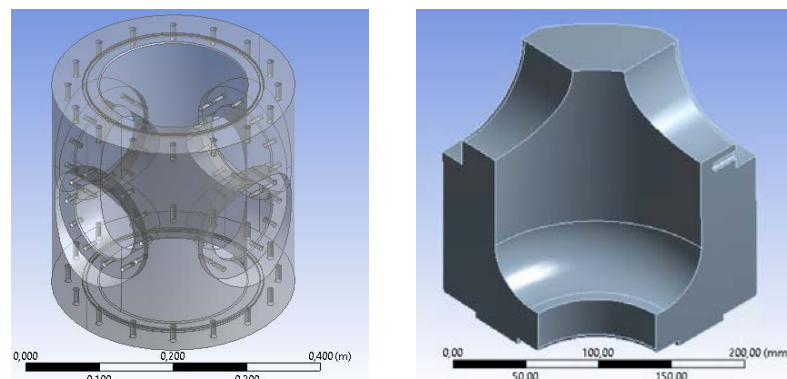


Figura 15. CAD del cilindro (izquierda) y sección utilizada (derecha)

El mallado es una de las partes más importantes de la simulación debido a que dependiendo de la calidad del mallado, se llega a una solución que sea consistente con los resultados, y por otro lado dependiendo de las características de la malla se puede administrar el tiempo de cómputo y los recursos de computación necesarios. En el caso del recipiente a presión, el tiempo de solución únicamente depende de la cantidad de elementos que se generan en el proceso de mallado, por tal motivo adicional al proceso de simulación como tal, se realizó un análisis de convergencia de los resultados obtenidos. Este análisis de convergencia consiste en realizar el proceso de simulación, con las mismas condiciones de frontera y de carga, con diferentes cantidades de elementos hasta el punto en el que las variaciones en los resultados sean menores al 5%. En estudios con cilindros sin agujeros y otros concentradores es usual utilizar elementos hexaédricos de 6 o 12 nodos. Sin embargo debido a la complejidad de los detalles requeridos, es más viable utilizar elementos tetraédricos 3D, isoparamétricos de 10 nodos, tipo Solid 187.

4.3.2 Estudio de convergencia

Para este estudio de simulación se partió de un valor de 6916 elementos generados por la malla. En la Figura 16 izquierda se observa la forma de la división de la geometría inicial, desde la cuál y, luego de diferentes

variaciones de parámetros como tamaño, refinamiento, ángulo de los triángulos y forma de crecimiento del tamaño de los elementos, se garantiza que se tenga una cantidad proporcional de elementos en las diferentes zonas de la geometría, sin importar las diferentes formas geométricas y su escala en comparación con la totalidad de la pieza.

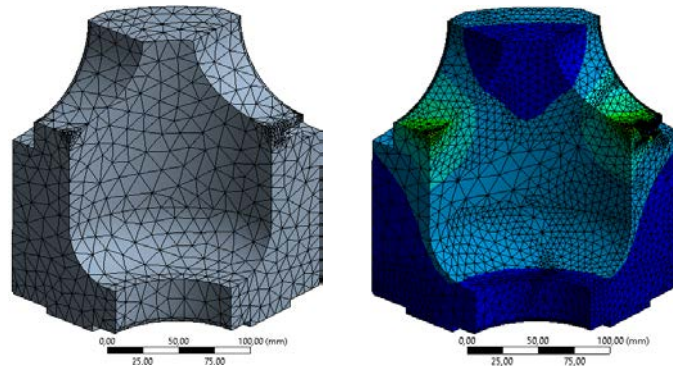


Figura 16. Mallado inicial (izquierda) y mallado final luego de convergencia (derecha)

En la Tabla 2 se observa las diferentes cantidades de elementos simulados y los valores del esfuerzo principal máximo que se obtuvo en la zona de interés. Como se puede observar, solo fueron necesarias cuatro simulaciones para obtener unos resultados en los cuales se presentará una variación menor al 5% entre los resultados, pero se observa que la diferencia en el número de elementos es considerablemente alta, casi de 15 veces el número de elementos iniciales. Se observa que pequeñas variaciones en los parámetros de mallado conllevan a grandes cambios en la cantidad de elementos generados. Luego del análisis de convergencia se obtuvo el mallado final para realizar el análisis de esfuerzo en todo el volumen estudiado que se puede ver en la Figura 16 derecha.

Tabla 2. Resultados del análisis de convergencia

Número de elementos	Esfuerzo principal máximo [MPa]	Error [%]
6916	37,83	-
35789	42,676	12,81
55121	49,104	15,06
103240	47,282	3,71

4.3.3 Esfuerzos y deformaciones

Como se observa en la Figura 17, el esfuerzo de Von Mises para la geometría se presentan en la mayoría de la geometría esfuerzos hasta de 195 MPa , en la ubicación prevista como de máximo esfuerzo. Adicionalmente, se observa la variación de esfuerzos en el espesor de la pared lo que permite inducir que los agujeros para fijación de la ventana, aunque están alejados del punto de máximo esfuerzo, podrían generar aumentos puntuales en el esfuerzo de diseño, en este caso de casi hasta 348 MPa .

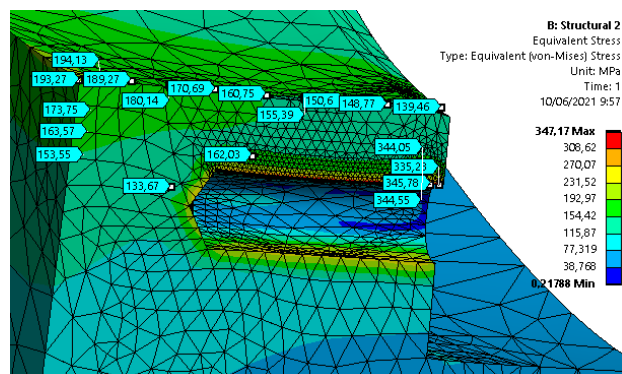


Figura 17. Esfuerzos equivalentes en la sección crítica del recipiente a presión

En la Figura 18, se presenta los resultados de la deformación total, en primera instancia se observa en la sección de intersección de los dos agujeros se presenta la mayor deformación, esto es debido a que en esta

zona se soporta toda la presión de la sección superior de la geometría, pero se presenta mucho menos material, y se observa este comportamiento en general. Las deformaciones máximas son del orden $85 \mu m$, y no en dirección perpendicular a la superficie de sellado de las ventanas, lo cual es un valor aceptable teniendo en cuenta las dimensiones generales del recipiente a presión y que permiten asegurar no generan fugas para los respectivos sellos. Por lo cual se concluye que las dimensiones seleccionadas tentativamente y el material son los adecuados para realizar la fabricación del recipiente a presión.

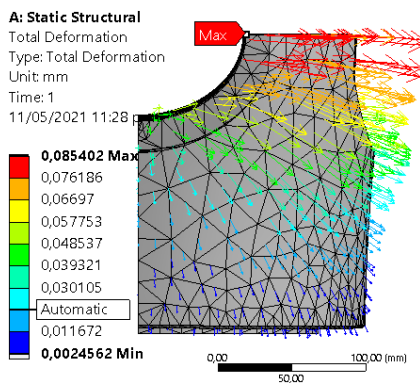


Figura 18. Deformación total en una sección del recipiente a presión

Debido a las condiciones de carga y descarga a las que se prevé esté sometida el recipiente, se realizó un análisis de daño por fatiga. En este análisis se tiene en cuenta que la carga máxima de prueba varíe de un valor igual a cero hasta el valor nominal, generando una carga alternante. Adicionalmente, se utilizó un modelo de análisis de fatiga esfuerzo-vida acorde con el material, en este caso, un acero dúctil con articulación de vida infinita para 10^6 ciclos. Se utilizó el modelo de falla para materiales dúctiles de Goodman, obteniendo la sensibilidad a la fatiga simulada, que indica que para los valores de presión de prueba se tiene una vida mayor a 1×10^6 ciclos. Considerando que la presión de prueba es 1.7 veces mayor que la presión de los ensayos, de la sensibilidad a la fatiga simulada mostrada en la Figura 19 izquierda, es posible proyectar que para ciclos repetitivos de pruebas a presiones de este tipo e incluyendo los concentradores de esfuerzo respectivos, la vida del equipo es mayor a 1×10^6 Ciclos.

Lo anterior se puede evidenciar en el análisis del factor de seguridad en fatiga en la Figura 19 derecha, donde cabe resaltar que si la presión de prueba se aumenta en un 25%, la vida se reduce a un valor cercano a 300.000 ciclos; y con un aumento del 50% de la presión se proyectan valores cercanos a 10.000 ciclos.

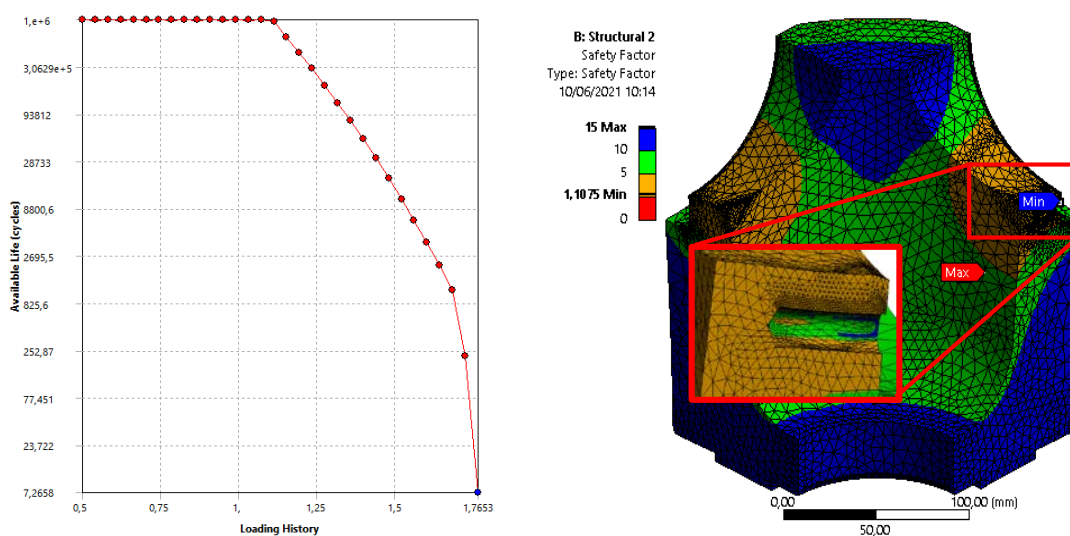


Figura 19. Análisis de Fatiga. Sensibilidad (izquierda) y factor de seguridad (derecha)

4.4 Diseño de ventanas

Después de haber analizado el comportamiento estructural del recipiente a presión, se debe analizar si las ventanas diseñadas son capaces de soportar la presión sin llegar a presentar deformaciones significativas

que genere aberraciones en las imágenes. Para comprobar esto, se utilizó en las simulaciones acero inoxidable AISI 304 para el portaventanas y para la ventana se utilizó un metacrilato con un módulo de elasticidad de $3,1 \text{ GPa}$ y un módulo de Poisson de $0,02$ y una densidad de 1200 kg/m^3 , conforme a la geometría definida en la Figura 20, donde la ventana tiene un diámetro de 100 mm y un espesor de 40 mm . Con los materiales totalmente definidos, se definen las condiciones de frontera y la malla inicial para realizar la simulación. En este caso las condiciones de frontera son una presión interna de $17,5 \text{ MPa}$ en la parte interna de la ventana y definir como soporte fijo la parte externa del portaventanas en la zona donde van ubicados los tornillos de ajuste.

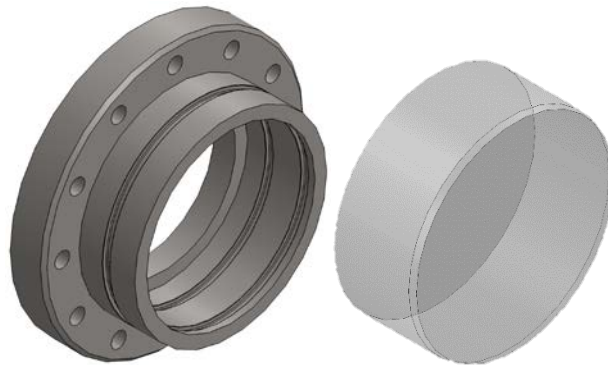


Figura 20. Geometría ventana y portaventana

Los resultados obtenidos para el análisis estructural del conjunto portaventanas y ventana se muestran en la Figura 21. En el lado izquierdo de la Figura 21, se muestra la deformación total, observando que las mayores deformaciones se dan en el área de la ventana, ya que es en esta parte donde se aplica la presión interna en el recipiente a presión. Este resultado es aceptable debido a que la mayor deformación que se presenta es menor a medio milímetro ($340 \mu\text{m}$), trabajando con una presión máxima de operación de $17,5 \text{ MPa}$ mucho mayor a la presión real de trabajo máxima (en torno a 8 MPa).

Por tanto, dicha deformación es despreciable y se puede considerar que no existirá una aberración en las imágenes adquiridas. La parte derecha de la Figura 21, muestra los mayores esfuerzos equivalentes se presentan en la zona de intersección entre la ventana y el portaventanas, posiblemente debido a que las deformaciones de los dos materiales son diferentes y cuando la ventana está sometida a la presión interna se deforma mucho más rápido radialmente apoyándose así sobre el portaventanas.

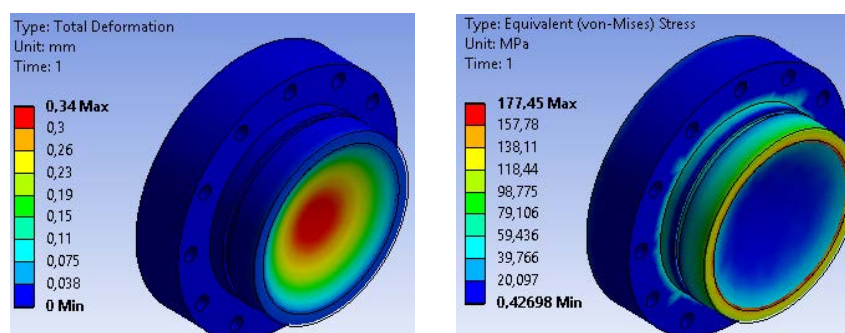


Figura 21. Análisis estructural. Deformación total (izquierda) y esfuerzo equivalente (derecha)

4.5 Selección de componentes ópticos y accesorios

Se describe los componentes ópticos seleccionados y demás accesorios para la correcta operación y caracterización de los chorros de inyección. Cabe aclarar que como técnica de visualización se usará la iluminación trasera, que fue descrita en la sección de fundamentos ópticos:

- *Led de corta duración:* como fuente de iluminación se utilizará un led de alta intensidad y concentración con una duración desde los 80 ns . Dicha duración tan baja, permite congelar por completo la imagen evitando la distorsión de la misma debido a la alta velocidad a la que sale el chorro del orificio de inyección.

- *Lente Fresnel*: justo después del led de corta duración, se ubicará una lente Fresnel, la cual va a tener como misión en este caso tomar luz proveniente del led y concentrarla en la zona de interés (chorro), de tal manera que tenga una buena intensidad de luz y lo más homogénea posible. Para este caso se ha seleccionado una lente Fresnel cuadrada de 5" por cada lado y con una distancia focal de 5" que permitirá concentrar la luz hasta la sección media del recipiente de alta presión.
- *Lente biconvexa*: para lograr imágenes con magnificación, que no es posible solo con objetivos acoplados a las cámaras, se ha decidido seleccionar una lente biconvexa de 50 mm de diámetro, que permite tomar toda la zona de interés del chorro y con una distancia focal efectiva de 150 mm, apta para tomar la luz que deja pasar el chorro desde la zona media del recipiente y formar la sombra del chorro en el sensor de la cámara CCD. Con esta lente se espera alcanzar magnificaciones de 3 veces el tamaño real.
- *Cámara CCD*: para la adquisición de imágenes, se usa una cámara Grasshopper3 con una resolución espacial de 1384x1032 píxeles con un sensor CCD Sony ICX825 con un tamaño de píxel de 6,45µm x 6,45µm, lo que permite obtener en campo cercano (2,5 mm de visualización) relaciones *pixel/mm* elevadas del orden de 500 *pixel/mm*, resultado de distribuir los 2,5 mm visualizados en lo largo de los píxeles de la cámara (1384 píxeles). Adicionalmente, ésta cámara permite ser activada por una señal externa, para ser posteriormente emparejada con la luz del led y lograr congelar la imagen. Aunque la cámara tienen un mínimo tiempo de exposición de 40 µs, lo cual no garantizaría el congelamiento de la imagen, el led de corta duración tienen un rango de activación que va desde los 80 ns, lo cual garantiza que aunque el tiempo de exposición de la cámara sea amplio, los píxeles solo se excitan el tiempo que dura el led, garantizando así el congelamiento de la imagen.

En la Figura 22, se muestra un esquema de la distribución de los elementos ópticos para garantizar la visualización del chorro en el interior del recipiente de alta presión. Adicionalmente, se observa una distancia 3 veces mas grande, entre la cámara CCD y la lente biconvexa, que la de entre la lente biconvexa y el centro del recipiente a presión; lo que garantiza una magnificación de 3 veces la imagen conforme a lo mostrado en la teoría. Para la ubicación y alineación de los elementos ópticos se usan planchas roscadas a ambos lados del recipiente a presión, que permiten facilitar la colocación entre elementos.



Figura 22. Ubicación de los elementos ópticos seleccionados

Por último, con el fin de garantizar el correcto suministro de combustible, se ha diseñado un carrito de inyección, Figura 23, compuesto de una bomba de alta presión movida por un motor eléctrico, un riel de inyección de gran tamaño para evitar oscilaciones de presión a la entrada del inyector, un intercambiador de calor para mantener la temperatura del combustible a temperatura ambiente, un variador de velocidad para cambiar el régimen de giro del motor eléctrico, y por tanto de la bomba, y un cuadro de control con botón de paro de emergencia. Todos estos elementos se han montado en perfiles de aluminio y sobre unas ruedas para garantizar una fácil movilidad.

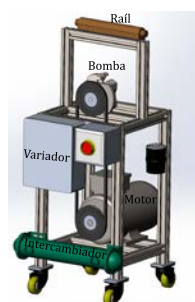


Figura 23. Carrito de inyección para el suministro de combustible

5. CONCLUSIONES

Se aplicó un proceso de diseño prescriptivo para el diseño del recipiente a presión, permitiendo integrar los requisitos de la prueba, las disponibilidades locales de material y las capacidades técnicas del equipo en un diseño del recipiente de alta presión y sus accesorios para caracterizar chorros de inyección.

Realizando validaciones analíticas y numéricas, se determinó la geometría y el material final del recipiente de alta presión de tal forma que se cumplieran los requisitos funcionales. Con la validación numérica, mediante simulación lineal elástica se verificó que los esfuerzos estuvieran en valores menores al límite de fluencia para pruebas estáticas y se encontró coincidencia, en ubicación y valor máximo de esfuerzo, para el concentrador tipo agujero en recipiente a presión cilíndrico entre el cálculo analítico (209 MPa) y el valor simulado (194 MPa).

Debido a la forma y funcionalidades requeridas se encontró cercanía entre geometrías con concentradores de esfuerzo (agujero para ventana con perforación para fijación de ventana) evidenciándose un pico de esfuerzos de hasta 348 MPa . Lo anterior da un valor agregado a la herramienta de simulación numérica desarrollada, validando que este pico de esfuerzo se encuentre en el rango seguro para el material.

Teniendo en cuenta que el recipiente a presión diseñado realizará varios ciclos de prueba, se desarrolló un análisis de fatiga que permitió evidenciar que para las condiciones de prueba (al menos 1,7 veces la presión nominal de ensayo), el recipiente se mantendrá en un rango de vida infinita.

En cuanto a la simulación del conjunto ventana y portaventana, se logró determinar que la deformación de la ventana es de $340 \mu\text{m}$ (a una presión de $17,5 \text{ MPa}$) es muy pequeña y no llega a afectar la trayectoria de la luz y por tanto no van a ocurrir aberraciones (deformaciones) en la generación de la imagen en el sensor de la cámara CCD. Por otro lado, las ventanas y portaventanas ya han sido fabricados y montados en el recipiente a presión, quedando pendiente por determinar a nivel experimental la calidad del acabado superficial de las caras de las ventanas de modo que no afecte el camino de la luz proveniente del led.

Una vez se han realizado los análisis de cada una de las simulaciones, resultó de gran interés determinar y seleccionar cada uno de los componentes ópticos que permitan la debida visualización del chorro, seleccionando así un led de corta duración y alta intensidad, una lente Fresnel, una lente biconvexa y una cámara CCD de alta resolución espacial. Además de la parte óptica se diseñó un portainyector refrigerado que permite mantener la temperatura del inyector constante y cercana a la temperatura real de un inyector real (80°C aproximadamente).

Por último, se logró fabricar un carrito de inyección con la capacidad de suministrar el combustible hacia el inyector en las condiciones adecuadas (presión de inyección), manteniendo constante la temperatura del combustible a la entrada del inyector y permitiendo regular la presión de inyección.

Se espera como trabajos futuros lograr acoplar modelos de toberas transparentes, que permitan visualizar no solo el chorro de inyección sino ver el comportamiento del flujo en el interior del orificio de inyección. Adicionalmente, aunque en el presente trabajo para determinar el coeficiente de descarga se hace solo en flujo continuo, se espera en futuros estudios lograr medir el gasto másico en flujo pulsante (con aguja).

Adicionalmente, desde el punto de vista de simulación, se espera poder realizar mediciones experimentales de esfuerzos con elementos de contacto (strain gage), tanto en paredes internas como externas del recipiente a presión, que permitan realizar una comparación, y si es el caso ajuste, de las estimaciones realizadas desde el modelo numérico y que permitan mejorar la comprensión del efecto de concentradores de esfuerzos en este tipo de equipos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y de la empresa Autotools S.A. por el apoyo durante el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] R. Payri, J. Gimeno, P. Martí-Aldaraví y D. Vaquerizo, «Internal flow characterization on an ECN GDi injector,» *Atomization and Sprays*, vol. 26, p. 889-919, 2016.
- [2] R. Payri, G. Bracho, J. Gimeno y A. Bautista, «Rate of injection modelling for gasoline direct injectors,» *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 424-432, 2018.
- [3] C. Jiang, H. Xu, D. Srivastava, X. Ma, K. Dearn, R. Cracknell y J. Krueger-Venus, «Effect of fuel injector deposit on spray characteristics, gaseous emissions and particulate matter in a gasoline direct injection engine,» *Applied Energy*, vol. 203, pp. 390-402, 2017.
- [4] J. De la Morena, «Estudio de la influencia de las características del flujo interno en toberas sobre el proceso de inyección Diesel en campo próximo,» 2011.
- [5] D. Vaquerizo, «Study on Advanced Spray-Guided Gasoline Direct Injection Systems,» Valencia, 2018.
- [6] T. A. Fox y J. Stark, «Characteristics of miniature short-tube orifice flows,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical*, vol. 203, p. 351-357, 1989.
- [7] K. Lichtarowicz, R. K. Duggins y E. Markland, «Discharge coefficients for incompressible non-cavitating flow through long orifices,» *J. Mech. Engng Sci.*, vol. 7, 1965.
- [8] O. Venegas, «Estudio del fenómeno de la cavitación en la inyección Diesel mediante la visualización del flujo interno en orificios transparentes,» Valenc, 2014.
- [9] W. Bosch, «Fuel rate indicator is a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection,» *SAE Paper 660749*, 1966.
- [10] J. Martínez, «Estudio computacional de la influencia del levantamiento de aguja sobre el flujo interno y el fenómeno de la cavitación en toberas de inyección Diesel,» Valencia, 2013.
- [11] J. Song y S. Park, «Effect of injection strategy on the spray development process in a single-cylinder optical GDi engine,» *Atomization and Sprays*, vol. 25, p. 819-836, 2015.
- [12] J. Gimeno, «Desarrollo y aplicación de la medida de flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel,» 2008.
- [13] L. D. Zapata, «Caracterización de los procesos inyección-combustión Diesel mediante visualización y procesado de imágenes,» Valencia, 2010.
- [14] D. L. Siebers, «Liquid-phase fuel penetration in Diesel sprays,» *SAE Paper 980809*, 1998.
- [15] S.-w. Lee, J. Kusaka y Y. Daisho, «Spray characteristics of alternative fuels in constant volume chamber (comparison of the spray characteristics of LPG, DME and n-dodecane),» *JSAE Review*, vol. 22, pp. 271-276, 2001.
- [16] G. Bruneaux, D. Verhoeven y T. Baritaud, «High Pressure Diesel Spray and Combustion Visualization in a Transparent Model Diesel Engine,» *SAE Transactions*, vol. 108, p. 2122-2136, 1999.
- [17] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno y V. Soare, «Determination of diesel sprays characteristics in real engine in-cylinder air density and pressure conditions,» *Jou. of Mecha. Science and Tech.*, vol. 19, p. 2040-2052, 11, 2005.
- [18] H. Jeong, K. Lee y Ikeda, «Investigation of the spray characteristics for a secondary fuel injection nozzle using a digital image processing method,» *Measurement Science and Technology*, vol. 18, p. 1591, 2007.
- [19] Y. Gao, J. Deng, C. Li, F. Dang, Z. Liao, Z. Wu y L. Li, «Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil,» *Biotechnology Advances*, vol. 27, pp. 616-624, 2009.
- [20] H. Hillamo, T. Sarjoavaara, O. Kaario, V. Vuorinen y M. Larmi, «Diesel spray visualization and shockwaves,» *Atomization And Sprays*, vol. 20 (3), pp. 177-189, 2010.
- [21] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador y V. Soare, «Study of the influence of geometrical and injection parameters on Diesel sprays characteristics in isothermal conditions,» *SAE Paper 2005-01-0913*, 2005.
- [22] S.-J. Lee, S.-D. Oh, S.-J. Jeong y O.-T. Lim, «An Investigation on the Spray Characteristics of DME Common Rail Fuel Injection System with Variation of Ambient Pressure,» *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 20, pp. 90-97, 2012.
- [23] R. Norton, *Diseño de Máquinas*, L. M. Cruz, Ed., Prentice Hall, 2011.
- [24] R. Dixon, D. Peters and J. Keltjens, "Stress concentration factors of cross-bores in thick walled cylinders and square blocks," *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, vol. 436, 1 2002.
- [25] C. Badock, R. Wirth, A. Fath y A. Leipertz, «Investigation of cavitation in real size diesel injection nozzles,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 20, pp. 538-544, 1999.
- [26] E. Delacourt, B. Desmet y B. Besson, «Characterisation of very high pressure Diesel sprays using digital imaging techniques,» *Fuel*, vol. 84, pp. 859-867, 2005.
- [27] R. Payri, J. Gimeno, P. Martí-Aldavi y O. Venegas, «Study of the influence of internal flow on the spray behavior under cavitating conditions using a transparent nozzle,» *ICLASS 2012*, 2012.
- [28] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno y J. De la Morena, «Study of cavitation phenomena based on a technique for visualizing bubbles in a liquid pressurized chamber,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, pp. 768-777, 2009.
- [29] Adam, P. Leick, G. Bittlinger y C. Schulz, «Visualization of the evaporation of a diesel spray using combined Mie and Rayleigh scattering techniques,» *Experiments in Fluids*, vol. 47, pp. 439-449, 2009.

- [30] P. G. Aleiferis, J. Serras-Pereira, A. Augoye, T. J. Davies, R. F. Cracknell y D. Richardson, «Effect of fuel temperature on in-nozzle cavitation and spray formation of liquid hydrocarbons and alcohols from a real-size optical injector for direct-injection spark-ignition engines,» *Interna. Jour. of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, p. 4588–4606, 2010.
- [31] J. D. Naber y D. L. Siebers, «Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of Diesel sprays,» *SAE Paper 960034*, 1996.
- [32] R. Payri, J. M. García-Oliver, M. Bardi y J. Manin, «Fuel temperature influence on diesel sprays in inert and reacting conditions,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 35, pp. 185-195, 2012.
- [33] R. Payri, F. J. Salvador, J. Manin y A. Viera, «Diesel ignition delay and lift-off length through different methodologies using a multi-hole injector,» *Applied Energy*, vol. 162, pp. 541-550, 2016.
- [34] M. Blessing, G. König, C. Krüger, U. Michels y V. Schwarz, «Analysis of flow and cavitation phenomena in Diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation,» *SAE Paper 2003-01-1358*, 2003.
- [35] S. Baik, K. Goney, S. Kang, J. Murphy, J. P. Blanchard y M. L. Corradini, «Development of Micro-Diesel injector nozzles via MEMS technology and initial results for Diesel sprays,» *SAE Paper 1999-01-3645*, 1999.
- [36] V. Bermúdez, R. Payri, F. J. Salvador y A.-H. Plazas, «Study of the influence of nozzle seat type on injection rate and spray behaviour,» *ImechE. Journal of automobile engineering*, Vols. %1 de %2Part D, 219, pp. 677-689, 2005.
- [37] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador y J. Manin, «Influence on Diesel injection characteristics and behavior using biodiesel fuels,» *SAE Paper 2009-01-0851*, 2009.
- [38] L. Araneo, V. Soare, R. Payri y J. Shakal, «Setting up a PDPA system for measurements in a Diesel spray,» de *Journal of Physics: Conference Series*, 2006.
- [39] J. Arrègle, J. V. Pastor y S. Ruiz, «The influence of injection parameters on Diesel spray characteristics,» *SAE Paper 1999-01-0200*, 1999.
- [40] R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno y G. Bracho, «Understanding Diesel injection characteristics in winter conditions,» *SAE Paper 2009-01-0836*, 2009.
- [41] F. Payri, R. Payri, M. Bardi y M. Carreres, «Engine combustion network: Influence of the gas properties on the spray penetration and spreading angle,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 53, pp. 236-243, 2014.
- [42] K. Ulrich y E. Steven, *Diseño y desarrollo de productos*, P. Roig, Ed., McGraw Hill, 2013.
- [43] R.Kharat y V. Kulkarni, «Analysis of stress concentration at opening in pressure vessel analysis of stress concentration at opening in pressure vessel using ANOVA,» *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, p. 261, 7 2014.
- [44] M. Ahmed, R. Khan, S. Badshah y S. Khalil, «Finite Element Investigation of Geometry Effect on Pressure Vessel under Combined Structural and Thermal Loads,» *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 4, pp. 118-124, 12 2014.
- [45] M. J. Hyder y M. Asif, «Optimization of location and size of opening in a pressure vessel cylinder using ANSYS,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, pp. 1-19, 2008.
- [46] M. Shariati, M. Sedighi, J. Saemi y H. Allahbakhsh, «A Numerical and Experimental Study on Buckling of Cylindrical Panels Subjected to Compressive Axial Load,» *Strojniski vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2010.
- [47] L. M. Masu, "Cross bore configuration and size effects on the stress distribution in thick-walled cylinders," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 72, p. 171–176, 1997.

Análisis de generación de grietas superficiales mediante el monitoreo de emisiones infrarrojas en aceros al carbono

Juan Pablo Higueta Gutiérrez¹
Nelson Antonio Vanegas Molina²
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Las fallas por fatiga se clasifican como una de las más comunes por las que los mecanismos se deben reparar. De hecho, dichas fallas se tienen en cuenta desde el mismo diseño de los componentes, cuando se sabe que serán sometidos a cargas cíclicas. De ahí surge la importancia del mantenimiento, bien sea preventivo, predictivo o incluso correctivo. La amalgama de un buen plan integral de mantenimiento y su ejecución es clave para preservar la vida útil de un equipo; es por eso que el diseño de sistemas de predicción de fallas ha cobrado importancia en la industria reciente. Por lo tanto, en este trabajo se propone un sistema de predicción de fallas por fatiga superficial en componentes altamente solicitados. Los estudios concluyen que es posible tomar registro de emisiones de temperaturas de materiales metálicos en el espectro infrarrojo, sin necesidad de intervenir el material, mediante el dispositivo denominado bolómetro. Al captar las emisiones infrarrojas emitidas por un acero al carbono se logra relacionar la temperatura con el esfuerzo y, por ende, con el factor de concentración, que una vez obtenido puede arrojar indicadores del estado de la superficie del componente. Se obtiene un sistema de medición que es capaz de relacionar las propiedades ópticas, térmicas y mecánicas de un material, con el fin de predecir su comportamiento bajo una condición de carga específica.

¹ Ingeniero Mecánico.

Contacto: jphiguitag@unal.edu.co

² Contacto: nvanegas@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Las estrategias de mantenimiento relacionadas con el seguimiento de las fallas de un equipo se encuentran amparadas dentro del mantenimiento predictivo, el cual se encarga de mantener monitoreados los sistemas físicos de un sistema productivo para prever posibles fallas que se puedan generar en un futuro. Lo anterior se hace gracias a la introducción de aparatos de instrumentación, que están midiendo variables de interés para el usuario del equipo en tiempo real.

Los costos de estos medidores son muy elevados si se comparan con el costo de implementar otro tipo de mantenimiento en el equipo, como lo puede ser el preventivo, por ejemplo. Estos costos están directamente relacionados con la alta tecnología que deben tener estos aparatos, así como la energía adicional que consumen y la necesidad de contratar personal capacitado para manipularlo [1].

Es por lo anterior, que se plantea la opción de implementar un método de seguimiento óptico que se le aplique a los elementos con mayores solicitaciones mecánicas, como engranajes o poleas, el cuál brinde señales del estado del componente, captadas mediante la emisión de fotones en zonas donde se puedan generar grietas que se están nucleando en la superficie del material, dentro de una frecuencia del espectro infrarrojo.

El objetivo de este trabajo es examinar la factibilidad de implementar un sistema de medición de la energía emitida por una pieza mecánicamente solicitada, mediante sus emisiones fotoeléctricas dentro del espectro infrarrojo, con el fin de identificar la nucleación y propagación de potenciales grietas superficiales por fatiga.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Óptica de los materiales

Todos los materiales interactúan de alguna manera con la luz [2]. Si fotones que vienen de algún emisor interactúan con los electrones de valencia del material que se desea estudiar, pueden ocurrir varias cosas. Una de ellas es que la luz le entregue energía al material a lo que se le llama absorción. También puede pasar que los fotones que inciden el material le entreguen energía, pero que otros fotones de energía idéntica sean emitidos desde el material, a lo que se le llama reflexión. Además, puede que no haya interacción con la estructura atómica del material, a lo cual se le denomina transmisión, como se representa en la Figura 1.

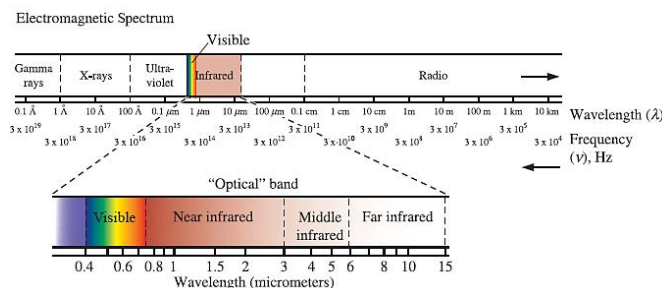


Figura 1. Espectro electromagnético [2]

Cuando un material es calentado, los electrones son excitados térmicamente, llevándolos a altos niveles de energía, lo que promueve que se alejen del núcleo y disminuya la fuerza de enlace con él. Cuando la fuerza de enlace se hace diminuta, el electrón regresa a sus niveles de energía usuales mediante la liberación de fotones, a lo que se le conoce como emisión térmica. Mientras mayor sea la temperatura a la que se sometan los electrones, mayor será la energía con la que se liberen. Los fotones pueden tener longitudes de onda incluidas en el espectro visible, lo que en consecuencia hace que cambien de color.

Cuando un material eleva su energía mediante medios mecánicos, como la fricción, por ejemplo, existe una emisión térmica similar a la que experimenta cuando es irradiado con fotones. Dicha emisión es monitoreable mediante dispositivos de medición termográfica.

3. MÉTODO

3.1 Monitorio infrarrojo en ensayos de fatiga y generación de grietas

De todo el espectro electromagnético, es el espectro infrarrojo el más útil para medir la generación de grietas. Como se menciona ampliamente, el rango de temperatura infrarrojo permite utilizar el control de temperatura en áreas industriales [3]. Entre los dispositivos de medición termográfica se destacan los bolómetros. El uso de micro bolómetros es estudiado para establecer la viabilidad de su uso en análisis de esfuerzos termo elásticos con el fin de estudiar los parámetros de generación de grietas y para monitorear automáticamente el crecimiento de grietas usando medición de temperatura [4]. El bolómetro es un detector térmico infrarrojo, desarrollado por Langley, que emplea un termómetro de resistencia eléctrica para medir la temperatura de la radiación absorbida [5].

Su principio de funcionamiento se basa en la variación de corriente o tensión en un diodo como consecuencia de variaciones en temperaturas. La tensión en el diodo es la variable medida constantemente en el aparato, la cual es comparada con una tensión de referencia. La tensión del diodo se va modificando, dependiendo de la variación de la temperatura originada de la radiación infrarroja absorbida. Las imágenes se forman en la interfaz de acuerdo con el esquema representado en la Figura 2.

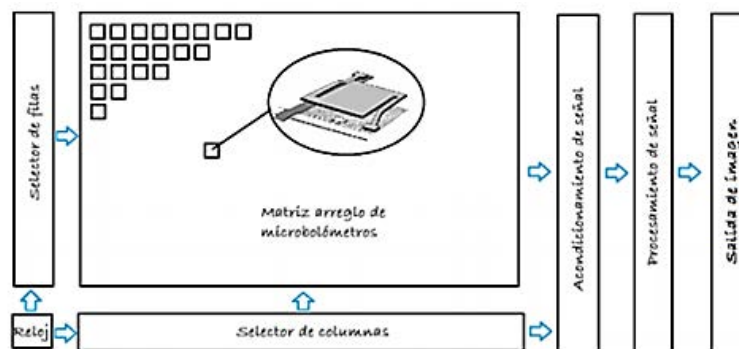


Figura 2. Esquema de formación de imágenes a partir de micro bolómetros [4]

Se tiene un arreglo de micro bolómetros modulares, donde cada uno mide la variación en su resistencia eléctrica de acuerdo con la magnitud de la potencia infrarroja incidente sobre ella; esta medición es interpretada por medio de un circuito de lectura. Para conformar la imagen final se direcciona y se accede a cada micro bolómetro, donde se interpreta cada medición, luego cada señal interpretada se procesa en un conversor análogo digital. Finalmente, la imagen se forma con un microcontrolador, con orden y tiempos de entrada. Evidentemente, con el paso de los años los bolómetros han sido optimizados enormemente ofreciendo aún más opciones de medición.

Thatcher [4] compara el comportamiento de dos tipos de medidor infrarrojo diferenciando el modelo de cámara con el que se predicen respuestas termo elásticas para un acero inoxidable 316 L *Single Edge Notch Tensión* (SENT), respecto al que se le genera una entalla y se la hace crecer. Los resultados son medidos desde el detector de fotones y se observa que los factores de intensidad de esfuerzos son acertados cuando se implementa la medida en tiempo real del crecimiento de grietas desde el micro bolómetro. Una ventaja de esta medida es que no es necesario el contacto físico para la medición. Con este dispositivo se logra medir: 1) crecimiento de grietas, y 2) factores de concentración de esfuerzo.

3.2 Mecánica de la fractura

En un espécimen sujeto a cargas cíclicas, grietas por fatiga se van a nuclear de forma microscópica en los límites de grano del material, lo que conlleva a su crecimiento hasta una escala macroscópica. Entender el mecanismo de falla por fatiga es esencial para considerar condiciones técnicas de plantas industriales, donde sean comunes elementos sometido a cargas cíclicas, y enfocar el mantenimiento en planear estrategias para prevenir dichas fallas. Estas condiciones afectan la vida a la fatiga y crecimiento de una grieta de fatiga; así como calidad superficial del material, esfuerzos residuales e influencia de condiciones

ambientales. La vida a la fatiga se divide en periodo de iniciación de grieta, la cual incluye el crecimiento de micro grietas casi indetectables, y en el periodo de crecimiento de grieta que representa la fase de crecimiento que desencadena la falla del material [6], como se muestra en la Figura 3.

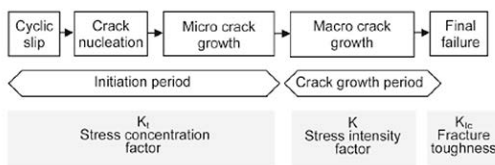


Figura 3. Diferentes fases de la vida a la fatiga y factores relevantes [6]

El estudio en cuestión estará enfocado en el periodo de iniciación de grietas, dado que los métodos de predicción de grietas son diferentes para cada periodo. La iniciación de grietas es consecuencia de deslizamientos cíclicos, lo que implica deformaciones plásticas. Las grietas por fatiga ocurren a amplitudes de esfuerzo bajo cuando el límite de cedencia donde existen dislocaciones no está restringido por material, y por lo tanto se generan superficies libres que llevan a los granos a deformarse al estar rodeados por un ambiente poco uniforme (contacto grano - ambiente). Es así como se da la deformación cíclica, desencadenada por cizallados cíclicos, no uniformes dada la escala de la situación.

En cuanto a la geometría de las grietas, existen grietas en forma de aguja o filiformes y grietas redondas o nodulares. Las grietas filiformes son las más comunes y están relacionadas a fallas por fatiga, mientras que las nodulares son poco comunes y están sujetas a procesos de conformado donde reciben el nombre de poros. Es por esto que la geometría de grieta que se analizará es la grieta filiforme, dado que está sujeta a fallas mecánicas per sé, y además son las más críticas por la facilidad que tienen de propagarse. Los tipos de grieta filiforme que se pueden generar en el material generalmente se nuclean en la dirección perpendicular a la de aplicación de los esfuerzos principales. Esta configuración es conocida como modo I. Lo anterior no implica que no sea posible obtener los modos II o III, como se muestra en la Figura 4.

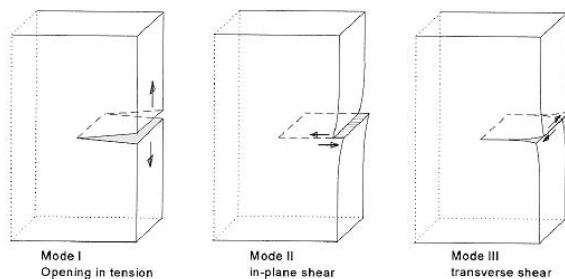


Figura 4. Tres modos de apertura de grieta [6]

Además de la clasificación de grietas anterior también se puede clasificar una grieta según su posición en el elemento; es decir, existen grietas externas y centrales; como las mostradas en la Figura 5.

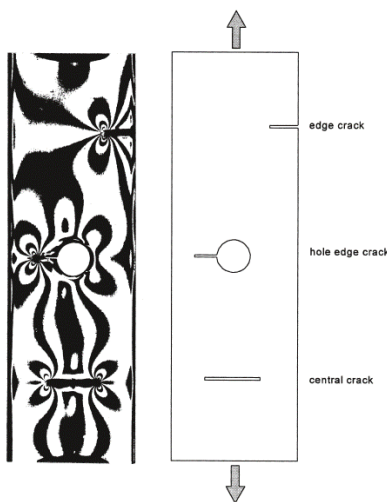
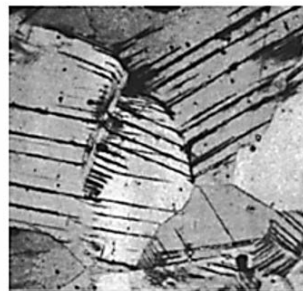
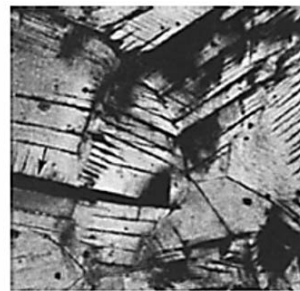


Figura 5. Grietas según su posición [6]

Cuando se generan, las grietas representan nuevas superficies en contacto con el ambiente que originan una capa de óxido que se adhiere al nuevo borde. También se puede dar endurecimiento por deformación en este fenómeno. En el periodo de iniciación de la grieta, la fatiga es un fenómeno superficial del material. Y es por esto por lo que solo se trabajará con grietas externas (Figura 6).



(a) Slip lines are clearly visible



b) Same as in (a) but plastically strained (5%) which opens a microcrack, see arrow

Figura 6. Deslizamientos cíclicos [6]

La intensidad del esfuerzo que sufre la grieta en sus extremos, la cual promueve su propagación, es llamada factor de concentración. En particular el factor de concentración es una expresión lineal que relaciona los esfuerzos a los que se somete el material, con el tamaño de la entalla de la grieta y un factor geométrico que depende el componente o la estructura, según ecuación (1). Para el caso de una grieta externa el factor $\beta=1.1215$ por lo que el factor de concentración sería, según ecuación (2).

$$K = \beta S \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$K = 1.1215 S \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Las grietas por fatiga son el defecto más peligroso de las estructuras metálicas. Los métodos para medir las grietas por fatiga son generalmente inspecciones periódicas. La termografía ultrasónica infrarroja es otro método no destructivo de detección de grietas. En [7] examinan el efecto de la dureza superficial en las grietas por fatiga medidas mediante termografía infrarroja ultrasónica, y observa que hay una íntima relación entre esta variable con la tenacidad del material, que juega un papel fundamental en la generación de grietas. De hecho, el término de tenacidad hace referencia a la energía necesaria para generar una nueva superficie en un material.

En este estudio se utilizaron muestras de acero grado 45 para medir la dureza superficial mediante termografía infrarroja ultrasónica. Los resultados mostraron que mientras más alta es la dureza superficial, más calor se va a generar en cuando se nuclean las grietas, lo cual se corresponde con la definición de la tenacidad. Adicionalmente se desarrolló una simulación por el método de los elementos finitos para medir la fuerza de fricción y así determinar la generación de calor en la superficie examinada. Con esto se encontró que las diferencias en la dureza superficial cambian la fuerza de fricción en la superficie y por ende se afecta la generación de calor.

Dicha generación de calor tiene una alta relación con la temperatura a la que llega la pieza durante la nucleación de la grieta. La forma de relacionar la temperatura con el factor de concentración sería mediante la ecuación (3) de esfuerzos térmicos [8]. Por lo tanto, si se reemplaza la anterior expresión, dentro del factor de concentración, definido en la ecuación (2), se obtiene la ecuación (4).

$$S = E\alpha\Delta T \quad (3)$$

$$K = 1.1215 E\alpha\Delta\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

4. RESULTADOS

Es por lo anterior que detectar grietas por fatiga es un paso importante en el proceso de inspección de la maquinaria de una planta industrial. Las grietas por fatiga detectadas en la inspección deben ser registradas y deben ser un punto importante en los planes de mantenimiento integral de una planta industrial. Cada vez que se actualiza este registro, se debe establecer el objetivo de minimizar tanto los retrasos por mantenimiento correctivo y el costo estimado de inspección [9]. De los tres tipos de mantenimientos, definidos comúnmente como correctivo, preventivo y predictivo, el más interesante y el que engloba totalmente el fin del estudio es el predictivo.

El mantenimiento predictivo no es un sustituto para ningún método de gerencia de mantenimiento [1]. Sin embargo, su adición a un programa de mantenimiento integral en una planta industrial es muy valiosa. Si se tiene que los programas se enfocan en proveer un servicio rutinario de toda la maquinaria y una respuesta rápida a fallas inesperadas que se puedan presentar, el mantenimiento predictivo agenda tareas específicas que son realmente necesarias por el equipo de la planta industrial.

Lo anterior quiere decir que implementar el mantenimiento predictivo no va a reemplazar los otros dos tipos de mantenimiento tradicionales, sino que procura reducir el número de fallas imprevistas y brindar herramientas de planeación más confiables para las tareas de prevención.

Es por eso por lo que Kim [9], proponen una aproximación probabilística para una inspección óptima y plan mantenimiento con actualizaciones basadas en la detección de grietas por fatiga que se rige por el siguiente diagrama de flujo, representado en la Figura 7.

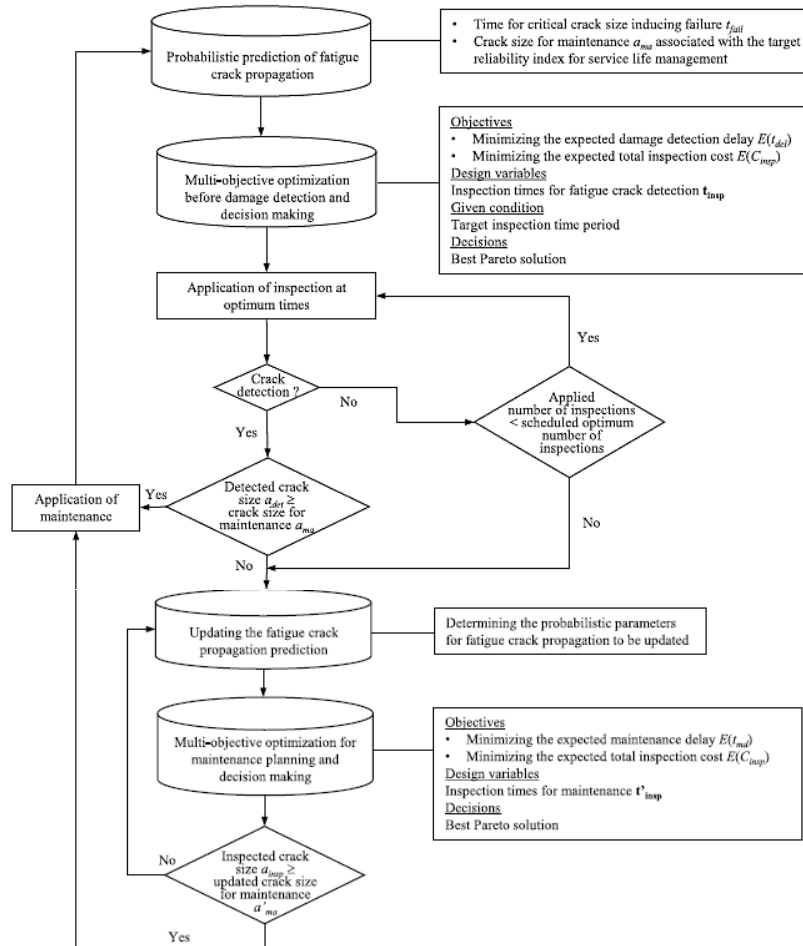


Figura 7. Diagrama de flujo para la optimización y planeación de mantenimiento [9]

Siguiendo el flujograma de la Figura 7 como base del sistema de medición, el cual arroja un registro de temperaturas en tiempo real y localización de las grietas, es posible usar el registro si se relaciona con el factor de concentración de esfuerzos. Esto con el fin de establecer un límite en el factor, que va a clasificar el estado del componente según el valor del factor y, además podrá hacer un estimado de probabilidad de falla con esa información.

Si se considera como ejemplo una caja de reducción con engranajes, donde se tomará un engranaje para ser monitoreado con el sistema para evaluar los probables puntos de falla, el cuál será fabricado en un acero de alta dureza con tratamiento térmico de templado y revenido AISI 4140, sin considerar posibles tratamientos superficiales como cementado. Se puede obtener los datos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Efectos de la temperatura en el factor de concentración y seguridad

Variable	Valor
Esfuerzo Principal (MPa)	1175.47
Coefficiente de expansión térmica (°C)	0.00
Temperatura inicial (°C)	25
Temperatura final (°C)	330
Módulo de elasticidad (MPa)	205000.00
Tamaño de la entalla	5E-07
Esfuerzo de tracción (MPa)	1185.00
Factor de concentración	1.65
Factor de seguridad	1.01

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El esfuerzo principal fue calculado siguiendo la ecuación (3). Los valores para el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad y el esfuerzo a la tracción fueron encontrados en la literatura. La temperatura final fue asignada por iteraciones para obtener un factor de seguridad que ronde el valor de 1. Se sabe que la temperatura final será la medida por el micro bolómetro. El tamaño de la entalla puede rondar los 100 nm y los 500 nm cuando se está creando, por lo tanto, se colocó el valor más crítico que se puede dar.

Como resultado se observa que, para este acero, cuando se llega a medir una temperatura de 330°C en una zona del área superficial del engranaje, se está llegando a un punto crítico donde será muy probable que se genere una grieta. Esto porque se aumenta el riesgo de que el factor sea menor que 1 bien sea porque la temperatura se alza más o por cualquier condición externa.

El anterior ejemplo lleva a concluir que la implementación de un sistema que mida la temperatura de las zonas más altamente solicitadas puede llegar a dar resultados probabilísticos acerca del estado actual del componente sin necesidad de intervenirlo o parar su funcionamiento. Para ello sería necesario de disponer de un espacio cercano al elemento a medir y contar con acceso a él para irradiarlo con luz para su medición. También sería necesario tener controlado el nivel de lubricación del componente dado que una capa de aceite muy densa o gruesa puede distorsionar las mediciones. Esto incluye también la necesidad de contar con filtros que mantengan el lubricante libre de impurezas que intervengan en la medición.

Además, también es importante tener en cuenta que los bolómetros, como cualquier instrumento de medición deben ser calibrados periódicamente. Se sabe que la calibración de un elemento de medición consume bastante tiempo y además influencia significativamente su costo. Actualmente, para asegurar que la imagen que se recibe del medidor es verídica se usan radiómetros integrados en los emisores o cámaras de los bolómetros. Una cámara con radiómetro integrado muestra acertadamente la temperatura real de un cuerpo negro. Esto porque realiza el cálculo de la temperatura final de la señal de salida, desde la medida tomada, hasta su contraste con las propiedades físicas y técnicas del emisor infrarrojo [10]. Por ende, si se adquiere un bolómetro con esta característica, la calibración no representa un problema.

Al final se obtiene un sistema de medición capaz de relacionar las propiedades ópticas, térmicas y mecánicas de un material, con el fin de predecir su comportamiento bajo una condición de carga específica.

Dicha predicción será usada para construir un registro de variables relacionadas con las propiedades anteriormente mencionadas. Este registro será utilizado para dar resultados probabilísticos del comportamiento a fatiga del componente mediante la utilización de ecuaciones, que, aunque muy básicas y fundamentales, logran explicar cómo es el funcionamiento del sistema de medición propuesto. El sistema, de ser implementado puede otorgar a una planta industrial de un medio de predicción interesante y de bajo costo, que comparado con los costos comunes a los que se recurre por mantenimiento correctivo, puede ser viable económicamente.

6. CONCLUSIONES

- Es posible predecir grietas superficiales sujetas a grietas por fatiga si se implementa un sistema de medición infrarrojo que lleve registro de las temperaturas y por ende de los esfuerzos a los que se somete la superficie.
- La implementación del sistema está sujeta únicamente a mecanismos donde sea posible medir fatiga superficial como engranajes, poleas, ejes, seguidores o levas.
- Existe una relación íntima entre las propiedades mecánicas, térmicas y ópticas del material.
- La generación de calor de una grieta es directamente proporcional a la dureza del material.
- La calidad de lubricación se debe mantener a unos niveles de pulcritud y espesor de película óptimos para no interferir con la medida.

REFERENCIAS

- [1] R. K. Mobley. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann of Elsevier Science, 2008.
- [2] D. R. Askeland. *The Science and Engineering of Materials*. Springer-Science+Business media, B.V., First edition, 1996.
- [3] D. A. Blanco-Mora, "Diseño de Circuitos Integrados de Lectura para Micro Bolómetros," M.S. tesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE, Puebla, México, 2013.
- [4] J. E. Thatcher, D. A. Crump, C. Devivier, P.B.S. Bailey and J.M. Dulieu-Barton, "Low cost infrared thermography for automated crack monitoring in fatigue testing," in *Optics and Lasers in Engineering*, N° 126, pp. 1-14, 2020.
- [5] P. L. Richards, "Bolometers for infrared and millimeter waves," in *Journal of Applied Physics*, vol. 76, pp. 1-25, 1994.
- [6] J. Schijve. *Fatigue of Structures and Materials*, Springer, 2009.
- [7] L. Dong *et al.*, "Effects of crack surface roughness on crack heat generation characteristics of ultrasonic infrared thermography," in *Infrared Physics & Technology*. N° 160, pp. 1-7, 2020.
- [8] R. C. Hibbeler. *Mechanics of Materials*. Boston: Prentice Hall, Pearson, 2011.
- [9] S. Kim, B. Ge and D. M. Frangopol; "Effective optimum maintenance planning with updating based on inspection," in *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 58, pp. 1-12, October 2019.
- [10] H. Budzier and G. Gerlach, "Calibration of uncooled thermal infrared cameras," in *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 4, pp. 187-197, June 2015.

Diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis monoplaza serie kart

Daniel Alejandro Portilla Enríquez¹
Nelson Antonio Vanegas Molina²
Germán Leonardo García Monsalve³
Luis Fernando Gil Bedoya⁴
Andrea Lucia Zapata Amaris⁵
Andrés Felipe Castro Gil⁶
Mauricio Arango Corre⁷
Juan Pablo Jiménez Ramírez⁸
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Se propone investigar el diseño de uniones adhesivas poliméricas para integrarlas al ensamble de algunos de los elementos mecánicos de un chasis *go kart*, como alternativa de ensamble de algunas uniones soldadas, las cuales tradicionalmente se utilizan para unir las barras rígidas en este tipo de vehículos monoplaza. Típicamente, en el diseño tradicional la carrocería (chasis o bastidor) se caracteriza como una estructura rígida sometida a cargas y esfuerzos variables, que se concentran en los puntos de unión de los componentes del automotor. En consecuencia, las uniones de estos elementos mecánicos carecen de sistemas de amortiguamiento y de absorción de energía de vibración e impacto, exponiéndolos a ciclos variables de carga o fatiga mecánica. Como alternativa de diseño la tecnología de las uniones adhesivas aplicadas al ensamble y la fabricación de sistemas y partes mecánicas en la industria, la aviación, el transporte terrestre y marítimo reducen el peso en las construcciones y facilitan la unión de materiales disímiles. Sin embargo, es importante predecir y evaluar el comportamiento mecánico de las uniones adhesivas utilizadas en los diferentes sistemas, considerando la influencia de sus principales parámetros geométricos de diseño. En particular, se encontró una distribución más uniforme de los esfuerzos a través de la longitud de traslape de la junta, y una tendencia a mejorar la absorción de energía por deformación plástica cuando incrementa el área de contacto para un rango de valores. Esta situación favorable para la ductilidad de una junta adhesiva al soportar esfuerzos máximos (con altas cargas), posiblemente vislumbre nuevas alternativas de diseño, ensamble y construcción de un prototipo de chasis para monoplazas *go kart*.

¹ Ingeniero Mecánico, estudiante de Maestría en Ingeniería Mecánica.

Contacto: daportillae@unal.edu.co

² Profesor Departamento Ingeniería Mecánica.

Contacto: nvanegas@unal.edu.co

³ Profesor Departamento Ingeniería Mecánica.

Contacto: lgarcia@unal.edu.co

⁴ Investigador Grupo Diseño Mecánico Computacional.

Contacto: lfgil@unal.edu.co

⁵ Estudiante Ingeniería Mecánica.

Contacto: alzapataam@unal.edu.co

⁶ Estudiante Ingeniería Mecánica.

Contacto: afcastrogi@unal.edu.co

⁷ Estudiante Ingeniería Mecánica.

Contacto: maarangoco@unal.edu.co

⁸ Estudiante Ingeniería Mecánica.

Contacto: jupjimenezra@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto desarrollado tiene como finalidad incursionar en un campo poco explorado, pero que es evidente el incremento en aplicaciones de uniones adhesivas para el ensamble de componentes secundarios en el sector automotriz. Todos los resultados obtenidos han servido para dar pie a un proceso de investigación como base para continuar fortaleciendo los conocimientos en el área de uniones adhesivas. Esta vez, mediante el diseño de una junta adhesiva para el ensamble de un prototipo de chasis de la serie *go kart*.

Los vehículos monoplaza de la serie *go kart* son vehículos de competencia de alta velocidad y es importante mencionar que la normativa CIK/FIA ente regulador de estas competencias, no permite el montaje de elementos tipo suspensión en el *go kart*; bien sea de naturaleza elástica o de acoplamiento, al carecer de estos sistemas se puede dar una idea de la naturaleza de cargas presentes en el chasis del vehículo. El diseño tradicional de los chasis utiliza uniones soldadas y se caracteriza como una estructura rígida sometida a cargas y esfuerzos variables que se concentran en los puntos de unión de los componentes del automotor.

En consecuencia, las uniones de dichos elementos mecánicos carecen de sistemas de amortiguamiento y de absorción de energía de vibración e impacto, exponiéndolos a ciclos variables de carga o fatiga mecánicas. Como se trata de un chasis rígido, sin ningún tipo de suspensión, los elementos interconectados soportan esfuerzos de flexión y torsión para permitir el agarre con la superficie de contacto y/o con la pista. En el caso de considerar una menor rigidez del chasis, se debe incrementar la capacidad para soportar esfuerzos de flexión y, por lo tanto, se mejora el agarre a la superficie de contacto. Al contrario, para una mayor rigidez del chasis se disminuye el agarre.

Como alternativa de diseño, la tecnología de las uniones adhesivas puede ser aplicada al ensamble de estas estructuras. Las uniones adhesivas presentan una distribución más uniforme de los esfuerzos, a través de la longitud de traslape de la junta y una tendencia a mejorar la absorción de energía por deformación plástica cuando incrementa el área de contacto para un rango de valores. Características importantes de las cuales se deben aprovechar en la construcción de estos tipos de chasis.

El diseño de la junta adhesiva debe responder a las sollicitaciones mecánicas y para ello se consideró la influencia de sus principales parámetros geométricos de diseño como longitud de traslape, espesor del adhesivo, rugosidad de las superficies a unir, tipos de sustratos. Cabe destacar que, como hipótesis de partida de este estudio, para garantizar una menor rigidez de los chasis tradicionales de un *go kart*, se ha utilizado para el ensamble de los componentes cilíndricos de la unión, un adhesivo comercial de curado anaeróbico, referencia 648 de la marca Loctite.

La propuesta de diseño de uniones adhesivas poliméricas para integrarlas al ensamble de algunos de los elementos mecánicos del prototipo de chasis *go kart*, como alternativa de ensamble de algunas uniones soldadas implicó tres frentes importantes: el primero está la parte de diseño de la unión y proceso de manufactura; la segunda parte abarca todo el proceso de construcción de componentes del prototipo de chasis del vehículo *karty* y la tercera fue determinar un sistema electrónico de medición de datos de la unión adhesiva sometido a cargas de torsión.

En este estudio, el diseño de uniones adhesivas cilíndricas, fue fundamental para el desarrollo de una propuesta metodológica de construcción y ensamble del prototipo de chasis de vehículo monoplaza *go kart*.

El proyecto tiene gran impacto económico ya que se basa en que los sectores de la industria del transporte tanto terrestre, aéreo y marítimo puedan disponer de mejores opciones en la utilización de materiales de fabricación y no tener limitantes en los procesos de ensamble de componentes, con uniones económicas, reduciendo los costos de fabricación de vehículos; además, garantizando así diseños de vehículos ligeros y de bajo consumo energético. Ahorrando los costos en consumo de funcionamiento ya sea combustible fósil o energía eléctrica.

Los resultados obtenidos son de gran aporte ya que son el respaldo técnico-científico en la utilización de las uniones adhesivas para ensambles de chasis, cumpliendo los requerimientos de resistencia mecánica en la construcción y diseño de vehículos ligeros.

El proyecto tiene importante impacto en lo académico ya que se ve reflejado en el interés despertado en la comunidad científica por conocer más acerca de esta nueva tecnología como nueva alternativa de ensamble. Logrando vincular estudiantes de pregrado y posgrado, e investigadores a incursionar en este campo de las uniones adhesivas.

Se puede catalogar este procedimiento de ensamble con uniones adhesivas un proceso innovador, debido a que se está rompiendo la barrera de emplear materiales disimiles para la unión de componentes, con las mismas prestaciones que un método convencional como lo es el proceso de soldadura. Al carecer de poca información científica llama mucho la atención de los investigadores por descubrir nuevas propiedades y mejoras en diseños para la unión de componentes, en este caso los chasis de vehículos ligeros.

2. MARCO CONCEPTUAL

La función de transportar personas por vía terrestre es una de las principales tareas por la que los vehículos son construidos, es además uno de los tipos más usado en el mundo y en Colombia. Es también el modo de transporte más utilizado superando con el 68 % a otros como fluvial 18% o aéreo 14 % [1]. Los vehículos, cada vez se requieren que sean más livianos y versátiles, reduciendo el consumo energético y los impactos ambientales, seguros y que brinden confort para sus usuarios. Todas estas exigencias se proyectan a cambios en el diseño, construcción y ensamble del parque automotor con innovación tecnológica.

Los sistemas de chasis y carrocería en los vehículos actuales en su mayoría son fabricados tradicionalmente en acero al carbono por su alta resistencia a cargas y a la deformación. El método de unión de sus elementos principalmente es dado por procesos de soldadura y mediante elementos de unión mecánicos como tornillos o remaches [2, 3]. De aquí se evidencia dos problemáticas que se presentan alrededor de este tema de unión. En primer lugar, se percibe que dichos métodos de unión tradicionales pueden responder a solicitaciones o condiciones mecánicas de trabajo exigentes, sin omitir posibles inconvenientes que se derivan de estas uniones, tales como tensiones máximas en orificios, distribución no uniforme de tensiones, corrosión galvánica, mayor peso y deformación plástica limitada, entre otros.

Para el caso de la soldadura como método principal de unión donde se debe alcanzar altas temperaturas de fusión, en la mayoría de los casos, se genera una región conocida como Zona Afectada Térmicamente ZAT que modifica la microestructura del material y afecta sus propiedades mecánicas; Becerra y. Figueroa [2] evalúan la disminución de tenacidad en una unión de soldadura. Hoyos [3] busca reducir el impacto de esta zona con una nueva técnica de unión. Estos estudios, evidencian el interés investigativo en entender y contrarrestar el efecto dañino del proceso de soldadura. También se evidencia que el uso de la soldadura es limitado para aplicar en diseños complejos, materiales disimiles y en espesores de baja dimensión [4-6].

Típicamente, en el diseño tradicional, la carrocería (chasis o bastidor) se caracteriza como una estructura rígida sometida a cargas y esfuerzos variables que se concentran en los puntos de unión de los componentes del automotor [7, 8]. En consecuencia, las uniones de dichos elementos mecánicos carecen de sistemas de amortiguamiento y de absorción de energía de vibración e de impacto, exponiéndolos a ciclos variables de carga y/o fatiga mecánica [9].

Lo que hace un claro llamado a implementar estrategias de diseño que den solución a los diferentes tipos de efectos desfavorables en el proceso de uniones soldadas. En la actualidad varios diseñadores y fabricantes automotrices están enfocados en el desarrollo e implementación de soluciones adhesivas en algunos componentes de los vehículos, sin dar paso al uso directamente en los chasis o carrocerías, incluso conociendo las posibles ventajas que tienen estos sistemas de unión polimérica en comparación con las uniones tradicionales.

Como una segunda problemática a destacar, se evidencia el potencial uso de uniones adhesivas y surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Porque no se utiliza de manera generalizada las uniones adhesivas como alternativa de ensamble en un chasis?

Es evidente el incremento que se viene dando al uso de uniones adhesivas en ensamble de partes automotrices en vehículos particulares y de transporte de pasajeros, sin embargo, los ensayos de materiales que se utilizan, carecen de una base técnico-científica alta y se prioriza en los resultados de la experiencia. En este sentido se vislumbra la prioridad en promover el desarrollo de conocimiento científico que soporten el diseño mecánico de múltiples estructuras ensambladas con uniones adhesivas.

3. MÉTODO

En esta etapa se identificaron los nodos de la estructura (chasis del vehículo tipo *go kart*) a utilizar con adhesivos. Mediante el método de análisis por elementos finitos, se estudia el comportamiento mecánico de los elementos de la estructura sometidos a múltiples cargas con el propósito de simular algunas condiciones de operación real del chasis. Según los resultados de algunas investigaciones [10]-[19] se considera que los esfuerzos de flexión y de torsión, son los esfuerzos críticos a los que está expuesta la estructura del chasis. También, se ha logrado identificar que las zonas con mayor solicitud son las zonas cercanas a los puntos de apoyo con el suelo.

Por otro lado, como criterios de diseño de uniones adhesivas, para la selección de los nodos que han de utilizar adhesivos, es importante considerar los esfuerzos presentes en los nodos de la estructura e identificar si estos deben trabajar como rígido o flexible. Para el caso de estudio el modelo CAD del chasis se elaboró en el programa *SolidWorks* y el análisis de los nodos se realizó en el programa *ANSYS Workbench*. Teniendo en cuenta las condiciones y las cargas reportadas por Quezada [14], se obtiene los resultados mostrados en la Figura 1.

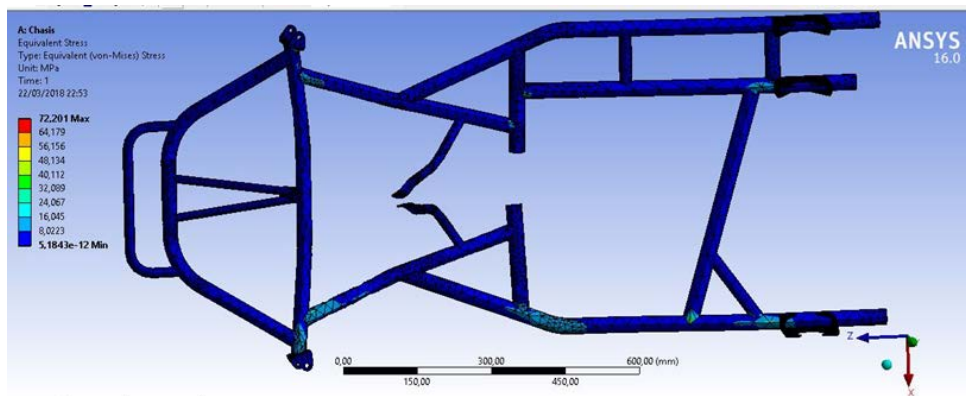


Figura 1. Resultado análisis estático por el método de elementos finitos, para el chasis del *go kart*

Como se esperaba, las zonas de mayor concentración de esfuerzos se obtienen en los puntos cercanos a los ejes del vehículo. En la Figura 1, se reportan los esfuerzos máximos con una magnitud de 72.2 Mpa en la zona delantera. A partir de este estudio de esfuerzos, se seleccionan seis puntos en el chasis para ensamble con adhesivos, distribuidos en las zonas delantera, media y trasera del chasis (Figura 2).

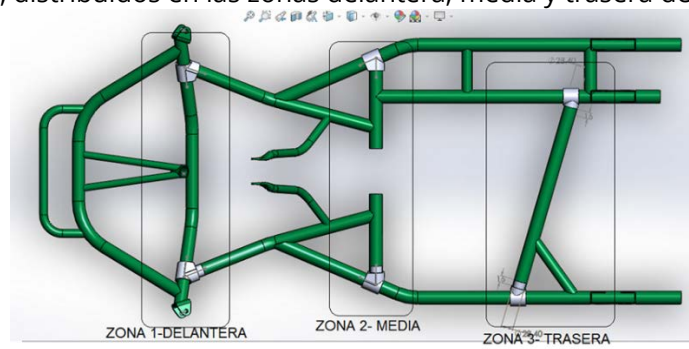


Figura 2. Puntos críticos y zonas del chasis, seleccionado para ser evaluados

3.1 Proceso de manufactura de probetas para ensayo a torsión de la junta adhesiva

La construcción de las probetas se llevó a cabo en el Laboratorio de Procesos de Manufactura, de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Los ensayos a torsión del diseño de junta adhesiva se llevaron a cabo mediante un diseño de experimentos 2k, apoyados de la herramienta *Minitab*, programa diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, mediante el cual se realizó el análisis de varianza ANOVA.

Las probetas en ensamble de tubería-adhesivo-unión (Figura 3). Se fabrican 12 anillos de tubería (sustrato hembra), seis (6) sustratos en acero y seis (6) sustratos en duraluminio; todos con dimensiones a escala, se logró el control de: la rugosidad, longitud de traslape y espesor del adhesivo, según parámetros geométricos encontrados en la literatura.

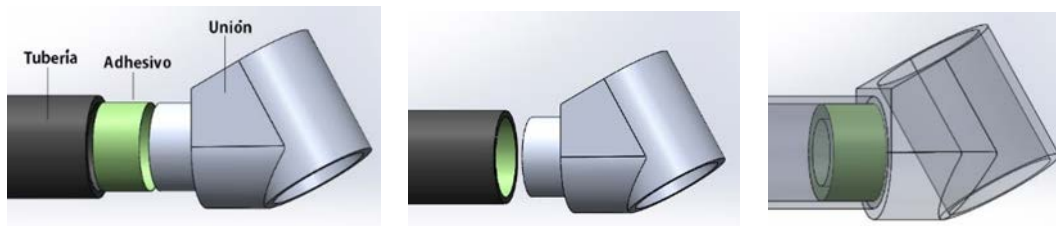


Figura 3. Ensamble de la tubería con adhesivo y el diseño de la unión

La matriz de experimentos para el diseño de factorial 2^2 es:

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
X1: Material sustrato	Acero	Duraluminio
X2: Volumen adhesivo mL	50%	75%

Se obtienen cuatro combinaciones posibles y se establecen tres repeticiones, para un total de 12 pruebas. Con ayuda del *software Minitab* se obtiene de forma aleatoria las posibles combinaciones (orden de combinaciones casilla C1) y el orden de corrida de las pruebas (casilla C2), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Orden y combinación de las probetas, resultados obtenidos mediante el programa *Minitab*

Ítem	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Material	V. Adhesivo
1	6	1	1	1	Duraluminio	50
2	8	2	1	1	Duraluminio	75
3	11	3	1	1	Acero	75
4	5	4	1	1	Acero	50
5	7	5	1	1	Acero	75
6	1	6	1	1	Acero	50
7	4	7	1	1	Duraluminio	75
8	9	8	1	1	Acero	50
9	2	9	1	1	Duraluminio	50
10	3	10	1	1	Acero	75
11	10	11	1	1	Duraluminio	50
12	12	12	1	1	Duraluminio	75

En las Figuras 4 y 5 se muestran evidencias de los procesos de manufactura empleados para avanzar en la investigación y la respectiva construcción del prototipo, así: las probetas de junta adhesiva sustrato macho izquierda-sustrato hembra (tubería acero) derecha (Figura 4) y la matriz de ensamble de probetas (Figura 5). Para el proceso de curado, se toma como guía la propuesta metodológica para la construcción y ensamble de un prototipo de chasis, sección ensamble [20]. De igual manera es necesario fabricar una matriz de ensamble de las probetas, la cual se diseñó y fabricó mediante impresión 3D, esto con el fin de garantizar concentricidad entre los sustratos. Como se puede observar en la Figura 5.



Figura 4. Probetas de junta adhesiva sustrato macho izquierda-sustrato hembra (tubería acero) derecha

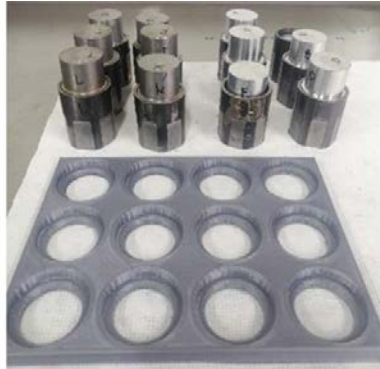


Figura 5. Matriz de ensamble de las probetas y las 12 probetas, previo al proceso de curado

Siguiendo la metodología de ensamble, el proceso de aplicar adhesivo una vez se tenga preparada las superficies se utiliza la ecuación (1) para calcular el volumen de adhesivo según los diámetros de los dos sustratos y garantizar el espesor seleccionado.

$$V_a = \pi[(R_{ex})^2 - (r_{in})^2]L \rightarrow \quad (1)$$

Donde: V_a es el volumen de adhesivo; R_{ex} es el radio externo del anillo de adhesivo; r_{in} es el radio interior del anillo de adhesivo y L es la longitud de traslape, según la Figura 6.

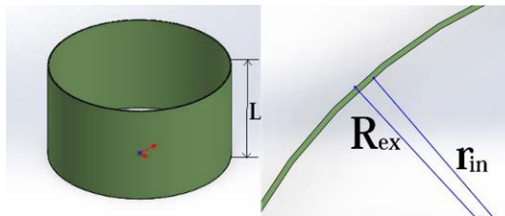


Figura 6. Adhesivo en forma de anillo, conformado entre la tubería y la unión

Para efectos de la investigación y basados en la experiencia en curado de uniones adhesivos, se selecciona como factor el volumen de adhesivo para la unión, y se toma dos niveles: uno al 50% del volumen total y otro al 75% del volumen total. En la Tabla 2, se indica las características de las probetas y los volúmenes determinados para el ensamble.

Tabla 2. Volumen de adhesivo a utilizar en el ensamble de las probetas.

	100%	75%	50%
Volumen de adhesivo (mm^3)	870.1	652.6	435.0
mL	0.87	0.65	0.44
Datos	mm	--	--
Radio externo (R_{ex})	29	--	--
Radio interno (r_{in})	28.7	--	--
Longitud de traslape (L)	16	--	--

El proceso de ensamble (Figura 7) es completamente manual, se aplica el adhesivo sobre las superficies de los sustratos, el proceso de curado requiere garantizar una atmosfera controlada (temperatura y tiempo de exposición). Se recomienda una temperatura de 80°C por una (1) hora, y de 24 horas a temperatura ambiente. Se utilizó un horno eléctrico para este fin.



Figura 7. Proceso de ensamble de las probetas. Se requiere de un espacio limpio, una jeringa para medir y tener control del volumen de adhesivo, es empleado el adhesivo anaeróbico comercial de la referencia Loctite 648

El proceso completo de ensamble y curado de las uniones adhesivas se puede observar en la Figura 8, que comprende las etapas: medir el volumen de adhesivo, adicionar el adhesivo sobre las caras de los sustratos a unir, ensamble de las probetas y proceso de curado de las probetas.



Figura 8. Proceso de curado de las probetas. Se utiliza un horno eléctrico, se controla la temperatura de 80°C por una (1) hora, y luego se deja en reposo por 24 horas a temperatura ambiente

4. RESULTADOS

4.1 Resultados de la prueba a torsión

Datos de la prueba:

- Duración de la prueba: un (1) minuto
- Velocidad: 5 rpm
- Aceleración: 0
- Torque: 40 Nm
- Dirección: Izquierda

En las Figuras 9 a 11 se presentan evidencia de las pruebas de torsión, que comprende el ensayo a torsión del ensamble de junta adhesiva tubería-adhesivo-acero y resultados ensayo a torsión.



Figura 9. Resultados ensayo a torsión. Las probetas se someten a una carga fija 40 Nm a torsión llevando a la falla, y se puede evidenciar que el adhesivo una vez se fractura se convierte en polvillo blanco



Figura 10. Resultados ensayo a torsión. Tenemos los dos sustratos machos del ensamble, se puede evidenciar como el adhesivo presenta mayor adherencia en el sustrato de material acero (derecha) y poca adherencia en el sustrato de material duraluminio (izquierda)



Figura 11. Resultados ensayo a torsión. Los sustratos hembra material tubería estructural acero fue donde el adhesivo cubrió mayor área de adhesión, hay presencia de polvillo debido a que el adhesivo al curarse se solidifica formando un solo solido con los sustratos a unir, y al llevarse a fractura lo que falla es el adhesivo, por eso es considerado a las uniones adhesivas como un fusible mecánico en la estructura

En la Tabla 3, se observa la matriz de diseño experimental con sus resultados.

Tabla 3. Matriz de diseño experimental con sus resultados de resistencia mecánica a una carga torsional para cada una de las 12 pruebas

Ítem	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6	C7
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Material	V. Adhesivo	Resist. (Nm)
1	6	1	1	1	Duraluminio	50	6
2	8	2	1	1	Duraluminio	75	26
3	11	3	1	1	Acero	75	24
4	5	4	1	1	Acero	50	23
5	7	5	1	1	Acero	75	22
6	1	6	1	1	Acero	50	29
7	4	7	1	1	Duraluminio	75	19
8	9	8	1	1	Acero	50	11
9	2	9	1	1	Duraluminio	50	3
10	3	10	1	1	Acero	75	23
11	10	11	1	1	Duraluminio	50	4
12	12	12	1	1	Duraluminio	75	8

Los resultados de este diseño experimental 2k están sintetizadas en una variable de respuesta (resistencias Nm), y muestran alta dispersión entre los dos niveles del factor material. Reportando valores altos máximos de 29 Nm y mínimos de 3 Nm. Como se observa en la Figura 12.

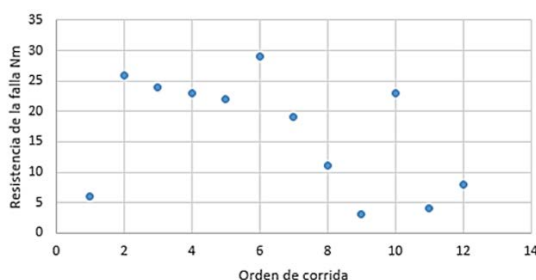


Figura 12. Análisis de dispersión para los datos de resistencia mecánica a torsión a partir del diseño de experimentos factorial 2k

Esta dispersión ocurre en gran medida debido a cada posible combinación de los niveles y parámetros de diseño. Aunque para todos los arreglos se dejó variables fijas la rugosidad y longitud de traslape, existe un alto porcentaje de error en el parámetro espesor del adhesivo debido a que el sustrato *hembra* tubería de acero estructural no presentaba una geometría totalmente concéntrica con el sustrato *macho*.

4.2 Análisis de varianza ANOVA

Mediante el análisis de varianza buscamos determinar que factor es el responsable de la variación significativa en la variable de respuesta (resistencia a la falla por torsión). El p-value es el valor de la probabilidad para cada factor que indica el efecto causado, donde los mínimos valores indican la mínima probabilidad de que el efecto sea aleatorio y por lo tanto se comporta como el factor más significativo. En el análisis ANOVA mostrado en la Tabla 4, donde se puede observar que el factor material presenta significancia estadística dada por el valor de p-value menor al 0.05, es decir el 5%.

Tabla 4. Análisis de varianza, coeficiente y efectos estimados para la resistencia a la falla, donde el factor significativo es el material

Two-way ANOVA: Resistencia NM versus material. Vol. Adhesive						
Source	DF	SS	MS	F	P	--
Material	1	363.000	363.000	8.56	0.019	--
Vol. Adhesive	1	176.333	176.333	4.16	0.076	--
Interaction	1	96.333	96.333	2.27	0.170	--
Error	8	339.333	42.417	--	--	--
Total	11	975.00	--	--	--	--
S=6.513 R-Sq=65, 20% R-Sq (adj)= 52, 15%						
Analysis of variance						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	2	34.667	34.667	17.333	0.165899	0.849664
Vol. Adhesive	1	1.333	1.333	1.333	0.012761	0.912537
Material	1	33.333	33.333	33.333	0.319036	0.585989
Error	9	940.333	940.333	104.481	--	--
Lack-of-Fit	1	0.333	0.333	0.333	0.002837	0.958829
Pure Error	8	940.000	940.000	117.500	--	--
Total	11	975.000	--	--	--	--

4.3 Modelo de regresión del diseño factorial

La Figura 13 muestra la región óptima del proceso y permite optimizar los valores de la variable de respuesta (resistencia). Mientras que la gráfica de contorno divide la superficie de respuesta en curvas de nivel que representa un valor constante para la respuesta del diseño. Como se puede observar en las Figuras 13 y 14, las combinaciones (acero-75% y 50% de volumen) presenta valores que incrementan la resistencia predecible de la junta, siendo el vértice más alto en la combinación acero-75%. Para la gráfica de contorno para la interacción acero-75% de volumen presentan la mayor extensión y los valores más altos de resistencia a la falla por torsión, con un valor máximo de 29 Nm. Aunque la zona también aplica para la combinación al 50% pero en menor área, lo que significa que el acero como sustrato presenta mejor resistencia a la falla por torsión independiente de la cantidad de volumen de adhesivo presente en la junta.

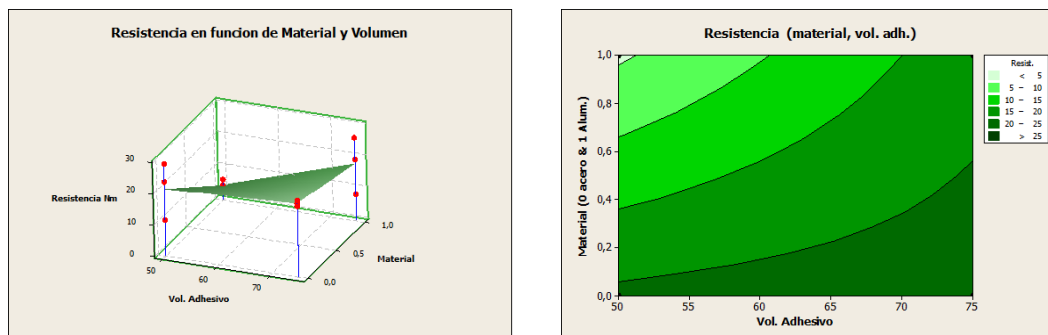


Figura 13. Gráfica de superficie y contorno para las interacciones significativas en cuanto a la resistencia mecánica (material-vol-adhesivo)

Mediante la gráfica de comportamiento, superficie de respuesta (Figura 14), se resalta, que tanto el intervalo de los niveles como el tipo de factores explorados en este proyecto, son base fundamental para continuar en la búsqueda de una región óptima que ofrezca las mejores garantías de diseño.

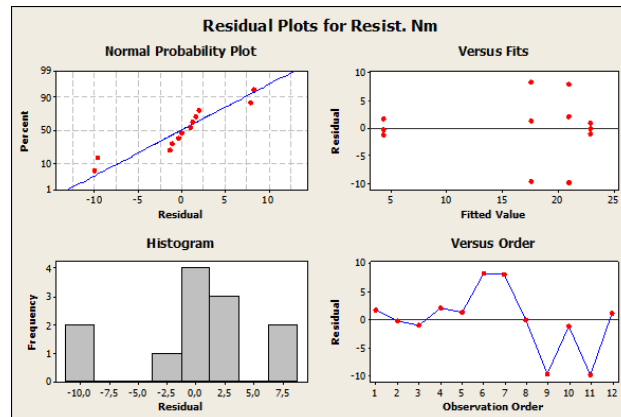


Figura 14. Gráfica de comportamiento de resistencia (Nm), las interacciones significativas en cuanto a la resistencia mecánica (material-vol-adhesivo)

4.4 Proceso de mecanización de uniones adhesivas

En la Figura 15 se observa el proceso de mecanización de las uniones adhesivas, así: bloques de duraluminio (izquierda), programación de la unión para su mecanización en CNC 5 ejes (derecha) y posterior proceso de mecanización de la unión en material duraluminio.

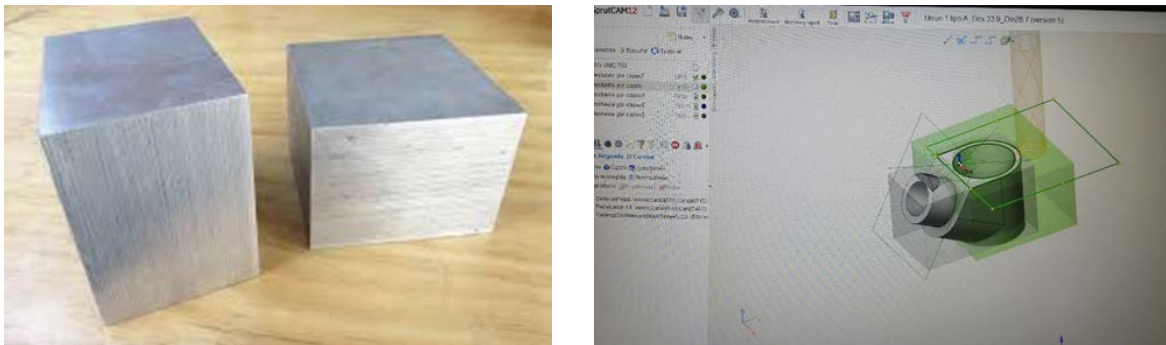


Figura 15. Bloques de duraluminio, material con el cual se fabricó las uniones adhesivas (izquierda). Programación de la unión para su mecanización en CNC 5 ejes. Con ayuda del *software Sprutcam* se programa el código de mecanización y se lleva a cabo la simulación de mecanizado (derecha)

4.5 Ensamblar el prototipo chasis *kart*, mediante soldadura y uniones adhesivas

Para esta etapa se logró ensamblar una versión final del prototipo del chasis *go kart* mediante el proceso de soldadura y uniones adhesivas. Una vez planteado la propuesta metodológica [20], la empleamos como base para ensamblar este chasis con las uniones mecanizadas en duraluminio.

De nuevo se empieza con todo el proceso de construcción y fabricación de cada elemento del chasis, preparación de rugosidad de superficies, preparación de extremos de tubería, proceso de curado, se emplea una matriz de soldadura fabricada con anterioridad.

En las Figuras 16 al 20 se presentan evidencia de la fabricación y del ensamble del prototipo del chasis *go kart*, que comprende las etapas: 1) preparación de extremos de la tubería, corte y doblado de tubería para la fabricación de elementos del prototipo del chasis; 2) construcción de una matriz de soldadura (Figura 16); 3) ensamble de prototipo chasis *go kart* (Figura 17); 4) proceso de curado de las uniones adhesiva integradas al prototipo del chasis *go kart* (Figura 18); 5) proceso de soldadura para el resto de componentes del prototipo de chasis del vehículo monoplaza serie *kart* (Figura 19), y 6) prototipos de chasis *go kart* culminado (Figura 20).



Figura 16. Construcción de una matriz de soldadura. Como base se utiliza madera y los soportes son impresos en 3D con material PLA, tomando como referencia el chasis de un vehículo *kart* comercial

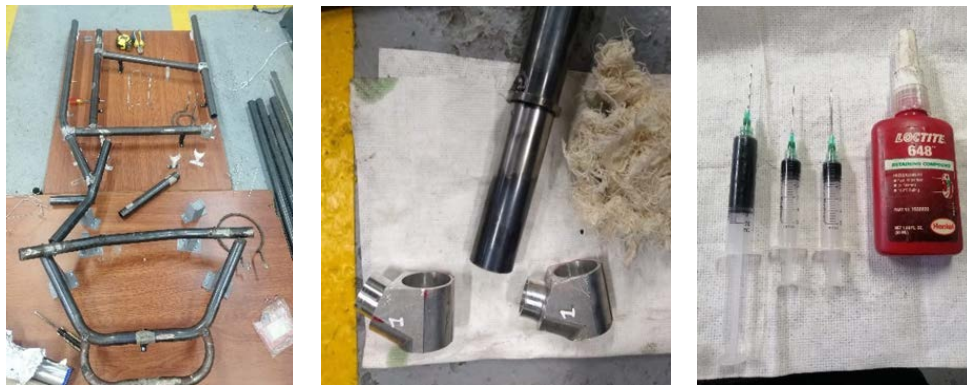


Figura 17. Ensamble de prototipo chasis. Primero se lleva el proceso de unión con adhesivos, y luego las uniones soldadas. Con ayuda de la matriz de soldadura se ubicaron los elementos y las uniones adhesivas



Figura 18. Proceso de curado de las uniones adhesiva integradas al prototipo del chasis *go kart*. Con ayuda de la matriz de soldadura se garantiza posiciones y como fuente de calor para el curado de las uniones se utilizan resistencias eléctricas controlando la temperatura constante de 80°C



Figura 19. Proceso de soldadura para componentes del prototipo de chasis del vehículo monoplaza serie *kart*



Figura 20. Prototipos de chasis *go kart* culminado

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo del diseño de la junta adhesiva implicó una serie de estudios que parten desde la identificación de esfuerzos y los puntos o uniones del chasis donde se encuentran los de mayor resistencia, hasta la fabricación de la unión y todo el proceso de ensamble del prototipo del chasis. Una vez identificado las zonas del chasis de mayor esfuerzo comienza la etapa de diseño de la junta adhesiva, se parte de la información de la literatura, encontrando que los parámetros geométricos recomendados para los diseños de las juntas adhesivas con geometría cilíndrica son los siguientes: longitud de traslape de 16 mm; espesor de la película de adhesivo de 0.15mm; y parámetro de rugosidad superficial de $1.8 \mu m$ - $2.6 \mu m$. El diseño de la junta adhesiva se complementa con ayuda de la herramienta *software* de diseño *SolidWorks*, la cual permite un modelado mecánico en 3D de piezas y conjuntos. Esta herramienta permite evaluar prototipos de diseño antes de su fabricación final, identificar y/o corregir posibles fallas y sus causas.

Para garantizar que el diseño de la unión cumpla con las sollicitaciones mecánicas a la cual estará sometida, se realizó ensayos destructivos, considerando todos los parámetros geométricos con los cuales fue diseñada la unión. Además, se consideró evaluar si los parámetros como tipo de material de la unión y cantidad de volumen utilizado para la junta adhesiva tienen algún efecto significativo en la resistencia mecánica de la junta. Debido a que en la literatura no se encontró información relevante para el diseño de la junta adhesiva, con respecto a estos dos parámetros; aunque la mayoría de investigaciones para el parámetro de material se toma como referencia el acero, pero no en el material duraluminio (material seleccionado y empleado para las distintas uniones, en este trabajo).

La construcción de las probetas para los ensayos a torsión tiene la forma de ensamble tubería (acero) - adhesivo-unión. Se fabrican anillos de tubería, se tiene control de: la rugosidad, longitud de traslape y espesor del adhesivo, según parámetros geométricos encontrados en la literatura.

Los ensayos a torsión del diseño de junta adhesiva se llevaron a cabo mediante un diseño de experimentos 2k, apoyados de la herramienta *Minitab*, programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, mediante el cual se realizó el análisis de varianza ANOVA.

El objetivo del diseño de experimentos es medir cómo influyen los factores: material y volumen de adhesivo, en la resistencia mecánica de la unión adhesiva y descubrir si interaccionan entre ellos. Este diseño permite explorar una zona escogida y encontrar la combinación de mayor resistencia a torsión. Utilizamos un diseño factorial 2^2 ; para estudiar cómo el tipo de material de los sustratos y la cantidad de volumen de adhesivo, afectan la resistencia mecánica de la unión adhesiva. El ensayo permitió introducir los conceptos de fuerzas de adhesión y cohesión, energía libre de superficie.

La parte de manufactura del resto de componentes del prototipo de chasis, consiste en fabricar los componentes (elementos primarios, dirección, soportes de motor, de tracción, entre otros), una vez seleccionada la tubería, y con ayuda de los planos de diseño para la manufactura se verifica que cada elemento sea construido de acuerdo con las dimensiones de los planos. El paso más importante es preparar

los extremos de la tubería que se van a unir, tanto con el proceso de soldadura como con el adhesivo. Los nodos del chasis que se unen con el proceso de soldadura, deben considerar la geometría en los extremos, correspondiente a un corte de la tubería en forma angular, para que se acople de manera suave a la superficie del tubo. Para esto se usaron plantillas obtenidas mediante *software* CAD y manualmente se mecaniza hasta obtener el extremo deseado. En el proceso de curado se realizaron primero las uniones adhesivas y luego las juntas soldadas. Debido a la configuración compleja del chasis y a la ubicación de los puntos con unión adhesiva.

Para esta etapa se logró ensamblar una última versión de chasis mediante el proceso de soldadura y uniones adhesivas. Una vez realizada la propuesta metodológica [20] empleamos esta como base para ensamblar este chasis con las uniones mecanizadas en duraluminio.

Para el desarrollo de esta metodología, fue necesario construir dos primeras versiones de chasis, en la cual a modo de experimentación se logró identificar una serie de etapas de construcción y recomendaciones importantes para la construcción de chasis de vehículos livianos, con uniones adhesivas como alternativa de ensamble.

6. CONCLUSIONES

El proceso de curado del ensamble del chasis con las uniones adhesivas, es la parte más crítica para garantizar que el chasis responda a las sollicitaciones de cargas. Se recomienda que el curado se realice en un horno de curado, con la capacidad de que de todo el chasis este bajo la misma temperatura de curado y verificar que todos los componentes estén en su posición correspondiente (concentricidad entre los sustratos). Además, implementar un mecanismo de sellado para evitar que el adhesivo se derrame por efectos de la gravedad. Podemos decir que este fue el factor principal que se presentó en el momento de curar el chasis del *go kart*, debido a que el adhesivo se derramó por su baja viscosidad; y el efecto de este fenómeno, es que en toda la zona de la junta no se puede garantizar el mismo espesor de adhesivo.

Es de vital importancia emplear una matriz en el proceso de soldadura, como herramienta de diseño, construcción y ensamble del chasis de un monoplaza *go kart*, con el fin de garantizar que todos los componentes del chasis estén ubicados correctamente según los planos y además evitar desplazamientos en el momento de curar las uniones adhesivas.

Del diseño de experimentos factorial 2k con k=2, se determina el análisis ANOVA y muestra que el factor material, presenta significancia estadística dada por el valor de p-value menor al 0.05 es decir el 5%, siendo este el principal parámetro que afecta la resistencia a la falla por torsión en este tipo de ensamble.

Mediante la gráfica de superficie de respuesta, se resalta, que tanto el intervalo de los niveles como el tipo de factores explorados en este proyecto, son base fundamental para continuar en la búsqueda de una región óptima que ofrezca las mejores garantías de diseño.

REFERENCIAS

- [1] M. P. Groover. *Fundamentos de la Manufactura Moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A., 1997.
- [2] G. Becerra y L. C. Figueroa, "Evaluación de la zona térmicamente afectada (ZAT) de un acero 2 1/4 CR-1Mo en estado normalizado - revenido y envejecido artificialmente," *Trabajo de grado*, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2012.
- [3] E. Hoyos, "Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA6NM," *M.S. tesis*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2009.
- [4] Carrocería y pintura, "Ensamblaje de carrocerías: la soldadura sigue siendo el tipo de union más utilizado," Diciembre 2015. Recuperado: http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R66_A2.pdf
- [5] R. García. "Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales," *Trabajo de grado*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, España, 2013.

- [6] Manual Mecánica Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, "Chasis Bastidor Carrocería," Mayo 2021. Recuperado: <https://dl-manual.com/doc/manual-mecanica-automotriz-chasis-bastidor-carroceria-nv5rgkd6xyz1>
- [7] M. Bin-Kamarudin, "Design and fabrication of go-kart chassis," *Trabajo de grado*, Universiti Malaysia Pahang, 2012.
- [8] R. Budynas y J. Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGra-Hill/Interamericana Editores, S.A., 2008.
- [9] J. Conesa. "Evaluación mecánica de uniones adhesivas de materiales compuestos en la construcción naval," *Trabajo de grado*, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2003.
- [10] F. Taheri and R. Hosseinzadeh. "Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints," in *Composite Structures*, volume 91, pp. 186-195, November 2009.
- [11] G. García, "Influencia del acabado superficial sobre la resistencia de juntas adhesivas para fijación de elementos cilíndricos," *M.S. tesis*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2006.
- [12] L. Gil, "Influencia de parámetros geométricos sobre el comportamiento mecánico de juntas adhesivas anaeróbicas sometidas a ensayos destructivos de torsión pura," *M.S. tesis*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2015.
- [13] L. Gil y G. García, "Influencia de parámetros geométricos sobre el comportamiento mecánico de una unión adhesiva cilíndrica anaeróbica de tipo anillo de rodamiento/eje sometida a ensayos de torsión pura verificada mediante simulación numérica (FEM)," Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2015.
- [14] P. Quezada, "Diseño y fabricación del chasis para un kart KF según la norma CIK/FIA," *Trabajo de grado*, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [15] CIK/FIA, "Règlement Technique de Karting," Paris, Francia. Mayo 2018. [Online]. Available: <http://www.cikfia.com/regulations/technical.html>
- [16] Loctite 648, "Hoja de datos técnicos," Junio 2013. Recuperado: http://www.edifik.com.co/wp-content/uploads/2015/08/1835920_ficha.pdf
- [17] R. Anadón y D. Pabón, "Diseño de un kart de pista," Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.
- [18] C. Méndez, C. Álvarez, Y. Brito, J. Moya y E. Chagoyén, "Comportamiento estático y modal del chasis de un ómnibus modernizado," in *Revista Ingeniería Mecánica*, volumen 16, No. 2, pp. 161-170, mayo-agosto 2013.
- [19] J. Parra y R. Ríos, "Estudio del comportamiento bajo carga de un chasis para transporte de pasajeros por medio de la tecnología de elementos finitos en la Empresa Equitel Cumandes S.A.," in *Avances Investigación en Ingeniería*, No. 6, pp. 103-109, 2006.
- [20] D. Portilla, L. Gil, M. Arango, J. Jiménez, N. Vanegas y G. García, "Propuesta metodológica para la construcción y ensamble de un prototipo de chasis go kart bajo la norma CIK/FIA utilizando uniones híbridas," in *Revista Colombiana de Materiales 2020. Edición Especial, Memorias X Congreso Internacional de Materiales*, No. 15, pp. 127-135, mayo 2020.

Proceso de trefilado de alambres de acero: Una revisión de la literatura y caracterización del proceso en Colombia

Nicolás D. Navarro L.¹

Daniel S. Cely F.²

Javier A. Urbano T.³

David L. Blanco E.⁴

Miguel F. Montoya V.⁵

Camilo Hernández A.⁶

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

El proceso de trefilado de aceros es uno de los principales métodos de transformación industrial de aceros en el mundo y en Colombia. Este proceso de transformación en frío consiste en reducir el área transversal de alambres de acero mediante su estiramiento a través de una o varias hileras o dados. Este proceso permite la manufactura de diferentes productos, tales como elementos para conducción eléctrica, alambres para refuerzo de estructuras, malla electrosoldada, grafil para refuerzo de concreto, figurado de alambre, productos para el agro y elementos de fijación, entre otros. A pesar del amplio uso del trefilado en la industria acerera en Colombia, el proceso se realiza bajo condiciones tecnológicas poco competitivas, en comparación con industrias líderes en el mundo y la región. En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica y una caracterización del proceso de trefilado de acero en Colombia. Se revisa los principales parámetros geométricos y de operación, productos, equipos e insumos que intervienen en el proceso. Finalmente, se presenta una exploración de los principales métodos de simulación computacional del proceso, como herramienta fundamental para el entendimiento y validación del proceso de trefilado. Este trabajo tiene como fin establecer los elementos básicos necesarios para estimular la investigación y el desarrollo tecnológico de este proceso básico en la transformación volumétrica de aceros en Colombia.

¹ Contacto: nicolas.navarro-l@mail.escuelaing.edu.co

² Contacto: daniel.cely-f@mail.escuelaing.edu.co

³ Contacto: javier.urbano@escuelaing.edu.co

⁴ Contacto: david.blanco@escuelaing.edu.co

⁵ Contacto: miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

⁶ Contacto: camilo.hernandez@escuelaing.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el acero se ha destacado por sus diferentes aplicaciones convirtiéndose en uno de los recursos industriales más importantes. Tanto así, que muchos sectores industriales han generado una relación muy estrecha elaborando indicadores económicos a partir de los movimientos de la oferta y la demanda para evaluar estadísticamente el nivel de desarrollo de un país. Según la Asociación Latinoamérica del Acero ALACERO [1], en su informe anual de cifras dedicadas a Latinoamérica, se presenta una tendencia preocupante en la región en donde los estados que la componen, a pesar de tener gran potencial, están consumiendo mucho más acero de lo que pueden producir. Esto obliga a los países a realizar grandes importaciones para cumplir con sus necesidades; situación que puede llegar a empeorar debido a las circunstancias presentadas por la pandemia de la Covid-19, además de otro tipo de problemas internos de naturaleza político y social que se vienen presentando con mayor frecuencia en la última década.

Por otra parte, en Latinoamérica los procesos de transformación volumétrica de aceros son técnicas poco exploradas tecnológicamente. La falta de control de variables operativas, la baja inspección de calidad de materias primas, el escaso análisis fenomenológico de deformación plástica que sufre el material, entre muchas otras deficiencias, hacen que la industria acerera pierda competitividad con otros países industrializados.

Así mismo, en Colombia se exhibe una gran brecha tecnológica en las empresas transformadoras de acero [2]. Argumentos culturales, escaso interés en el desarrollo de productos e investigación, bajo apoyo gubernamental, limitaciones de inversión económica, entre otros factores, provocan que muchas empresas nacionales sigan utilizando tecnologías de transformación de acero no actualizadas y no controladas tecnológicamente. Estas condiciones hacen que, a pesar de que la industria acerera ha presentado un constante crecimiento económico en Colombia durante las últimas décadas, su competitividad con respecto a productores chinos, estadounidenses, brasileños o mexicanos, entre otros, esté decayendo constantemente derivado del desconocimiento y la falta de control de variables operativas y de diseño.

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica y una caracterización tecnológica en Colombia del proceso de trefilado industrial como principal proceso del sector transformador de aceros en Colombia. El trabajo tiene como objetivo explorar de manera general el sector del trefilado de acero, revisando los diferentes aspectos relacionados con la fabricación, variables operativas, variables diseño y su influencia en el aspecto económico. Adicionalmente, se presentan algunos atributos generales del estado del sector trefilador en Colombia. Al final del capítulo se realiza una exploración de los métodos de simulación computacional del proceso, entendido como una herramienta fundamental para observar y entender los fenómenos que se presentan en el proceso y ayudan a la mejora y avance tecnológico del trefilado. Mediante esta revisión bibliográfica, se pretende resaltar los diferentes parámetros, que se deben tener en cuenta para estimular la investigación y el desarrollo tecnológico de este importante sector productivo en Colombia.

2. MARCO CONCEPTUAL

El trefilado es uno de los procesos industriales de transformación volumétrica del acero más importantes, en especial por la gran cantidad de aplicaciones que tiene el alambre producto del proceso, desde elementos para conducción eléctrica, refuerzo de estructuras (malla electrosoldada, grafil para refuerzo de concreto, figurado de alambre, etc.), productos para el agro, elementos de fijación (como puntillas), entre otros. Este proceso de transformación en frío consiste en el halado del material de trabajo a través de una o varias hileras o matrices que, bajo ciertas condiciones operativas, determina la geometría y las propiedades del metal que se esté procesando (físicas, mecánicas, eléctricas, térmicas, etc.) [3, 4]. Partiendo de lo anterior, existen una serie de parámetros que caracterizan el proceso, entre los que se destacan:

- Parámetros geométricos: porcentaje de reducción del área ($\%r$), elongación, parámetro delta (Δ), ángulo de trabajo del dado (α) y la longitud de contacto en hilera.
- Parámetros de proceso: Velocidad, Esfuerzo y/o Fuerza total de trefilado.

2.1 Parámetros geométricos

El factor geométrico es uno de los más significativos en el proceso de trefilado y consiste en la definición de la forma de la trefila, dado o matriz. La geometría de la trefila presenta una influencia directa en la operación y en el rendimiento económico.

A partir de las variables geométricas de la trefila se realiza la selección y determinación de los valores con los que se configuran las máquinas y se seleccionan las herramientas del proceso. En la Figura 1 se muestran los principales parámetros geométricos que determinan la forma de la matriz de trefilado.

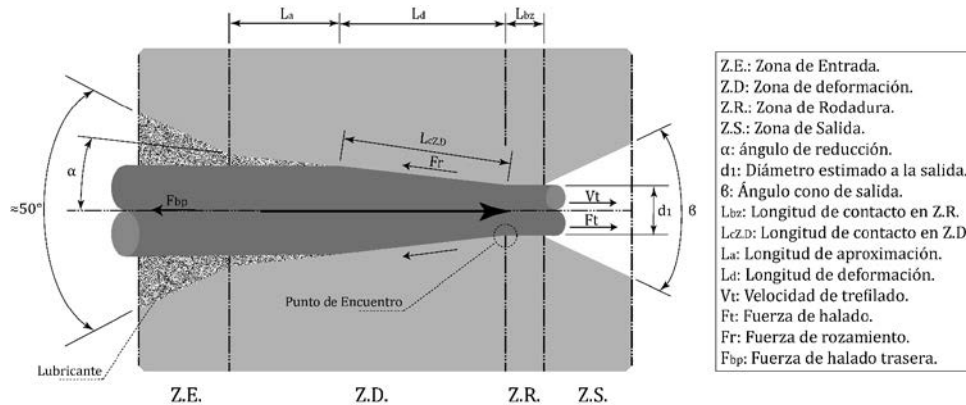


Figura 1. Parámetros geométricos

Entre estas variables se encuentran: el ángulo de apertura del cono o de reducción (α), la longitud de contacto y/o deslizamiento (L_{Tc}), el parámetro delta (Δ), y el porcentaje de reducción de área ($\%r$). Estos parámetros definen la geometría del dado que a su vez permite predecir las condiciones finales del alambre. Por otro lado, a nivel del diseño general de un dado para trefilado se pueden encontrar una serie de variables que intervendrán y serán de vital importancia para realizar el análisis de ingeniería del proceso.

2.1.1 Ángulo de reducción (α)

El ángulo de reducción (α), también conocido como ángulo de incidencia o ángulo de trabajo, es la variable que establece la geometría del cono de entrada en donde se desarrolla el trabajo de deformación volumétrica en frío del alambre. Este ángulo define la apertura entre el eje axial del dado por donde fluirá el material de trabajo hasta cualquier punto de la cara interna del cono de trabajo. Así, α define la zona donde ocurren las primeras interacciones del material de trabajo con el herramental. Cabe destacar que muchos otros parámetros del análisis ingenieril están en función de este parámetro, como, por ejemplo, la longitud de contacto. En fuentes bibliográficas, tanto comerciales como académicas, también definen este parámetro como el semi ángulo de incidencia o semi ángulo de apertura [3].

A nivel industrial, muchos proveedores y fabricantes de este herramental reportan en sus especificaciones diversos rangos para el ángulo de reducción propio del cono de la zona de deformación (2α). Este se selecciona usualmente en función de la dureza del material que se vaya a trabajar, las limitaciones que se tengan relacionadas al material de contacto, como el porcentaje de reducción que se desee alcanzar, y la elongación que se pueda promover [5].

En general, 2α suele definirse desde 4° hasta 25° y para aplicaciones especiales puede llegar hasta 30° . Incluso muchos de los fabricantes de trefilas elaboran dados personalizados a petición especial del cliente. La Tabla 1 muestra ángulos de reducción 2α recomendados para dados manufacturados en carburo de tungsteno.

Cabe destacar que se han desarrollado varios estudios relacionados a la optimización de este ángulo mediante criterios de falla los cuales permiten encontrar un valor ideal, que logrará reducir y mitigar los efectos producidos por la fricción, los esfuerzos residuales superficiales, entre otros. Esta optimización del parámetro permite aprovechar los recursos disponibles y disminuir costos de operación [7, 8].

Tabla 1. Ángulos de reducción para dados de carburo de tungsteno recomendados por un fabricante según el material de trabajo (Adaptado de [6])

Material	Ángulo de Reducción (2α)
Acero alto al carbono	7-10°
Alambre de cobre soldado con CO ₂	10-14°
Acero bajo al carbono	10-12°
Cobre	18-20°
Acero inoxidable	12-14°
Aluminio	20-22°
Bronce	18-20°

2.1.2 Longitud de Contacto (L_{Tc})

La longitud de contacto se divide en dos zonas: contacto en zona de deformación ($L_{cZ.D}$) y contacto en zona de rodadura (L_{bz}). Su descripción matemática se muestra en la ecuación (1). La primera zona está dada en el cono donde se da la deformación y en donde se producen los mayores efectos y esfuerzos relacionados a la fricción. Esta longitud se define en función de los diámetros (incidentes y salida) además del ángulo de reducción α [3]. La segunda zona corresponde a la longitud de la zona de rodadura o chumacera.

Al realizar una revisión de la influencia de esta zona [9], se encuentra que la longitud de esta zona se define como una fracción (expresada en %) del diámetro nominal del alambre que se desea (Usualmente entre el 20 y 50 % del diámetro final), cuyos valores pueden ser tomados en consideración a lo estipulado dentro de la normal [10]. Esta zona tiene como función establecer la calidad superficial y mantener el diámetro del alambre que se desea mediante la reducción del alambre.

$$L_{Tc} = L_{cZ.D} + L_{bz} = \frac{d_0 - d_1}{2\text{sen}(\alpha)} + L_{bz} \quad (1)$$

Donde: d_0 es el diámetro inicial del alambre y d_1 el diámetro después de haber pasado por el dado o hilera.

2.1.3 Parámetro Delta Δ

Otro parámetro indispensable en el análisis ingenieril del proceso de trefilado es el parámetro delta (Δ). Este parámetro depende de la fracción de reducción de área (r) y el ángulo de incidencia a la entrada del dado (α). Este consiste en un número adimensional que establece la relación altura-longitud de la zona de deformación representada por la ecuación (2).

$$\Delta \approx \left(\frac{\alpha}{r}\right) * [1 + (1 - r)^{0.5}]^2 \quad (2)$$

Muchas otras variables en el análisis ingenieril dependen de este parámetro adimensional, como, por ejemplo, el esfuerzo de trefilado (σ_t). En este interviene directamente en el trabajo redundante e inversamente en el trabajo producido por la fricción que suele ser de los que aportan más al esfuerzo total de trefilado σ_t [3]. Este parámetro puede resumir las siguientes consideraciones:

- $\Delta \gg 1$, poco contacto en la zona de deformación, un ángulo de incidencia grande y una reducción muy pequeña. Se presentan problemas de lubricación debido a fugas del fluido o acumulaciones indebidas en caso de que sea sólido el cual puede provocar obstrucciones.
- $\Delta = 1$, o valores cercanos, las dimensiones de la zona, que en 2D tiene una forma trapezoidal, serán de igual magnitud.
- $\Delta \ll 1$, se magnifican los contactos entre el alambre y el dado, además de aumentar la longitud de la zona de deformación.

Por otro lado, es muy frecuente encontrar los dados con deltas (Δ) bajos para promover el movimiento de fluido lubricante en la interfaz del dado y la superficie del alambre. La Tabla 2 muestra los valores de Δ para valores típicos de ángulo de reducción α y fracción de reducción de área r .

Tabla 2. Valores del parámetro delta (Δ) (Adaptado de [11])

Ángulo de reducción α	% Reducción						
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
2°	2.73	1.33	0.86	0.63	0.49	0.39	0.33
4°	5.46	2.66	1.72	1.26	0.97	0.79	0.65
6°	8.19	3.99	2.59	1.88	1.46	1.18	0.98
8°	10.92	5.32	3.45	2.51	1.95	1.57	1.30
10°	13.65	6.65	4.31	3.14	2.44	1.97	1.63
12°	16.30	7.94	5.15	3.75	2.91	2.35	1.95
14°	19.03	9.27	6.01	4.38	3.40	2.74	2.27
16°	21.76	10.59	6.87	5.01	3.89	3.14	2.60

2.1.4 Fracción de reducción de área (r)

La fracción reducción de área (r) es una relación que indica cuanto se redujo la sección transversal del alambre respecto a la inicial. Para el trabajo de metales en frío este valor no debe superar el 45% por etapa debido a procesos de falla y endurecimientos excesivos, además de parámetros operativos demasiado demandantes [4]. Industrialmente el porcentaje de reducción de área está en un rango entre el 20% y el 35% por etapa, pero para casos en donde se use un elevado número de pasadas este porcentaje alcanza en acumulado hasta 70% o superior [12].

Sin embargo, se recomiendan valores bajos en etapas finales del proceso para garantizar mejores acabados superficiales y reducir tensiones residuales. La ecuación (3) muestra la expresión para calcular la fracción de reducción en términos del área transversal inicial (A_0) y el área transversal después del trefilado (A_1). En el caso específico del mercado colombiano, se destaca el uso de alambre de sección transversal redonda por lo que la expresión se simplifica en términos de los diámetros inicial (d_0) y final (d_1) a la entrada y salida de la hilera respectivamente.

$$r = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}\right) * 100\% \quad (3)$$

2.1.5 Geometría de salida

Otro parámetro no numérico importante para el proceso de trefilado es la forma de la geometría de salida del dado. Distintos fabricantes realizan variaciones geométricas en la salida del dado teniendo en cuenta el diámetro del alambre trabajado para permitir la expansión suave y progresiva debido a la recuperación elástica del material. Estas diversas geometrías reducen las abrasiones y en caso de que la máquina se detenga, disminuyen los efectos y la posibilidad de que el alambre se rompa, lamine o trefile por remoción de viruta al devolverse por el dado debido a la inercia del sistema [13].

La Figura 2 muestra diferentes geometrías usadas típicamente en la salida de la trefila. Estas formas de salida usualmente se definen por un ángulo del cono de salida el cual caracteriza y da la forma a la zona final del dado. Este ángulo se define con el propósito reducir tensiones residuales y permitir la recuperación progresiva del material después de haber sido reducido sin afectar la superficie, además de darle resistencia a la hilera. Este ángulo se encuentra en diferentes valores, pero es frecuente que este en el rango de 40° a 55° según distintas especificaciones de fabricantes de matrices. Asimismo, estos presentan en ocasiones algunas geometrías especiales según el diámetro de los alambres que se vayan a trabajar.

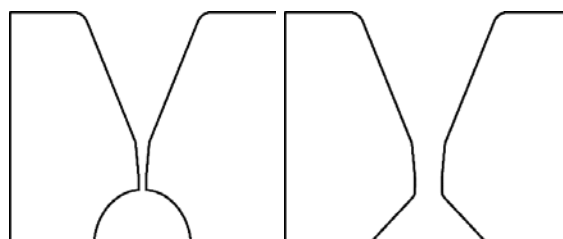


Figura 2. Geometría del dado para alambres con diámetro: a) menor a 0.1 mm (alambres especiales), b) Mayores a 0.1 mm (Adaptado de [14, 15])

2.2 Parámetros de proceso

Por otra parte, existen otras variables que definen el comportamiento del material cuando pasa a través de la trefila conocidos como parámetros de proceso. Estos parámetros son monitoreados durante la transformación para controlar la calidad del producto final y el gasto energético entre otros. Entre los principales parámetros de proceso se destacan la Fuerza de trefilado (F_t), el Esfuerzo de Trefilado (σ_t), y la Velocidad de trefilado (V_t). A continuación, se describen los parámetros más importantes que detallan las propiedades de los productos de trefilación.

2.2.1 Fuerza de trefilado (F_t)

La fuerza de trefilado F_t hace referencia a la carga mínima que se requiere para realizar el halado por una hilera teniendo unas condiciones de contacto dadas. Se suele analizar principalmente desde el esfuerzo de trefilado (σ_t) y la sección transversal del alambre a la salida del dado (A_1) como se muestra en la ecuación 4. Varía principalmente por las condiciones de contacto superficial, derivadas de factores como: acabado superficial de alambre, acabado de hileras, lubricante y velocidad.

$$F_t = \sigma_t * A_1 \quad (4)$$

- *Esfuerzo de Trefilado (σ_t)*. El esfuerzo de trefilado σ_t es el resultado de la sumatoria de los trabajos por unidad de volumen involucrados y necesarios para realizar la deformación. Se compone de trabajo uniforme (w_u), trabajo de la fricción (w_f) y el trabajo redundante (w_r) (ecuación (5)).

$$\sigma_t = w_u + w_f + w_r \quad (5)$$

El trabajo uniforme (w_u), definido en la ecuación 6, corresponde al trabajo necesario para realizar el cambio de sección bajo condiciones ideales, pues se desprecian todo tipo de interacciones con el medio. Específicamente no se analizan interacciones con el dado, lubricante, vibraciones, entre otros [3]. Asimismo, se cuenta con un componente que no se distribuye homogéneamente que es compuesto por el trabajo redundante y el trabajo de la fricción.

Por un lado, el trabajo redundante (w_r), definido en la ecuación (7), es producto de esfuerzos cortantes en la superficie del alambre tanto a la entrada como a la salida, siendo directamente proporcional con la geometría de la zona de deformación. Al realizar un análisis de esfuerzos estos se cancelarán entre sí por lo que se le atribuye este nombre en particular, porque a pesar de reducirse a cero se hizo un trabajo de deformación.

Por otro lado, desde un punto de vista de la deformación de líneas paralelas dentro del alambre, estas se irán flectando a medida que se realiza la deformación juntándose con las que se encuentran en el centro del alambre, esto produce un aumento de esfuerzos residuales a tensión en la superficie y acumulación de esfuerzos residuales a compresión al interior que pueden promover reventones. Una de sus principales consecuencias es el aumento excesivo de la dureza, lo que limita la reducción máxima posible, debido a esto se promueve el aumento de tensiones superficiales [16].

Para representar su efecto, se utiliza el factor de trabajo redundante (ϕ) el cual surge de resultados experimentales. Este promedia el trabajo no homogéneo producido por el halado del material. Para definir este factor existen diversos modelos, sin embargo, el más utilizado y adoptado es el realizado por Wistreich en 1955 [7].

El trabajo de la fricción (w_f), definido en la ecuación (8), corresponde al efecto de la interacción entre los materiales del dado y del alambre a deformar como también del área o superficie de contacto. Este tiene un comportamiento axisimétrico por la variación del contacto entre las superficies. Se modela teniendo en cuenta el modelo de Coulomb con coeficientes de fricción (μ) alrededor de 0,01 y 0,15 según el tipo de lubricante [17]. Finalmente, el esfuerzo de trefilado se resume en la ecuación 10 en donde se contemplan los tres efectos.

$$w_u = \sigma_a * \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \quad (6)$$

$$w_r = (\phi - 1) * w_u \quad (7)$$

$$w_f = \mu * \cot \alpha * \phi * w_u \quad (8)$$

Donde el factor de trabajo redundante (ϕ) se define con la ecuación (9).

$$\phi \approx 0.8 + \frac{\Delta}{4.4} \quad (9)$$

De las ecuaciones (6), (7) y (8) se obtiene la ecuación (10).

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_a * \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) * [\phi * (1 + \mu * \cot \alpha)] \\ \frac{\sigma_t}{\sigma_a} &= \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) * [\phi * (1 + \mu * \cot \alpha)] \end{aligned} \quad (10)$$

2.2.2 Velocidad de trefilado (V_t)

La velocidad de trefilado (V_t) es una variable controlable en la mayoría de los procesos de trefilado, que va ligada a muchos indicadores de productividad. A nivel industrial, sin embargo, está limitada por la potencia P de los equipos disponibles, pues partiendo de la ecuación general de potencia mostrada en la ecuación (11), esta será directamente proporcional a la velocidad y a la fuerza.

$$P = F_t * V_t \quad (11)$$

Aparte de las capacidades de los equipos, esta variable dependerá de algunos factores o condiciones a las que esté sometido el alambre en cada una de las etapas e interacciones con los dados tales como la fricción (condiciones de lubricación, material de contacto del dado, longitud de contacto, calidad superficial del alambre), las vibraciones y quizá uno de los más importantes, la alineación del alambre con el dado a la entrada y a la salida. Industrialmente, dependiendo del diámetro objetivo, el material de trabajo, la maquinaria disponible y las condiciones económicas necesarias se encuentran distintos rangos, desde 1 hasta 60 m/s teniendo en cuenta información proporcionada por distintos proveedores de trefiladoras e insumos para trefilado a nivel mundial.

Gawali, Sharma y Khare [18] estudiaron el efecto de la velocidad de trefilado en el esfuerzo y la potencia necesarias para realizar el trefilado de un acero alto al carbono (0.79% C) a diferentes porcentajes de reducción. Allí, se observa una relación directa entre la velocidad y la potencia, y una relación inversamente proporcional entre el esfuerzo y la velocidad en especial en reducciones que no superen el 60%. Así mismo Suliga [19] presenta las propiedades del material trefilado, específicamente la resistencia a la tensión como producto de la velocidad. Para ello, trefilaron un alambre de 5.5 mm de acero medio al carbono (0.51% C) a dos velocidades (10 y 30 m/s) y diferentes porcentajes de reducción de área (%r).

Observando que a mayores velocidades se podían obtener alrededor de un 7% en promedio de ganancia en resistencia a la tracción a medida que se iba aumentando tanto la reducción como la velocidad utilizada. Por otro lado, se apreció el efecto de la velocidad con la temperatura, evidenciando un comportamiento muy similar además de una relación directamente proporcional con la relación de reducción de área (%r) con un crecimiento prácticamente logarítmico. La Figura 3 muestra como varia la resistencia a la tensión del alambre y la temperatura de trefilado como consecuencia de la velocidad de trefilado.

2.3 Equipos e insumos para trefilado

El mercado dispone de una gran cantidad de productos para realizar el proceso de trefilado, abarcando desde máquinas, matrices, porta-dados, lubricantes, afiladoras, entre otras, que facilitan y procesan enormes cantidades de materiales para la elaboración de alambres, mallas, conductores, clavos, grapas, remaches, etc.

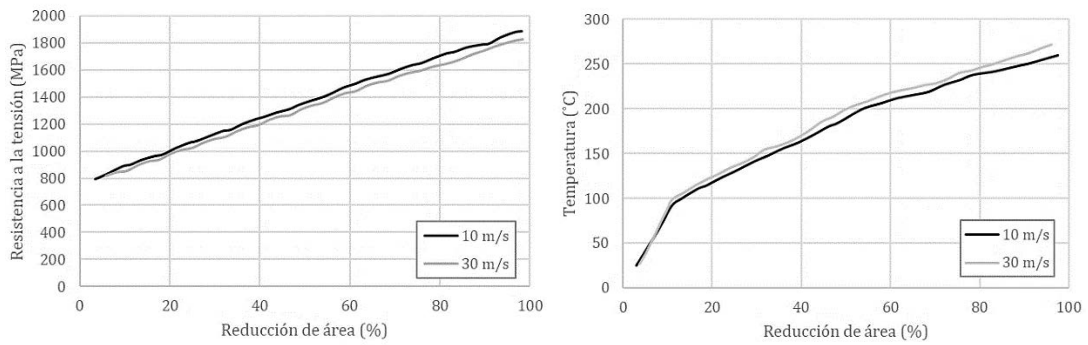


Figura 3. Resistencia a la tensión (a) y de la temperatura (b) del alambre en función de la reducción de área a determinada velocidad de trefilado (Adaptado de [19])

2.3.1 Máquinas de trefilado

Existe una gran diversidad de configuraciones de máquinas trefiladoras, especialmente porque día tras día aparecen inventores quienes patentan sus máquinas destacando las posibles ventajas respecto a las que se encuentran en el mercado. Además, de la posición de los rollos de alambre a la entrada, a la salida y los cabestrantes; estas también se clasifican por el número de etapas y la disposición o posición de los cabestrantes los cuales guiarán el proceso de halado del alambre. Por otro lado, las maquinas trefiladoras también se pueden clasificar en función del estado o la naturaleza en la que se encuentran los lubricantes. En la Figura 4 se muestra un esquema de la distribución de cada tipo de trefiladora.

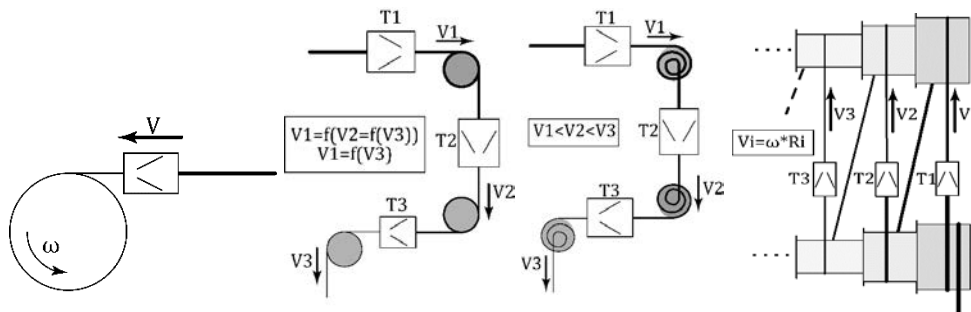


Figura 4. Trefiladoras: a) Simples monoblock, b) Continuas, c) Acumuladoras, y d) Compensadas

- **Trefiladoras simples.** También llamadas monoblock, son la configuración más sencilla en las máquinas trefiladoras la cual cuenta con un solo cilindro o tambor de arrastre el cual se ubica de manera vertical u horizontal según corresponda, por lo general este tambor puede ser también el de almacenamiento. Asimismo, cuenta con solo una casetera porta-dados; también se caracterizan por ocupar poco espacio y desarrollar bajas velocidades comparadas con otras trefiladoras. Comercialmente se encuentran en rangos de hasta 4 m/s.
- **Trefiladoras Múltiples.** Las trefiladoras múltiples son compuestas por múltiples etapas de trefilado con distintas configuraciones que permiten aumentar la productividad. Estas pueden ser continuas, acumuladoras y compensadas.
 - **Continuas.** Es una de las configuraciones más usadas a nivel industrial gracias a la gran producción en serie que se puede obtener derivado de las múltiples etapas, permitiendo producir alambres de diámetro bastante fino. Por lo general, se cuenta con motores unidos a cada cilindro de arrastre el cual permite controlar la elongación del alambre y la tensión presente en el alambre. Cuentan con un motor extra (en ocasiones motoreductor) el cual se encarga de producir el arrastre general del alambre; los tambores de arrastre pueden ser verticales u horizontales. Sin embargo, son muy robustas y demasiado grandes complicando su diseño en planta. Suelen operar alrededor de 50 a 60 m/s de acuerdo al diámetro del material de trabajo y la tecnología con la que se cuenta.
 - **Acumuladoras.** Es una configuración similar a la continua, con la diferencia de que no está adecuada para compensar los efectos de la elongación y por lo tanto requiere acumular alambre mediante

múltiples trefiladoras simples en paralelo [20, 21, 22]. Presentan una gran desventaja relacionada con la acumulación de alambre puesto que al llenarse la capacidad de alguno de los tambores se requiere detener el funcionamiento de la máquina completa. Suelen operar entre los 7 y 15 m/s.

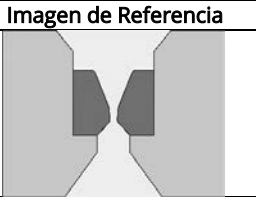
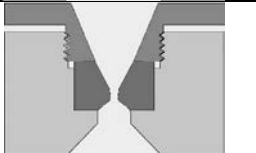
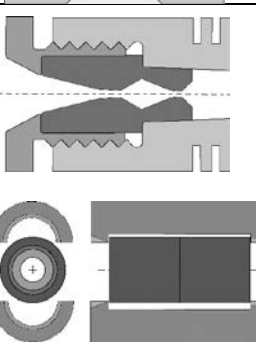
- *Compensadas.* Esta configuración de trefiladora cuenta con rodillos cónicos ranurados o acanalados que permiten colocar varias series de alambres, los cuales son arrastrados a diferentes velocidades tangenciales a medida que van cambiando su posición a lo largo del rodillo, estos canales son función del número de dados o trefilas dispuestas. Se utilizan frecuentemente para el trefilado de alambres finos. Cuentan con una rápida elevación de la temperatura debido principalmente a la fricción. Suelen tener varios rodillos con múltiples dados, cuentan con lubricación interna y suelen encontrarse desde 2 a 8 rodillos con esta configuración. Asimismo, al trabajar con alambres finos, se suelen utilizar altas velocidades superiores a 30 m/s [23].

2.3.2 Hileras

Las hileras, dados o matrices de trefilado son las herramientas fundamentales en el proceso de trefilado, pues es con ellas con las que se realiza la deformación volumétrica o cambio de sección en el material de trabajo. Muchos parámetros de tipo operativo dependen principalmente de aspectos geométricos de la trefila. En cuanto al material del dado, se busca que cumplan con la reducción del trabajo redundante y el trabajo de la fricción, y que permitan hacer el trefilado a mayores velocidades minimizando las pérdidas térmicas y mecánicas; además, de que pueda resistir altos esfuerzos sin deformarse o desgastarse.

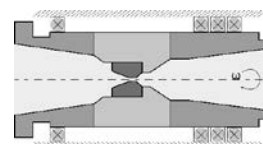
- *Holder, Carcasa, Cubiertas y Porta dados.* En las diferentes máquinas de trefilado, se usa un herramental conocido como porta-dados el cual aloja el núcleo que posee la geometría y el material adecuado para realizar la transformación – deformación del alambre mediante el halado. Este herramental está hecho, en su mayoría, de acero inoxidable y en una menor proporción de acero endurecido por medio de procesos de manufactura que aseguren muy buenas tolerancias para que entre adecuadamente el inserto o núcleo respectivo. Poseen un diámetro interno constante que le permite alojar un amplio rango de núcleos y permitir el procesado de un mayor número de diámetros. Así mismo, completa una parte de la campana o de la zona de entrada. Existen una gran variedad de porta-dados que poseen diversas ventajas en función de algunas condiciones operativas. En la Tabla 3 se describen los principales tipos de porta dados o holders.

Tabla 3. Tipos de Porta dados o Holders

Tipo	Descripción	Imagen de Referencia
Estándar	Son la configuración más sencilla de porta dados. Se caracterizan por su simplicidad para el intercambio de dados. Se utiliza frecuentemente para bajas velocidades y fuerzas debido que al incrementar estas magnitudes se pueden provocar expulsiones súbitas del núcleo dañando el alambre o el dado.	
Sin Presión	Es una versión un poco más avanzada de la versión estándar. Esta contiene el dado para evitar que salga expulsado debido a las tensiones traseras resultantes. Garantiza una mejor sujeción y debido a la separación a la entrada se puede utilizar como aleta para permitir el flujo de aire y reducir la temperatura.	
A presión	Este tipo de porta dado tiene diversas ventajas frente a los otros, especialmente con el manejo de lubricantes sólidos. Además, por su gran tamaño permite al diseñador añadir algunas prestaciones extra como la colocación de aletas para aumentar la superficie y mejorar la transferencia de calor hacia el exterior, sistemas de intercambiadores de calor, inyectores de lubricante hacia el interior, entre otros. Resalta fácilmente por los componentes que dispone en su interior en donde se destacan dos núcleos colocados en tándem, uno con mayor diámetro que el otro el cual permitirá atrapar más lubricante y cubrir de una mejor manera el alambre. Pueden ser configurados como se muestra en la figura (a) en donde se encapsulan colocando una tapa roscada o puede ser como se muestra en la figura (b) en donde se aprecian dos mitades las cuales se colocarán después por un ajuste a presión o unión roscada en la casetera o jabonera.	

Rotativos

En los portadados rotativos, se dispone de un mecanismo motorizado que se encarga de generar un movimiento circular del núcleo mientras el alambre va pasando. Muchos fabricantes garantizan la reducción de la forma oval que se puede llegar a producir en circunstancias normales, un mejor flujo, mejor cobertura de lubricante y una mejor refrigeración debido a los sistemas que se suelen instalar en la cavidad donde va el núcleo. Debido a la disposición de la caja, se pueden utilizar lubricantes tanto sólidos como líquidos. Como refrigerante se suele utilizar agua como fluido frío.



- **Refrigeración de Dados.** Para mitigar efectos de aumento de la temperatura, distintos fabricantes de porta dados han implementado sistemas de refrigeración por inmersión en piscinas de algún fluido o usando métodos parecidos a los empleados en los intercambiadores de calor de tubos los cuales se colocan en agujeros que atraviesan en determinada dirección los dados. También es frecuente encontrar la implementación de sistemas que promueven la convección forzada sobre el holder, en este caso en particular, se suelen hacer añadir aletas para aumentar la superficie y aumentar el flujo de calor hacia el exterior del cuerpo. La Figura 5 muestra un ejemplo de porta dado diseñado con un circuito de refrigeración para el control de su temperatura.

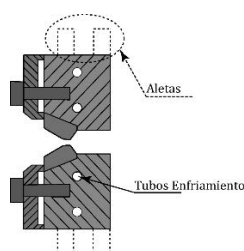


Figura 5. Holder perforado para adecuación de intercambiador de calor [24]

- **Material de Contacto.** Comercialmente existe una amplia variedad de materiales que buscan cumplir con requerimientos de eficiencia del proceso mediante bajo desgaste, altos volúmenes de producción, y disponibilidad para el trabajo de distintos diámetros. Los principales materiales usados en las hileras se describen la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales de contacto

Tipo	Ventajas	Desventajas	
Acero	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de adquisición. • Fácil de rectificar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto coeficiente de fricción. • Vida útil muy corta, rápido desgaste. • Calentamiento rápido y brusco. • De poco uso a nivel industrial. 	
Tungsteno	<ul style="list-style-type: none"> • Costo medio de adquisición. • Baja fricción con metales. • Amplio rango de diámetros de trabajo. • Buena precisión dimensional en el tiempo. • Tolerancias justas (5 a 100um) • Mayor vida que la del acero endurecido. • Rectificable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pierde propiedades a altas presiones y temperaturas. • Proceso de fabricación costoso. • Sufre fácilmente fenómenos de corrosión y oxidación. • Alta reactividad de sus ligantes. 	
Diamante	Natural	<ul style="list-style-type: none"> • Se estima una de las vidas útiles más largas para materiales de contacto. • Bajos coeficientes de fricción. • Permite utilizar altas velocidades compensando costos iniciales. • Mantiene ajustadas tolerancias dimensionales. • Propiedades distintas en los diferentes planos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de adquisición y mecanizado. • Muchas regulaciones internacionales • Diámetros de trabajo limitados (hasta 2 mm) • Fallas impredecibles por inclusiones y defectos en su formación natural • Reducción de propiedades a altas presiones y temperaturas. • Requieren la elaboración de una segunda cobertura de WC.
	Mono cristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor control de la microestructura. • Mayor vida útil. • Modelos de falla predecibles. • Bajos coeficientes de fricción. • Rangos de tolerancias aún más justos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costosos métodos de manufactura. • Pueden provocarse inclusiones debido a la reacción con los gases utilizados en el entorno controlado.

Sintético	
Poli cristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Diferentes diámetros de trabajo. • Control del tamaño de grano. • Excelentes calidades superficiales • Rectificable. • Larga vida útil. • Manejo de altas velocidades. • Mejoras en distintas propiedades debido a la combinación de materiales.
Nano cristalino	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplican en forma de recubrimiento. • Otorga la mejor calidad superficial entre los materiales de contacto. • Logra desarrollar la fricción más baja y alargar la vida útil de los dados. • Al ser un recubrimiento puede disponerse para dados que se utilicen para trefilar cualquier diámetro (Se pueden encontrar hasta 100 mm). • Fácil de rectificar y reparar en caso de ser necesario.

- La naturaleza del aglutinante puede afectar la vida útil del dado.
- Costosos métodos de manufactura.

- Altos costos de adquisición.
- Métodos de manufactura costosos.
- Poco frecuentes en el mercado colombiano.

2.4 Lubricantes

La lubricación promueve las condiciones necesarias en el contacto de piezas en movimiento con el fin de reducir el desgaste, calentamiento y la fricción [25]. En el trefilado se utiliza para la reducción de los efectos producidos la fricción. Los efectos que se desea controlar son el aumento de la fuerza de trefilado, el desgaste de las hileras, defectos superficiales en el alambre, calentamiento de los dados y el alambre (aumento de esfuerzos residuales térmicos). Por lo general, se suelen encontrar en tres variedades o clases de acuerdo con el estado en el que se encuentran: sólidos, líquidos y mixtos. Mediante la mezcla de componentes líquidos y sólidos se han desarrollado lubricantes más eficientes, económicos y de fácil acceso. Sin embargo, se deben realizar distintas pruebas que permitan determinar las cantidades que reducen el trabajo producido por las fuerzas de fricción [26].

2.4.1 Sólidos

El lubricante sólido o lubricación en seco se utiliza con mayor frecuencia en el trefilado de alambres con grandes diámetros y porcentajes de reducción considerablemente grandes. Por lo general son mezclas compuestas por jabones esteáricos, grafito, cal y distintas grasas en estado sólido. Este tipo de lubricación proporciona un recubrimiento formado por la interacción entre las superficies reduciendo la fricción. Esta reducción será proporcional al tamaño de la partícula usada en los lubricantes [27]. Por otro lado, el estudio presentado por Ruiz et al. [28] se concentró en estudiar los principales lubricantes sólidos usados en el proceso de trefilado. Entre los principales lubricantes se destacan el estearato de sodio, disulfuro de molibdeno, estearato de calcio y estearato de potasio y mezclas entre los mencionados anteriormente.

Por otro lado, Trukhanovich y Ledneva [29] resaltan diversas consideraciones que deben tenerse en cuenta relacionadas a los lubricantes de naturaleza sólida. Se resaltan condiciones como evitar el desgaste, proteger los dados, reducir las temperaturas que se producen debido a los efectos de la fricción, el bajo precio, entre otras. Sin embargo, se establecen ciertas condiciones como el tamaño de grano del material empleado el cual se recomienda que sea de distintos tamaños para que se adecue de distintas maneras en la zona de reducción sin producir taponamientos, ralladuras entre otras.

2.4.2 Líquidos

Los lubricantes líquidos proporcionan una lubricación hidrodinámica. Estos generan una capa de espesor uniforme la cual reduce la fricción entre las superficies de contacto. Es recomendable su uso para la reducción de alambres finos y la obtención de mejores calidades superficiales en las últimas etapas del proceso. Se han desarrollado algunos métodos como la adaptación de un tubo con aceite en la entrada del holder que permita desarrollar una lubricación hidrodinámica completa [30]. Para este tipo de lubricación, como se trata de un fluido, monitorear sus propiedades como viscosidad y densidad ya que pueden cambiar al modificar las condiciones de presión y temperatura de operación.

3. MÉTODO

3.1 Visión general del sector trefilador en Colombia

Se caracterizó el sector transformador de aceros por trefilado mediante un estudio cualitativo – descriptivo con el propósito de describir el panorama general de las industrias dedicadas al trefilado en Colombia. Mediante una encuesta compuesta por 54 preguntas agrupadas en diferentes categorías se entrevistaron expertos e ingenieros del sector trefilador colombiano para determinar la caracterización de prácticas que se ejecutan, productos, variables operativas, maquinaria utilizada, entre otras.

3.2 Simulación numérica del proceso de trefilado

Adicionalmente, se realizó una revisión bibliográfica de la literatura científica disponible enfocados en el análisis de las estrategias y principales características de la simulación computacional del proceso de trefilado como una herramienta para el desarrollo y optimización de la técnica a nivel industrial y de laboratorio.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Visión general del sector trefilador en Colombia

El análisis de las entrevistas realizadas a expertos del sector transformador de aceros en Colombia, y específicamente a expertos en trefilado se sintetiza en la Tabla 5. Esta tabla resumen que contiene las principales categorías encuestadas se convierte en un insumo muy útil para investigadores e ingenieros de desarrollo. Estos datos permiten definir una línea base del estado actual del sector trefilado colombiano. Y, asimismo, establecer requerimientos y objetivos de avance tecnológico que requiere el sector en Colombia.

Tabla 5. Síntesis de la caracterización del sector trefilador colombiano

Seguridad	Aseguran el uso de implementos de seguridad (gafas, tapa oídos, tapabocas, entre otros), guardas y múltiples puntos de parada. En las plantas de producción más tecnológicas y modernas cuentan con sistemas de control que desenergizan al cruzar ciertas zonas que representen altos riesgos.
Categorización de Riesgos	No es frecuente la divulgación y/o realización este tipo de actividades por el impacto que puede llegar a tener. Sin embargo, reportan que un accidente puede representar una muerte.
Automatización	Más habituales en las empresas más grandes. A pesar de ello, se encuentran en un rango entre 50 y 70%. El resto del sector suele utilizar practicas análogas y rudimentarias comparadas con lo que se usa a nivel mundial.
Velocidades de trefilado	Industrias pequeñas: hasta 5- 7 m/s. Industrias grandes: hasta 25 m/s.
Limpieza de alambre	Preferencia por el decapado mecánico por rodillos o poleas. Uso frecuente de procesos posteriores para mejorar resultados mediante métodos abrasivos. Mejores resultados económicos y menor impacto ambiental.
Alineación	Destacan vital importancia en el control de este parámetro, en donde se busca la alineación entre el dado y el alambre tanto a la salida como a la entrada de la trefila. Empresas pequeñas no procesos de alineación.
Lubricante	Se utiliza la lubricación en seco para la mayoría de las aplicaciones, procurando mantener el polvo o jabón aislado del entorno para evitar la contaminación de este. Poca medición y control de la formación de grumos. No existe control térmico del mismo. El indicador de renovación del lubricante es el oscurecimiento del polvo. Lubricante líquido se usa en alambres usados en procesos superficiales posteriores por el mejor acabado.
Hileras, dados o trefilas	Uso de hileras con núcleo de carburo de tungsteno, adquiridas mediante intermediarios nacionales. No hay fabricantes nacionales. Algunas de las más grandes suelen importar desde Europa sus trefilas desde alguna marca en especial o fabricarlas ellos mismos desde sedes en otros países conservando datos técnicos en secreto. Existe un gran sector dedicado al rectificado de hileras.
Máquinas	Se encuentran tanto monoblock como continuas. En el caso de las continuas, suelen ser de pocas etapas (entre 4 y 6 etapas) por la disposición de espacio que se pueda llegar a disponer en la planta. En muchas de las empresas tradicionales, pequeñas y con baja tecnificación cuentan con máquinas antiguas (15 a 40 años) o fabricadas a partir de pedazos o residuos de otras máquinas por lo que pueden aumentar gastos relacionados al consumo energético.

4.2 Simulación numérica del proceso de trefilado

La aplicación de simulaciones computacionales dentro del proceso de trefilado permite corroborar y validar mediante un análisis comparativo de datos obtenidos de forma analítica y los datos de forma simulada. Su

principal aplicación es la predicción de la fuerza necesaria de halado, las energías presentes y tensiones involucradas dentro del proceso.

El uso del método de elementos finitos (MEF) es el principal método numérico usado para simular el trefilado. Los estudios e investigaciones en este tema se han enfocado principalmente en determinar los parámetros geométricos óptimos para mejorar la productividad del proceso y disminuir el consumo energético. Para este fin, se estudian aspectos como ángulos de contacto (α), longitud de rodadura (L_B), porcentajes de reducción de las hileras, velocidad y fuerza de halado, entre otros [9]. Principalmente se busca determinar la influencia en la calidad del alambre final, sus defectos superficiales y realizar un seguimiento a la evolución del comportamiento de la deformación, distribución de tensiones para una o múltiples pasadas en las hileras.

4.3 Software

Para el análisis computacional del proceso de trefilado se cuentan con diversos códigos o softwares para realizar un estudio de elementos finitos, dividiéndolos en tres tipos según su proceso de solución: estado implícito, dinámico explícito y métodos inversos. La Tabla 6 resume los principales softwares comerciales para la implementación de estudios numéricos del trefilado. Se debe considerar que independientemente del tipo de método de solución, el software seleccionado debe estar en la capacidad de realizar el análisis considerando tres tipos de no linealidades generados durante el proceso de trefilado: 1) Contacto entre la matriz de trefilado y el alambre, 2) Comportamiento elastoplástico del alambre durante el proceso, y 3) Grandes deformaciones que se generan en el alambre durante el proceso.

Tabla 6. Programas comerciales para realizar estudio de elementos finitos [16]

Estado implícito	ABAQUS
	ANSYS
	MARC
	NIKE3D
	AUTOFORM
	DEFORM3D
	FORGE 2009 FEA
Dinámico Explícito	ABAQUS-Explicit
	ANSYS-Explicit
	Dyna-3D
	OPTRIS
Métodos Inversos	ISO-PUNCH
	SIMEX2

4.3.1 Modelos de materiales

Al momento de realizar el estudio mediante el método de elementos finitos, un factor fundamental para obtener buenos resultados es la definición del modelo constitutivo del material que se va a estudiar. El modelo constitutivo es el modelo matemático que describe la relación entre los esfuerzos generados durante el proceso y las deformaciones resultantes. Así mismo debido al carácter dinámico del proceso de trefilado y el aumento de la temperatura en el proceso debido a la fricción, los modelos constitutivos usados en para simular el trefilado deben estar en la capacidad de describir el comportamiento mecánico incluyendo otros parámetros como el endurecimiento por deformación, el endurecimiento por tasa de deformación y el ablandamiento por temperatura. Los principales modelos constitutivos usados para la modelación de materiales de trefilado son modelos visco-plásticos destacándose el modelo de Johnson-Cook [31], el modelo de Steinberg-Guinan [32], el modelo de Cowper-Symonds [33], entre otros.

4.3.2 Proceso de simulación

Para realizar un estudio por medio de MEF se deben tomar en cuenta diversos parámetros como las condiciones del alambre, la geometría de la hilera, las condiciones de contorno, el mallado y la comprobación del modelo utilizado [34, 35, 36]. En la Tabla 7 se describen los principales parámetros que se deben considerar para una simulación computacional del proceso de trefilado.

Tabla 7. Parámetros fundamentales para la simulación del proceso de trefilado

Parámetros del alambre	Parámetros de la hilera
Comportamiento visco elastoplástico	Ángulo de entrada (α)
Características geométricas	Relación de reducción ($\%r$)
Módulo de elasticidad (E)	Coefficiente de fricción (μ).
Coefficiente de Poisson (ν)	L_B mayor al diámetro del alambre
Modelo constitutivo con dependencia de deformación, tasa de deformación	Velocidad de trefilado

4.3.3 Condiciones de contorno

Para simular el comportamiento del proceso de trefilado se deben especificar las condiciones de contorno o frontera que se aplicaran al modelo. Estas consisten en velocidades y en restricciones de desplazamiento aplicados a los cuerpos que componen el modelo. En la Figura 6 se muestran las principales condiciones de contorno que se aplican al dado y al alambre. Usualmente se aplica una velocidad de entrada del alambre correspondiente a la velocidad de trefilado (V_t) como se muestra en la Figura 6a. Sin embargo, en algunas ocasiones se puede seleccionar que la velocidad de trefilado se aplique al cuerpo de la hilera como en el caso de la Figura 6b. A continuación, se describen las principales condiciones de frontera aplicadas a los dados y alambres durante la simulación computacional.

Hilera o dado:

- Desplazamiento y rotaciones en cero de todas las direcciones.
- Cero desplazamientos en la dirección del avance del alambre en las caras verticales del dado.
- Cero desplazamientos en la dirección vertical en un punto de la cara superior de la hilera.

Alambre:

- Velocidad cero en dirección del eje X y Y.
- Cero desplazamientos en dirección normal al eje de simetría de revolución del alambre.
- Desplazamiento aplicado en el extremo más cercano a la hilera, que varía linealmente con el tiempo.

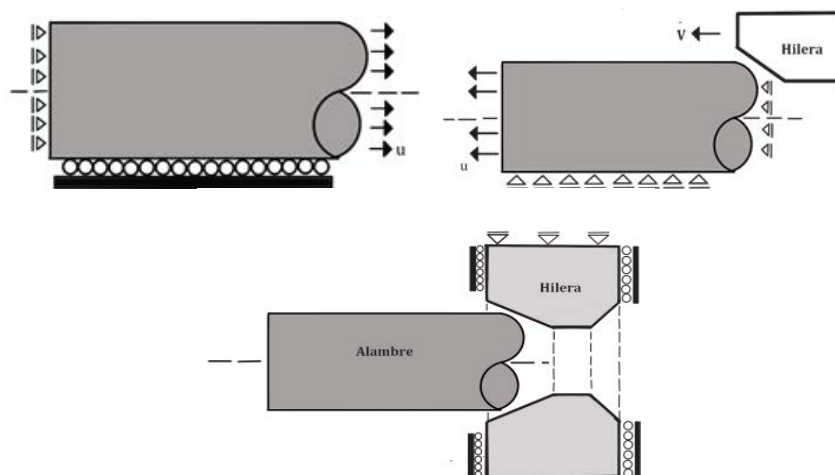


Figura 6. a) Condiciones de contorno en el alambre, b) caso alambre fijo y dado móvil, y c) Condiciones de contorno en la hilera

4.3.4 Mallado

El mallado es un factor importante para obtener buenos resultados de simulación computacional. Típicamente, tamaños de malla más pequeños aumentan la precisión de los resultados, pero a costa de tiempos computacionales altos y problemas de degradación de las mallas. Para el caso particular de la simulación de trefilado, las Figura 7 y 8 muestran mallas típicas del mallado del alambre y la trefila. En particular, este tipo de mallas, estructurada con elementos hexaédricos para el alambre con geometría relativamente simple y libre con elementos tetraédricos para la trefila que presenta una geometría compleja, son las mallas más usadas en la literatura encontrada [16, 34, 36-38].

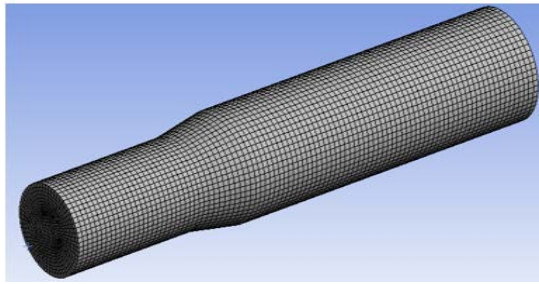


Figura 8. Mallado de alambre

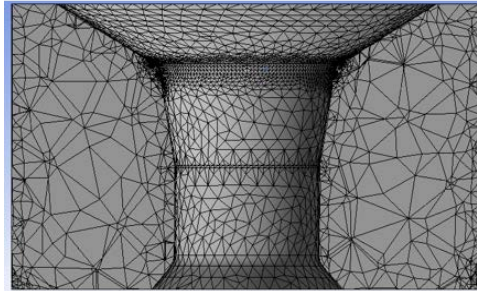


Figura 9. Mallado dado

En estas mallas se evidencia un refinamiento en la malla de la trefila en las zonas de ángulo de aproximación, longitud de rodadura y ángulo de salida, debido que serán las partes de mayor presencia de esfuerzos y contacto con el alambre. Los ingenieros con frecuencia realizan estudios de convergencia como el realizado por Cabello et al. [37], para encontrar el balance entre la calidad de los resultados y el tiempo computacional. En las Figura 10 y 11 se muestra un estudio típico del estudio de convergencia de malla bajo diferentes factores de reducción r . En este estudio se puede observar cómo al reducir el tamaño de la malla se presenta menor dispersión en el esfuerzo y la deformación obtenidos entre mallas.

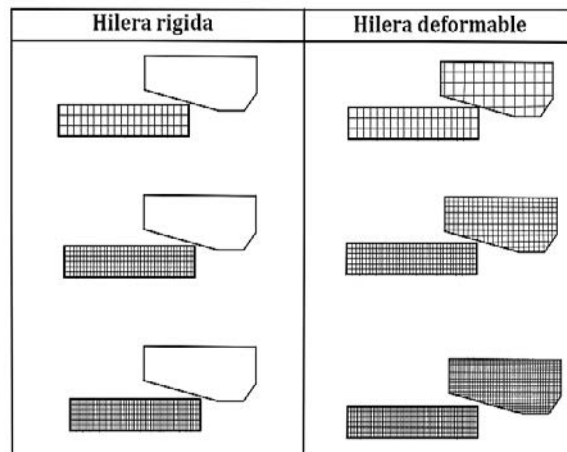


Figura 10. Estudio de convergencia de mallado para diferentes tamaños de malla en alambre, hilera rígida y deformable

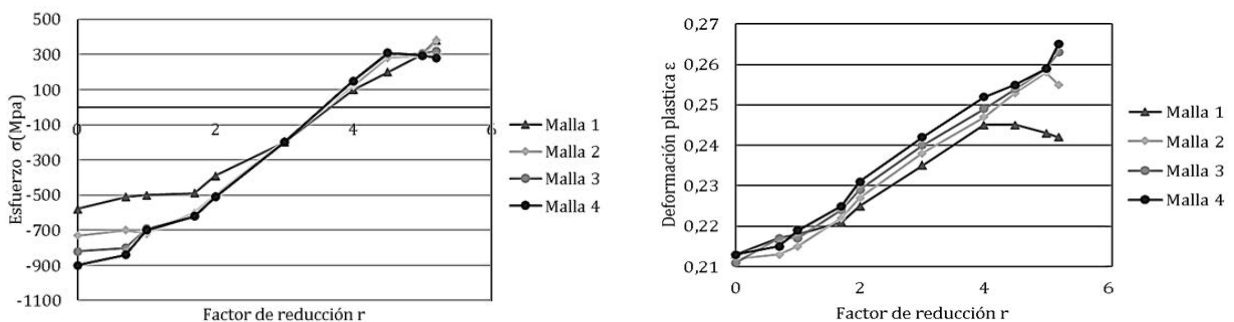


Figura 11. Datos de Estudio de convergencia: a) esfuerzo generado en función del factor de reducción, y b) Deformación plástica en función del factor de reducción (Adaptado de [37])

4.4 Estudios de parámetros de trefilado usando simulaciones computacionales

Diversos estudios para describir el comportamiento del proceso de trefilado ante la variación de diferentes parámetros se pueden encontrar en la literatura científica [38-40]. Por ejemplo, Hassan et al. [34] estudiaron mediante simulaciones computacionales del proceso de trefilado el efecto del ángulo de entrada α y la longitud de rodadura en la fuerza de trefilado bajo diferentes relaciones de reducción ($\%r$). La Figura 12 muestra un resumen de los resultados de este estudio. Se evidencia que el ángulo de entrada óptimo para realizar el proceso está entre 8 y 10°. En este rango se tienen menores valores de fuerza de trefilado. En cuanto al efecto de la longitud de rodadura se observa que al aumentar la longitud de rodadura se aumenta la fuerza de tracción.

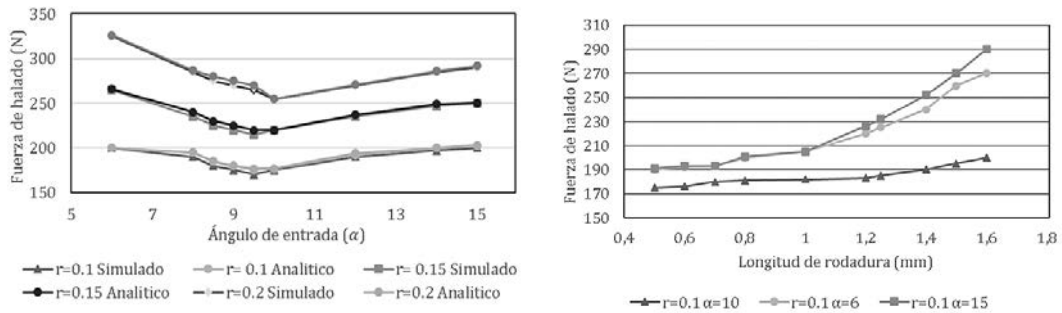


Figura 12. Variables básicas del proceso en datos, a) influencia del ángulo de entrada α . b) Efecto de la longitud de rodadura L_{DZ} (Adaptado de [34])

5. CONCLUSIONES

Existen diferentes retos en la actualización y automatización de los distintos equipos utilizados en el proceso de trefilado; asimismo, es necesario promover nuevas formas de mercado relacionadas con los diferentes dispositivos y utillaje con el fin de impactar directamente en costo de adquisición y fabricación. Por otro lado, se debe realizar la adecuada identificación de variables para obtener el mejor rendimiento operacional en el proceso. Se recomienda ampliar la información en relación con la alineación del alambre con las hileras, debido a que esta variable suele pasar desapercibida y puede llegar a mejorar el rendimiento al reducir el área de contacto y por lo tanto el trabajo de fricción.

También, existe una gran cantidad de oportunidades en cuanto a la automatización, control e instrumentación para mejorar el proceso y llevar registros que permitan mediante la experimentación obtener óptimos resultados y reducir costos tanto de herramientas como consumo energético. Del mismo modo, incentivar la relación academia-industria permitiendo así aumentar las oportunidades para los estudiantes de las diferentes universidades, como también aprovechar el conocimiento que surge de estas instituciones para que sea aplicable y se logren solucionar la mayor cantidad de necesidades posibles mediante las soluciones ingenieriles.

En lo concerniente a la simulación existen múltiples formas o alternativas que dependerán de los objetivos del estudio y de la capacidad computacional que se disponga. Sin embargo, es de vital importancia reconocer que el comportamiento de la fricción en un entorno real será de tipo asimétrico y no uniforme en la superficie, sea por los espesores de las capas del lubricante que se puedan llegar a formar, mala alineación, oscilaciones, entre otros. Además, se deben tener claras las disposiciones de los solvers disponibles en la gran oferta de programas que se ofrecen en el mercado y la capacidad económica para financiar este tipo de prácticas. Sin embargo, se puede utilizar para obtener una muy buena aproximación con el fin de estudiar los distintos efectos e ir mejorando los procesos. Finalmente, se recomienda ampliar el espacio de muestra para la caracterización y así obtener una visión más precisa del sector del trefilado en Colombia, teniendo en cuenta la poca disposición y aceptación que se pueda llegar a alcanzar.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la empresa Smart Steel Ecosystems S.A.S por el apoyo brindado para la obtención de los datos usados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Latinoamericana del Acero ALACERO, «América Latina en cifras 2020,» ALACERO, São Paulo, Brasil, 2020.
- [2] Y. Garcia, «Una mirada a la ciencia y la tecnología en Colombia,» Asuntos Legales, 22 11 2018. Recuperado: <https://www.asuntoslegales.com.co/analisis/yina-garcia-2796467/una-mirada-a-la-ciencia-y-la-tecnologia-en-colombia-2796466>
- [3] R. Wright, Wire Technology, Burlington, USA: Elsevier, 2011.
- [4] M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Mexico, McGraw Hill Interamericana, 2007.
- [5] Esteves Group, «Science solutions - Wire drawing terminology,» Recuperado: <https://www.estevesgroup.com/es-ar/solutions/science/terminology>
- [6] REDIES, «Hard Metal Dies,» Recuperado: <http://www.redies.com/web/en/hard-metal-technical-specification/>
- [7] J. Wistreich, «Investigation of the Mechanics of Wire Drawing,» *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 169, n° 1, pp. 654-678, 1955.
- [8] T. Massé, L. Fourment, P. Montmitonnet, C. Bobadilla y S. Foissey, «The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques,» *International Journal of Material Forming*, vol. 6, n° 3, pp. 377-389, 2012.
- [9] M. Lorenzo, V. Kharin y J. Toribio, «Influencia de la longitud de transición de la hilera de trefilado sobre la fragilización por hidrógeno de aceros de pretensado,» *Anales de la Mecánica de la Fractura*, vol. 1, n° 26, pp. 313-318, 2009.
- [10] ASM Handbook, Volume 1, "Properties and selections-steels", ASM international , 2007.
- [11] M. Frigero, «La Tecnología del Trefilado y la Maquinaria para dicho proceso,» de *The Drawing Technology*, Milano, 2007, pp. 1-29.
- [12] L. M. Ayala, *Manual de operaciones del proceso de trefilado de alambre de acero y aluminio aplicado a la empresa Ideal ALAMBREC*, Escuela de formación tecnológica, 2006.
- [13] L. Morales Acosta, A. Ortiz Prado y V. H. Jacobo, Optimización de un proceso de trefilado de acero mediante el método de elementos finitos, Puebla: Sonim, 2008, pp. 919-927.
- [14] REDIES, «Nanodiamond,» Recuperado: <http://www.redies.com/web/en/nd-technical-specification/>
- [15] Fort Wayne Wire Drawing, «FWWD,» Recuperado: <https://www.fwwd.com/>
- [16] L. G. Betancourt y J. P. Guachamín, *Diseño y construcción de un equipo para el proceso de trefilado en frío de metales no ferrosos a ser implementado en el laboratorio de máquinas y herramientas del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica*, Sangolquí: ESPE, 2014.
- [17] J. G. Wistreich, «The fundamentals of wire drawing,» *International Materials Review*, vol. 3, pp. 97-142, 1958.
- [18] P. Gawali, S. C. Sharma y A. Khare, «Variation in Properties due to speed in Cold Wire Drawing,» *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*, vol. 6, n° 3, pp. 481-486, Septiembre 2018.
- [19] M. Suliga, «The effect of drawing speed on force parameters in multipass drawing,» *METAL*, pp. 494-500, 25-27 Mayo 2016.
- [20] M. Chicaza Rocha y C. Morales Iza, *Diseño y construcción de una máquina trefiladora con sistema rebobinador de alambre continuo para el laboratorio de procesos de manufactura*, Sangolquí: ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas, 2019.
- [21] C. Maldonado y J. Topoanta, *Diseño y Construcción de una trefiladora manual para el laboratorio de conformado mecánico de la facultad de ingeniería mecánica*, Quito: Escuela Politecnica Nacional (EPN), 2021.
- [22] BIRT-LH, «TFM08-Procesos de fabricación por corte y conformado,» Recuperado: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM08/es_DFM_TFM08_Contentos/website_145_mquinas_de_estirado_y_trefilado.html
- [23] M+E Machine + Engineering, «Ultra-fine Wire,» Recuperado: <http://www.meitaly.biz/ultrafine.html>
- [24] U. Scharer, *Trefilado de Metales*, Ciudad de México: Cidi UNAM, 2003.
- [25] B. Shigleys, *Mechanical Engineering Design*, Ciudad de México: McGrawHill, 2010.
- [26] A. I. Obi y A. K. Oyinlola, «Frictional characteristics of fatty-based oils in wire drawing,» *Wear*, vol. 194, n° 1-2, pp. 30-37, 1996.
- [27] S. M. Byon, S. J. Lee, D. W. Lee, Y. H. Lee y Y. Lee, «Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process,» *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 21, n° 1, pp. 104-110, 2011.
- [28] M. C. Ruiz, J. Verde, A. Andrés, J. Viguri y A. Irabien, «Environmental assessment of lubricants before and after wire drawing process,» *J. Hazard. Mater.*, vol. 85, n° 3, pp. 181-191, 2001.
- [29] A. Trukhanovich y A. Ledneva, «Lubricants for dry wire drawing,» *Steel Transl.*, vol. 39, n° 6, pp. 510-511, 2009.
- [30] P. F. Thomson, «The promotion of fluid lubrication in wire drawing,» *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 8, n° 3, pp. 23-27, 1956.
- [31] G. Johnson y W. Cook, «A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high,» *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541-546, 1983.
- [32] D. Steinberg y C. Lund, «A constitutive model for strain rates from 10⁻⁴ to 10⁶ s⁻¹,» *Journal de Physique. Colloques*, vol. 3, n° 3, p. 49, 1988.

- [33] G. Cowper y P. Symonds, «Strain hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams,» Tech. Rep., Brown University Division of Applied Mathematics, 1957.
- [34] A. K. F. Hassan y A. S. Hashim , «Three Dimensional Finite Element Analysis of Wire,» *Universal Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, nº 3, pp. 71-82, 2015.
- [35] J. A. Riera, Tensiones Residuales en Alambres de Acero Trefilado, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [36] H. Moo Baek, Y. G. Jin, S. K. Hwang, Y.-T. Im, I.-H. Son y D.-L. Lee, «Numerical study on the evolution of surface defects in wire drawing,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, nº 4, pp. 776-785, 2011.
- [37] S. Cabello, V. M. Masias Biffi y A. V. Pinto Pernía, *Diseño de un programa interactivo para la selección de las series en el trefilado de aceros al carbono*, Naguanagua: Universidad de Carabobo, 2009.
- [38] M. Suliga, R. Wartacz y J. Michalczyk, «The Influence of the Angle of the Working Part of the Die on the High Speed Drawing Process of Low Carbon Steel Wires,» *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 62, nº 2, 2017.
- [39] S. Weygand, H. Riedel, B. Ebernard y G. Wouters, «Numerical simulation of the drawing process of tungsten wires,» *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 24, nº 4, pp. 338-342, 29 Octubre 2005.
- [40] G. A. Santana, E. F. dos Santos, L. K. Kabayama, E. S. Guidi y F. A. Silva, «Influences of different die bearing geometries on the wire-drawing process,» *Metals*, vol. 9, nº 10, 2019.

Diseño y modelado computacional de un sistema de ventilación para disminuir el riesgo de contagio de Covid-19 en aulas universitarias

Sofía Holguín-Briceño¹
Jorge Andrés León²
Andrés Eduardo Penagos-Carranza³
Brian David Zapata-Henao⁴
Camilo Jesús Marín-Jiménez⁵
Carlos Mario Morales-Ramírez⁶
Cristian Alejandro Castrillón-Ayala⁷
Cristian Alejandro Hernández-López⁸
Juan Felipe Rodríguez-Navarro⁹
Juan Pablo Ariza-Hernández¹⁰
Julián Ricardo Rodríguez-Suesca¹¹
Julián Santiago Serrano-Rincón¹²
Nicolás David Ávila-Rey¹³
Sara Valentina García-Martínez¹⁴
Sebastián Cardona-Pesca¹⁵
Sergio Daniel Cardozo-Franco¹⁶
Aldo Germán Benavides-Moran¹⁷
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Cada vez se hace más evidente la necesidad de una reapertura económica, lo que implica, entre otras cosas, la reapertura de los centros educativos. El reciente receso que ocasionó la pandemia de Covid-19 ha complicado la realización de actividades con aglomeraciones en espacios cerrados, puesto que favorecen las altas concentraciones de aerosoles en el ambiente que están fuertemente relacionados con el contagio del virus. En este capítulo se plantea el proceso de diseño de un sistema de ventilación que disminuye la probabilidad de contagio del SARS-CoV-2 en espacios cerrados. El plan piloto estudia un aula ubicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, el cual cuenta con tasas de renovación de aire insuficientes para un retorno a clases seguro. Mediante cálculos teóricos de las cargas y flujos de aire y la implementación de software comercial, se aseguró que el sistema cumpla con los estándares y últimas recomendaciones sobre ventilación para la disminución de contagio. Como resultado se obtuvo un diseño de un sistema de extracción local que permite una renovación completa del aire del recinto cada 10 minutos. Posteriormente, el diseño se comprobó mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional, en las cuales se rastrearon, de manera indirecta, las partículas del Covid-19 a través del seguimiento de la concentración de CO₂ emitido por las personas. Se puso en evidencia que dentro de un aula ocupado por 24 personas es posible difundir el CO₂ lo suficientemente rápido como para que no se mezcle el aire contaminado entre estudiantes.

¹ Contacto: sholguinb@unal.edu.co

² Contacto: jaleonva@unal.edu.co

³ Contacto: apenagosc@unal.edu.co

⁴ Contacto: bdzapatah@unal.edu.co

⁵ Contacto: cjmarinj@unal.edu.co

⁶ Contacto: cmmoralesra@unal.edu.co

⁷ Contacto: crcastrillona@unal.edu.co

⁸ Contacto: criahernandezlop@unal.edu.co

⁹ Contacto: jfrodriaguezna@unal.edu.co

¹⁰ Contacto: jarizah@unal.edu.co

¹¹ Contacto: jrrodriguezsu@unal.edu.co

¹² Contacto: jserranor@unal.edu.co

¹³ Contacto: navila@unal.edu.co

¹⁴ Contacto: sgarciama@unal.edu.co

¹⁵ Contacto: sebcardonapes@unal.edu.co

¹⁶ Contacto: sdcardozof@unal.edu.co

¹⁷ Contacto: agbenavidesm@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de aire es un parámetro clave en la cadena de transmisión de enfermedades virales en interiores y, por esto mismo, se tienen en cuenta distintos factores de diseño al interior de un edificio para garantizar una ventilación y calidad de aire óptimas. Sin embargo, como humanidad nos hemos visto enfrentados a la imposibilidad de llevar a cabo ciertas actividades dentro de edificios de empresas, colegios y universidades a lo largo del mundo, ya que desde hace más de un año se padece la crisis sanitaria derivada de la infección por vías respiratorias causada por el virus Sars-CoV-2.

A raíz de la pandemia han surgido desarrollos tecnológicos para la ventilación de espacios que brindan la posibilidad de volver a los interiores de estos edificios. Estos desarrollos permiten protegerse, no sólo del clima y la temperatura, sino del contagio de enfermedades respiratorias por gotículas y/o aerosoles. Adicionalmente, algunas organizaciones, en particular la ASHRAE, reconocidas mundialmente en el sector de la ventilación han expedido recomendaciones con respecto a la ocupación de recintos y el manejo de la calidad del aire por la pandemia [5-8].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, en este documento se presentará el desarrollo del sistema de ventilación de bajo costo propuesto por el semillero de investigación FLUMEX para mejorar las condiciones de ventilación en los salones del edificio 453, Aulas de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, como respuesta a la problemática presentada por el virus. Se planteó como objetivo del proyecto el desarrollo de un sistema de ventilación capaz de maximizar la ocupación de un salón de clase, garantizando un bajo riesgo de contagio para acelerar el retorno a las aulas. Conjuntamente, se quiere construir un precedente para el desarrollo de confort térmico, pero bioseguro en espacios cerrados en el país e incentivar la solución de este reto ingenieril que supone disminuir el riesgo de contagio en caso de un brote posterior.

Este proyecto se enmarca en el reto INGnova, para el cual se llevó a cabo una investigación exhaustiva sobre los antecedentes, la dinámica de contagio del virus y métodos de disminución del riesgo de contagio, así como realizar consultas a normas y recomendaciones actuales. Posteriormente, se elaboró una propuesta basada en sistemas ya instalados y probados, lo cual nos llevó al diseño del prototipo. Cada decisión ingenieril está respaldada por simulaciones realizadas con dinámica de fluidos computacionales CFD, que complementan el proceso de prototipado. Finalmente, ya se tiene planeada la construcción del mismo y la medición de parámetros claves por medio de técnicas adquiridas gracias a expertos y dispositivos adquiridos con los recursos de la convocatoria.

Se considera que la pregunta no es si va a llegar otra pandemia similar, es ¿cuándo? Probablemente no en un par de décadas. De todas formas, es imperativo tomar la señal de alarma actual, reconocer la incapacidad de combate y corregirla.

2. MARCO REFERENCIAL

En la literatura se encontraron dos categorías de documentos: investigaciones previas del tema y proyectos similares. En el primer grupo, se encontraron varios estudios sobre la probabilidad de contagio en espacios cerrados para el Covid-19. Por otra parte, se evidenciaron varios proyectos similares que brindan una idea de lo que actualmente se ha desarrollado tecnológicamente para combatir el problema.

2.1 Contagio de Covid-19

En [1] se presenta una revisión del estado de la aero-biología entendida como *el estudio de los procesos que involucran el movimiento de los microorganismos en la atmósfera desde una locación geográfica a otra*, teniendo en cuenta que este virus tanto como otros puede ser transmitido por gotículas y aerosoles. Estas gotículas representan un problema porque son tan pequeñas que pueden estar suspendidas hasta una semana después de su expulsión en el ambiente, lo cual se traduce en un riesgo de contagio alto para un mayor número de personas.

En los edificios de oficinas y salones se encuentra que no existe normalmente el suficiente control sobre la ventilación, por lo tanto, sus ocupantes están altamente expuestos a bacterias, virus y hongos. Los factores condicionantes para la transmisión por aerosoles son la temperatura y la humedad relativa del aire. Aunque actualmente se ha encontrado que, por ejemplo, la influenza se transmite en ambientes fríos y secos, la relación exacta entre humedad relativa (y demás propiedades del fluido) con la tasa de contagio de los virus y bacterias no se conoce. En [9] se reporta que el límite de supervivencia para virus envueltos y no envueltos en lípidos es en un rango entre 40% y 70%, lo cual demuestra que no existe claridad para definir condiciones seguras o no seguras. Dada la variedad de agentes contaminantes se identifican dos retos principales para superar, Prevenir la infiltración y la transmisión.

En el contexto de la problemática, normalmente muchos de los dispositivos para la ventilación (e.g. ductos, humidificadores, serpentines de enfriamiento) sirven de agentes continuos de infiltración y desplazamiento de aire contaminado, puesto que un individuo contaminado que entre en contacto con el sistema de circulación de aire propagara los agentes contaminantes. La enfermedad Covid-19 ha presentado un alto porcentaje de pacientes asintomáticos, sin embargo, ha generado alrededor de 2,58% de mortalidad en el país [10], lo cual justifica aún más el control epidemiológico a futuro. Por último, se encontró que existen algunas acciones para reducir el riesgo de contagio por aerosoles de los ocupantes de edificios. Entre otras, es necesario [1, 2]:

- Revisar periódicamente los sistemas de ventilación en las instalaciones para asegurar que funcionen adecuadamente.
- Incrementar el grado de filtración a efectividad MERV. (*Minimum Efficient Reporting Value*) Asegurar que el personal de mantenimiento tenga entrenamiento apropiado para operar y mantener el sistema HVAC.
- Presurizar el edificio cuando sea económicamente factible.

2.2 Proyectos similares y trabajos previos

El interés por la verificación de condiciones óptimas de ventilación en la región se ha visto desde tiempo atrás. Por ejemplo, un estudio realizado por la Universidad Piloto [11] concluye que *no basta con realizar mediciones cualitativas preliminares, ni tener sellos certificadores, sino que se requiere de mediciones cuantitativas [...] para recomendar acciones correctivas y/o anticiparse a posibles problemáticas [...] en relación con la contaminación atmosférica, por incidencias del espacio urbano y fuentes móviles exteriores evidenciadas inclusive en proyectos sostenibles*. Más aún, la muestra principal es nuestra inhabilidad en mantener actividades educativas y laborales durante tiempos de pandemia. No existen hoy en día mecanismos que garanticen una baja probabilidad de contagio y bienestar en sus ocupantes a tal punto de reabrir los centros, sin antes obtener una inmunidad de rebaño. Como estudios relacionados con la problemática se destacan:

- La investigación en [11], que busca evaluar la calidad de aire y confort térmico en tres edificios de oficinas de Bogotá que cuentan con medios de ventilación natural; dos de ellos cuentan con prestigiosas certificaciones ambientales. Los edificios evaluados fueron Positiva, Terpel y Proksol. Los resultados obtenidos indican que los edificios con sellos certificados cuentan con unos parámetros inadecuados tanto en confort térmico como calidad del aire. Curiosamente el edificio Proksol, el único que no cuenta con una certificación ambiental, fue el que mejor desempeño tuvo en los criterios tenidos que se evaluaron.
- Una investigación desarrollada por la Universidad La Gran Colombia busca estudiar los problemas de confort térmico en edificios de Bogotá y toma como caso de estudio la torre Colpatria. Se encontró que el ambiente térmico de las oficinas no es adecuado, las oficinas prácticamente no tienen ventanas (no tienen escotilla o si las tienen, se encuentran en lugares difíciles de alcanzar) y cuenta con ventiladores que provocan recirculación del aire [12].
- En un estudio realizado por la Universidad América, en el cual se realizó un análisis sobre la calidad del aire y confort térmico del edificio Acaire, ubicado en el barrio Quinta Camacho de Bogotá, reportó que los parámetros de contenidos de CO₂ y partículas de suspensión PM_{2.5} están por fuera del rango

adecuado. Por medio de encuestas de satisfacción térmica hechas a sus ocupantes se determinó que el edificio carece de confort térmico. Este estudio concluyó que la mejor alternativa para solucionar los problemas de calidad de aire del edificio es el diseño y construcción de un sistema de ventilación mecánico (el edificio solo contaba con mecanismos de ventilación natural). También se recomienda el uso de sensores de CO₂ y PM_{2.5} [13].

- La ASHRAE publicó un documento de posicionamiento sobre el Covid-19 y el uso de tecnologías de ventilación para la disminución de su contagio. De todas formas, aunque a través del documento se listan las diferentes tecnologías por ahora existentes se evidencia una falta de articulación de un sistema global diseñado específicamente para este fin. Es por ello que, aunque existan tecnologías ampliamente estudiadas como la radiación UVGI, el aislamiento de cuartos para transmisión por aerosoles AIR, filtración mejorada MERV y extracción local de la fuente; no existen condiciones ni una integración de todas lo suficientemente útil para implementar, escalar y resolver el problema actual. Este no se queda con este tipo de virus, puesto que existen muchísimas formas de contagiar por aerosoles y gotículas en el ambiente [3].
- En el instituto Max Planck se desarrolló un manual de aplicación sobre un sistema de bajo costo diseñado y probado en Alemania (MainzBretzenheim) por medio de simulaciones CFD y medidas tomadas en salones por medio de medidores de CO₂ y un contador óptico de partículas. Se muestran los resultados de simulaciones computacionales y la concentración de CO₂ en el recinto con y sin la instalación del sistema de campanas, demostrando que este último contribuye a la extracción del CO₂, un agente clave en la propagación del virus. Además, las corrientes convectivas generadas por cada estudiante en reposo hacen circular el aire de su exhalación hacia el techo del salón que es capturado así por las campanas. Este es un ejemplo de la extracción local por fuente (posible virus) que se habla en el ítem anterior [14].

2.3 Dinámica de Fluidos Computacional CFD

Para el desarrollo de simulaciones previamente se revisaron artículos relacionados con la transmisión interpersonal (mecanismo estudiado para los salones de clase) y la simulación en espacios hospitalarios para familiarizarse con la simulación CFD en recintos.

En salones con ventilación mecánica apreciable, solamente por el proceso de respiración de las personas el contacto con partículas de otras personas es muy bajo. El porcentaje de re-inspiración de aire en la inhalación siguiente es del 10% y 0% por nariz y boca respectivamente. Por último, al enfrentar a dos personas cara a cara pueden existir posibilidades de infección por contaminantes vía aerosoles (que recorren altas distancias y duran un tiempo considerable suspendidas en el aire). Sin embargo, la dinámica del aire es altamente direccional lo que quiere decir que una ventilación de desplazamiento de masa tiene efecto en la exposición de un ocupante a otro en materia de aire exhalado (en respiración, así como en un estornudo), como lo muestra la Figura 1.

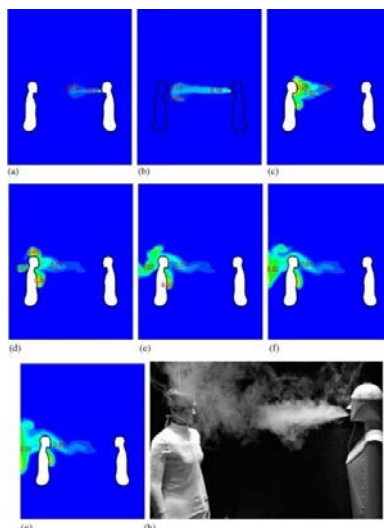


Figura 1. Simulación de estornudo por fracción másica de aire expulsado después de un estornudo: (a) $t = 0,5s$, (b) $t = 1,0s$, (c) $t = 1,5s$, (d) $t = 2,0s$, (e) $t = 2,5s$, (f) $t = 3,0s$, (g) $t = 3,5s$, (h) tomada de [15]

En [1] se muestran algunos de los tipos de resultados propios de simulaciones en CFD, de todas formas, [16] recomienda que es necesario tener en cuenta las condiciones de ventilación especial para cada recinto. Añadido a esto, se integra un modelo termodinámico a la dinámica de dispersión de gotículas en el estornudo/tos teniendo en cuenta la transferencia de calor y posible evaporación de *estas*. Se concluye que, dado su volumen las partículas más grandes caen por debajo de la zona de respiración por gravedad mucho antes de hacer contacto; existe penetración lateral de partículas más pequeñas en inyecciones de volumen producto del fenómeno 2,5-5,0 l.

A través de toda la literatura consultada, las simulaciones muestran una herramienta indispensable y poco utilizada para la simulación de estos fenómenos en aplicaciones críticas. Presentan una luz frente al complejo panorama de la dinámica de fluidos en contaminación y fundamentan un buen precedente para futuras investigaciones. Para el presente proyecto se busca utilizar la información recolectada para implementar un prototipo de sistema de ventilación diseñado bajo las condiciones específicas del espacio para disminuir la probabilidad de contagio del virus.

Con respecto a los salones, [17] presenta en el contexto del Covid-19, un acercamiento para las líneas de flujo de aire en cuartos de aislamiento en hospitales. Idealmente, en un salón de clases se esperaría tener condiciones de ventilación lo más similares posible a estos recintos, pero económicamente sostenibles. Se hace uso de modelos para flujo laminar-transicional por medio de SST k- ϵ , junto con cuatro ecuaciones diferenciales para modelar la transición de flujo laminar a turbulento, como se observa en la Figura 2. También [17] reporta el procedimiento y ejemplos de enmallado, simulando el esparcimiento de un desinfectante en un cuarto de presión negativa.

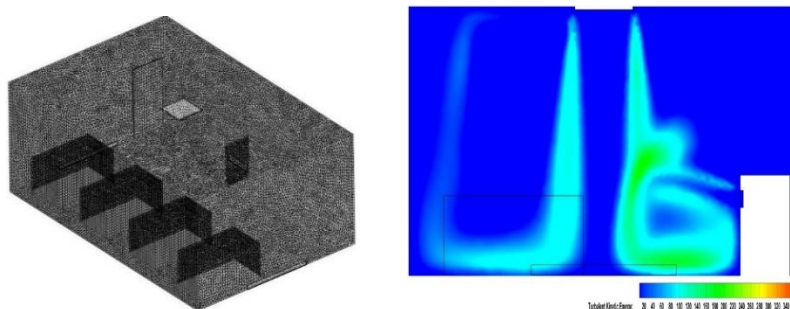


Figura 2. Resultados de diferentes etapas de simulación CFD tomadas de [17]: a) Enmallado de un salón tridimensional de hospital, y b) Resultados de energía cinética con inyección de aire por HVAC y un dispensador de desinfectante

3. MÉTODO

3.1 Identificación del problema

Para el desarrollo del proyecto, se propone la implementación de un prototipo para mejorar la ventilación de un salón del Edificio 453- Aulas de ingeniería. Existe una etapa de dimensionamiento para poder diseñar tanto el sistema de ventilación como ir construyendo un modelado computacional para la simulación de todos los prototipos de salones existentes, que se mostrará más adelante.

Cabe resaltar que, aunque el lugar de aplicación elegido es actualmente un único edificio con características de infraestructura/ventilaciones específicas, se ha pensado en la posibilidad de que el sistema sea escalable a la mayoría de las instalaciones de la universidad. De todas formas, gracias a la bibliografía estudiada en 2.1, se estableció que el problema principal a resolver es el esparcimiento de partículas lo suficientemente pequeñas, que son capaces de permanecer en el aire incluso hasta por una semana en espacios como los salones de clase [18].

Adicionalmente, ya que no existe un común denominador en la respuesta inmunológica de las personas para el Sars-CoV-2 que se haya podido determinar y la situación de alto porcentaje de asintomáticos, se necesita un control del aire exhalado en todo momento y mantener unos niveles de concentración de CO₂ para disminuir las posibilidades de contagio [3, 4, 17].

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, se hace evidente la importancia de responder a la pregunta: ¿cómo desarrollar un sistema de ventilación que proporcione el flujo suficiente para disminuir el contagio del virus, y controlar la ocupación del espacio sin interrumpir las actividades de clase en los salones? Para responder esta pregunta es necesario:

- Establecer los parámetros de ventilación necesarios para mantener condiciones bioseguras según la información más actualizada de la transmisión del virus.
- Fijar los criterios de medida para poder controlar la ocupación de los espacios, teniendo en cuenta la existencia de imprevistos que determinen condiciones poco favorables para la presencialidad. Desarrollar y seleccionar los equipos y el montaje necesario para satisfacer las condiciones de diseño.
- Construir y evaluar el funcionamiento del prototipo.
- Validar la utilidad del prototipo por medio de simulaciones CFD para verificar su efectividad.

3.2 Diseño del sistema

El proyecto se divide en dos secciones importantes, un proceso de diseño e implementación, y una computacional de validación de diseño. Por una parte, el proceso de diseño del sistema de ventilación es desarrollado a partir de mediciones experimentales (físicas y de ventilación), línea de cálculos y uso de software especializado; junto a lo anterior, la caracterización y correcta selección de materiales y equipos para el ensamble. Conjuntamente, la distribución de las campanas y posicionamiento de rejillas, así como la verificación de efectividad del sistema va fundamentado en simulaciones explicadas más adelante. A continuación, se describen los métodos y procedimientos desarrollados.

3.2.1 Caracterización del aula

Se caracterizaron los tipos de espacios donde trabajará el sistema; adicionalmente se empleó la técnica de trazado de CO₂ con el objetivo de determinar la probabilidad de contagio que existía en el aula de no hacerse ninguna modificación.

- *Toma de Medidas:* Para la selección del aula piloto se tipifican los diferentes espacios presentes en el edificio 453 Aulas de Ingeniería en la Universidad Nacional de Colombia en su sede Bogotá. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para dicha selección son:

1. Localización de entradas y salidas de aire en el salón:

- 1 Puerta de entrada al salón
- 2 Ventanas con posibilidad de apertura

2. Configuración de ventanas:

- Tamaño
- Cantidad de Ventanas y su ángulo de apertura

Dada la contingencia actual fue necesario acceder al campus con un permiso oficial donde fue posible medir cada uno de los espacios con una cinta métrica convencional.

- *Trazado de CO₂:* Mediante el uso de diferentes clases de sensores de concentración de CO₂, se llevó a cabo el cálculo experimental de la cantidad de cambios de aire por hora ACH en el salón piloto. Los sensores adquiridos fueron los Sense Air Residential 8 conectado a un Arduino UNO acoplado con un Shield con un display y puerto USB para energizar ya sea con una batería o un celular. El proceso de construcción y materiales se encuentran en el portal de Aire Ciudadano [19]. En la Figura 3 se muestra el sensor ensamblado.

Se empleó el método de inyección de CO₂ por medio de una combustión controlada ubicando sensores en las 4 esquinas del salón y uno en el centro.

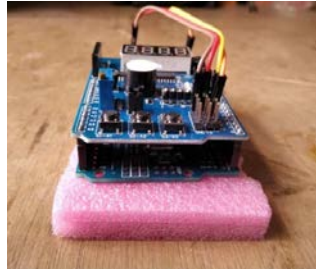


Figura 3. Sensor de CO₂ [19]

En primera instancia se calibraron los sensores con la tasa base de concentración de gas presente en el ambiente de Bogotá. Las mediciones promediaron aproximadamente 400 ppm entre los sensores, acto seguido utilizando alcohol industrial (CH₃-CH₂-OH) se realizó una combustión en un recipiente de manera controlada.

Con la combustión iniciada se cerraron las entradas de aire del salón (puertas y ventanas) y se esperó a que los sensores indicaran una concentración superior a 3000 ppm. Una vez se alcanzó la concentración mencionada se procedió a apagar la combustión y abrir las ventanas del salón. Se tomó el tiempo que tardaron los sensores en volver a 400 ppm y se registraron los datos.

El cálculo y medición se hizo basado en [20] que se puede resumir en los siguientes 5 pasos. Cabe aclarar que para la opción 3 se decide usar el modelo de decaimiento:

1. Hacer levantamiento de las mediciones del salón.
2. Desarrollar los chequeos visuales y auditivos del recinto.
3. Medir o estimar la tasa de renovación de aire.
4. Comparar los resultados con el objetivo (normas).
5. Considerar ajustes necesarios o estrategias de limpieza del aire.

El punto más importante es la estimación y medición. Por lo tanto, su desarrollo consiste en la inyección de gas y el decaimiento en diferentes escenarios.

- Calibración de los sensores según el protocolo de [19] Selección de un periodo de toma menor a un minuto.
- Toma de medidas en el aire libre donde se maneja una concentración promedio de 400 ppm
Posicionamiento de sensores
- Carga de CO₂ por medio de hielo seco donde los sistemas mecánicos deberán ser apagados. Hasta una concentración de al menos 2000 ppm¹⁸.
- Dejar que la concentración disminuya hasta un 37% (1/e) tomando la menor tasa de salida y entrada de personas posible¹⁹.
- Se recomienda repetirlo con ventanas y puertas cerradas, con algunas ventanas y puertas abiertas o configuraciones posibles. Y otras aulas para poder contrastar el comportamiento del aire en el edificio.
- Señalar el punto máximo (de acuerdo con el momento de quitar la fuente de gas) y buscar el punto de finalización según el criterio. Tomar los tiempos inicial y final, las concentraciones correspondientes y calcular los ACH con la siguiente expresión (1)²⁰.

$$ACH = \frac{-1 \times \ln\left(\frac{C_2 - C_a}{C_1 - C_a}\right)}{t_f - t_0} \quad (1)$$

¹⁸ Aunque se recomienda desarrollar la inyección se opta por utilizar la combustión controlada en el recinto de (H₃C-CH₂-OH)

¹⁹ Este porcentaje es basado en la diferencia del pico y la concentración base del ambiente.

²⁰ Tiempo en horas. C_a ambiente. C₁ concentración pico. C₂ concentración al 37%

3.2.2 Cálculo de cargas térmicas y movimiento de aire

Basado en las características físicas, climáticas y de aforo del salón se hace el cálculo de la extracción necesaria de aire para poder proveer de 6 cambios de aire del recinto cada hora ACH, necesarios para una buena ventilación [7]. Además del control térmico para confort de los estudiantes. De cierta manera, la extracción de volumen de aire creará un flujo interno suplido por rejillas de ventilación cuya selección será mostrada en resultados.

Con la utilización del Software Elite CHvac 8 se calcula una carga preliminar teniendo en cuenta la temperatura promedio de Bogotá tanto bulbo húmedo como bulbo seco. Para el cálculo se toman 20,1°C DB y 13,4°CWB. Con un requerimiento de calidad de aire clase 3 equivalente a 8,6L/s/persona según la tabla 6-1 de [7]. Con una tasa metabólica pequeña de trabajo medio en oficina produciendo respectivamente 70 y 45 W [21] de calor sensible y latente respectivamente. Además, la configuración física del salón tiene las condiciones de la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de tipos de paredes y particiones añadidas al CHvac

Componente	ASHRAE	Factor-U	Altura (m)	Largo (m)	Dirección	Descripción
Techo	1	0,715	6	7,1	N/A	200 mm de concreto liviano
Pared Fachada delgada	B	0,8347	2,7	1,7	NE 45°	Pared de concreto delgado 150 mm, con pañete exterior y acabado interior
Pared Fachada y tablero gruesa	A	0,7382	2,7	5,4	NE 45°	Pared de concreto gruesa 300 mm con pañete sin acabado interior
Marco de las ventanas	G	1,5331	2,7	1,7	NE 45°	Marco de metal sin acabado solamente con revestimiento exterior
Partición de ladrillo hacia corredor	N/A	1,9363	2,7	6,05	Partición	Partición de ladrillo de 300 mm cara común sin acabado
Puerta	G	0,516	2,02	1,45	Puerta	Cortina de metal
Pared división delgada entre salones	B	0,8347	2,7	1,7	NE 45°	Pared de concreto delgado 150 mm, con pañete exterior y acabado interior

En consecuencia, se añaden de vidrios, solamente existe una clase con coeficiente de transferencia de calor U equivalente a 1 y un coeficiente de sombra de 0,55. Hace parte de las cualidades de un vidrio sin mayor tratamiento o aislamiento término ni lumínico, de un espesor aproximado de 4,8mm. En el salón los vidrios se encuentran en la fachada con 4 paneles pequeños 0,34 × 0,84 dentro de 2 paneles más grandes de 1,17 × 1,75 y uno extra de 1,57 × 1,75. Para el cálculo de las pérdidas en la tubería y pérdidas menores se utilizaron los datos de la Tabla 2 y teniendo en cuenta el esquema que se ve en la Figura 4.

Tabla 2. Datos para cálculo de pérdidas

$Q(Ls)$	248
$\mu_{@25^{\circ}C} \left(\frac{Ns}{m^2} \right)$	$2,37 \times 10^{-5}$
$\rho_{Bogota@25^{\circ}C} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	0.895
$\epsilon (m)$	$917,4 \times 10^{-6}$
$h_c (Pa)$	45
$h_D (Pa)$	2
$L_1 (m)$	1.815
$L_2 (m)$	5.375
$L_3 (m)$	2.653
$D_{auxiliar} (in)$	5
$D_{central} (in)$	12
K_1	1

Recordando que para la obtención de las pérdidas por tuberías se debe tener en cuenta que las tuberías auxiliares son paralelas entre sí, únicamente se debe tener en cuenta la pérdida en una sola, luego el tubo central se divide en dos partes separadas por el codo, mientras las pérdidas menores se presentan por el codo, la expansión del tubo auxiliar al central y el damper.

La velocidad en los tubos y el número de Reynolds en cada uno de los diámetros se calculan con las ecuaciones (2) y (3) respectivamente, donde n es el número de tubos.

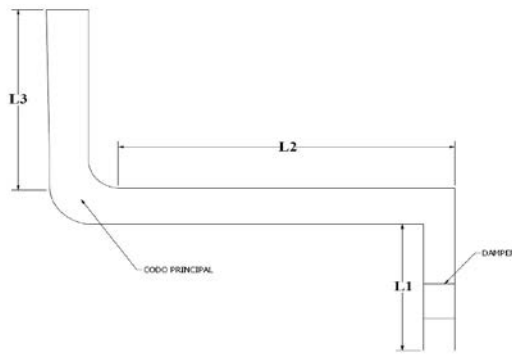


Figura 4. Esquema para el cálculo de las pérdidas para el ramal en paralelo más alejado del ventilador

$$V_i = \frac{4Q}{n(\pi D_i^2)} \quad (2)$$

$$Re_{D_i} = \frac{V_{D_i} D_i \rho}{\mu} \quad (3)$$

El factor de fricción f de cada tramo por medio de la fórmula de Haaland y sus respectivas cabezas de pérdidas totales para su conversión a Pascales se calcula con las ecuaciones (4) a (6).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{(\epsilon/D_i^2)^{1.1}}{3.7} \right) \right) \quad (4)$$

$$h_L = \left(f_1 \frac{L_1}{D_1} + K_1 \right) \frac{V_1^2}{2g} + \frac{h_D}{\rho g} + \left(f_2 \frac{L_2+L_3}{D_2} \right) \frac{V_2^2}{2g} + \frac{h_C}{\rho g} \quad (5)$$

$$\Delta Pa = h_L \times \rho \times g \quad (6)$$

Con respecto al cálculo anterior y el resultado del análisis del software de ventilación, teniendo en cuenta generación térmica de las personas, las condiciones climáticas de la ciudad a lo largo del año y el requerimiento de ventilación se puede seleccionar un ventilador encontrando un punto de operación que cumpla con el criterio NC para salones estipulado en [22] que igualmente sea capaz de proporcionar el caudal de aire a la presión requerida.

3.3 Simulaciones computacionales

Para complementar el proceso de diseño se realizó una serie de simulaciones mediante el uso de la licencia de investigación del software comercial ANSYS-Fluent versión 2021 R1 y 2020 R2. Los cálculos se realizaron en una Workstation HP Z8 G4 con 14 núcleos y 32 GB de RAM. A continuación, se describe la elaboración de un modelo computacional bidimensional y otro tridimensional.

- *Descripción general:* Ambos modelos CFD simulan un flujo monofásico, incompresible, con temperatura, densidad y viscosidad variables y modelo $\kappa - \omega$ para aproximar la turbulencia. El ruido de trabajo es aire húmedo y se incluye la concentración de dióxido de carbono en una ecuación de transporte como escalar pasivo. Se solucionan en un primer momento los campos de velocidad, presión, energía cinética turbulenta y su tasa de disipación. Los campos de temperatura, humedad y concentración de CO_2 se solucionan posteriormente como escalares pasivos. El modelo se resolvió en estado transitorio hasta un tiempo $t = 60s$ con un $\Delta t = 0,01s$. De esta manera, cada paso temporal deja de calcularse cuando los residuales alcanzan un valor de 10^{-4} . Se utilizó el algoritmo SIMPLEC para el acople de presión y velocidad.
- *Condiciones de frontera: Campo de velocidades y presión:* Debido al uso de los dampers, que se calibran para que la distribución de flujo en las campanas sea uniforme, se consideraron condiciones de flujo másico de salida uniforme de $0,016 kg/s$ a través del ducto de extracción de cada campana y entrada a presión atmosférica por la ventana. Se llegó a esta condición de flujo másico de salida partiendo del flujo

volumétrico que garantiza el ventilador y multiplicando por la densidad hallada mediante la ecuación de estado de gas ideal ($PV = mRT$), tomando una presión de 75kPa y una temperatura promedio de 300K . Todo el resto del dominio se consideró que tiene condición de no deslizamiento por estar compuesto de paredes.

- *Condiciones de frontera de temperatura, humedad y CO_2* : La temperatura del flujo de aire de entrada es de 293K (20°C), la temperatura de las superficies que representan a los estudiantes y al profesor es de 310K (37°C) y para el resto del dominio se consideró que el salón está aislado y no hay flujo de calor. Sobre la parte superior de los rectángulos, donde se supone que estaría la cabeza de los estudiantes, en el modelo 2D se asumió un flujo másico $8,19 \cdot 10^{-6}\text{kg/s}$ de CO_2 con una concentración del 100%, mientras que en la simulación 3D se puso un flujo másico de $2,04 \cdot 10^{-4}\text{kg/s}$ de aire con una fracción másica de 0,04 para modelar la exhalación de una manera más realista.

En el modelo 2D la concentración de CO_2 en la entrada se supuso de 0 para simplificar el análisis, mientras que en el modelado 3D el flujo de entrada tiene una concentración de 400ppm que es el promedio de entrada del aire atmosférico en la ciudad de Bogotá y que se midió experimentalmente con los trazadores de CO_2 . Con respecto a la humedad, en ambos modelos se utilizó una condición de frontera de entrada de aire con humedad relativa $\phi = 60\%$, y una humedad específica $\omega = 0,0013$, que corresponde a una fracción másica de entrada de 0,00128. Este valor de humedad específica se tomó de una carta psicrométrica a 2500msnm (aproximada a la altura de la ciudad de Bogotá) para los valores de temperatura y humedad relativa previamente dados.

3.3.1 Particularidades del Modelo 2D

Para este modelo se consideró un dominio mucho más sencillo, partiendo inicialmente de una única entrada de aire en la parte de arriba a la derecha, la cual representa una de las ventanas del salón y cuatro salidas que corresponden a cortes horizontales de la geometría simplificada de las campanas según la Figura 5. Los rectángulos pequeños representan una aproximación a la geometría de 4 estudiantes sentados y el rectángulo grande corresponde al profesor de pie. Las campanas se representan de forma rectangular sobre las cabezas de los estudiantes y la extracción se hace a través de la superficie inferior de las campanas. La malla resultante tiene 29 mil celdas. La calidad de esta se evaluó con la métrica de oblicuidad de las celdas (*skewness*), la que alcanzó un valor máximo de 0,38.

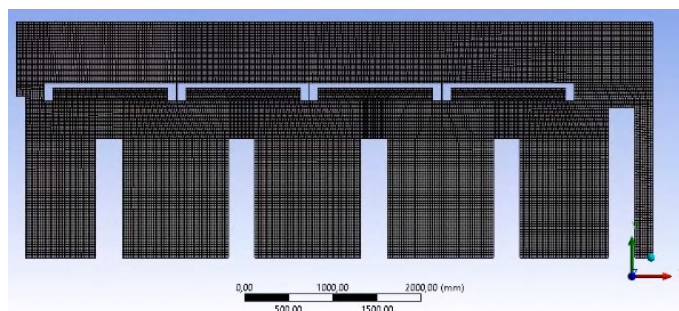


Figura 5. Malla realizada para el modelo bidimensional

3.3.2 Modelo 3D

El modelo más completo que se logró obtener consiste en una representación tridimensional del salón con el sistema de ventilación instalado. El dominio computacional se muestra en la Figura 6a y cuenta con tres entradas en la parte lateral inferior del salón, correspondientes a rejillas de ventilación que se instalarán en la configuración final para un mejor funcionamiento del prototipo y a partir de las cuales se hará la succión. Hay doce salidas que corresponden a los ductos de las campanas de extracción.

Para evitar enmallar todo el sistema de ventilación, y aprovechando que los *dampers* permiten regular el flujo de las campanas de manera que el flujo se distribuya uniformemente, cada campana de extracción cónica descarga hacia la parte superior del dominio.

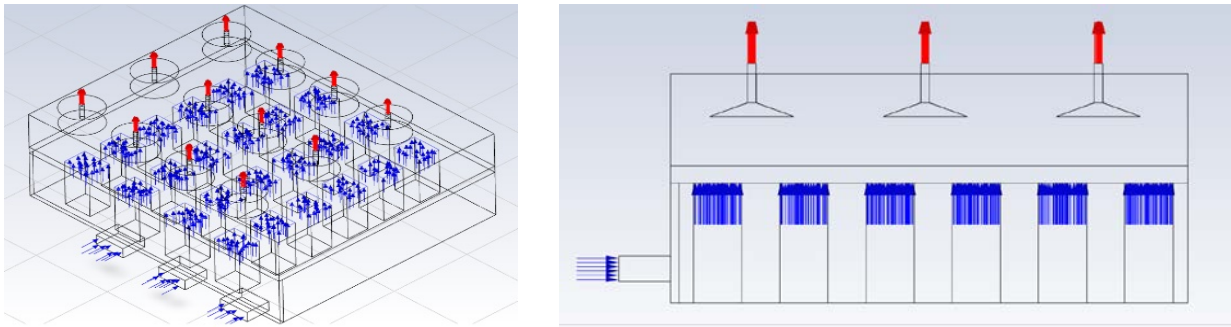


Figura 6. Vistas del dominio computacional de la simulación: a) Dominio computacional con entradas y salidas, y b) Vista lateral del dominio computacional

De manera similar a como se hizo en la simulación 2D, la geometría de 24 estudiantes se simplificó a prismas rectangulares. La superficie superior del paralelepípedo se consideró como la cabeza y a través de esta se aplicaron algunas condiciones de producción de CO_2 que se detallan posteriormente. El flujo se modeló como incompresible, turbulento y dependiente del tiempo. En la Figura 7a se aprecia la geometría exterior de la que se dispuso para ejecutar las simulaciones.

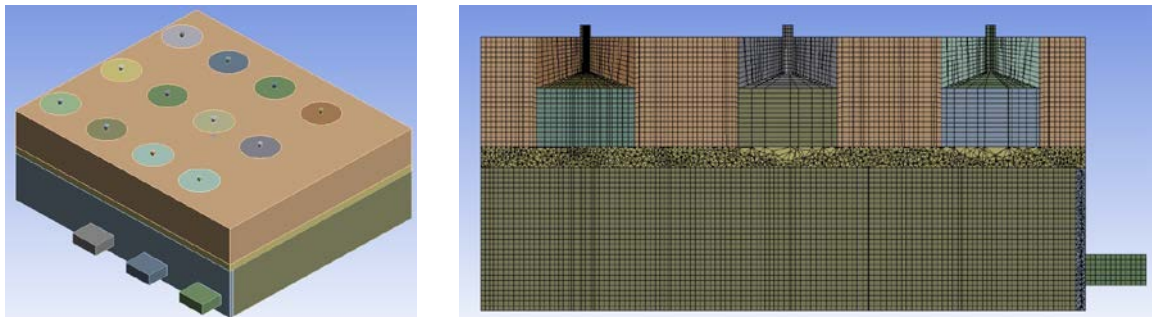


Figura 7. Modelado CAD y enmallado tridimensional dividido en subdominios: a) Modelo CAD dividido, y b) Vista de corte de la malla generada

- *Preprocesamiento:* Para la generación de la malla fue necesaria la división del dominio en subdominios, según la Figura 7a, con el objetivo de dejar la mayor cantidad de celdas hexaédricas posibles, buscando conservar la ortogonalidad de esta. Esto permitió obtener una excelente calidad del enmallado, pues se contó con una cantidad reducida de celdas, con lo cual se logró aprovechar eficientemente los recursos computacionales. La malla generada cuenta con 1530609 celdas y su configuración se aprecia en la Figura 7b.
- *Condiciones de frontera:* Para las condiciones de frontera se impuso una entrada de presión de referencia igual a la presión atmosférica en las caras correspondientes a las rejillas de ventilación y a una temperatura inicial de 293K con una composición de aire normal. Para las condiciones de salida, que son los ductos superiores de las campanas, se consideró un flujo másico constante de 0,016 kg/s para cada una de las doce campanas de extracción.

Para simular la generación de CO_2 producto de los estudiantes, se estableció un ingreso de flujo másico de 2×10^{-4} kg/s con una concentración de CO_2 del 4%, para cada persona suponiendo que en el recinto se encuentra un total de 24 estudiantes sentados, en esta simulación no se cuenta con la presencia de un profesor a diferencia de la simulación 2D.

Este flujo másico de CO_2 se establece a partir de la producción de CO_2 de una persona adulta de 21 a 30 años con un MET aproximado de 2.0 [4]. Adicionalmente se estableció una temperatura corporal promedio de 310K, misma temperatura a la que se encuentra el ingreso de CO_2 .

- *Procesamiento:* Para el procesamiento, en la Tabla 3 se resume la configuración elegida para los esquemas de acople entre presión y velocidad utilizados, los esquemas de integración temporal y demás propiedades de los esquemas utilizados para la solución del modelo.

Tabla 3. Configuración de los esquemas de discretización implementados

Discretización espacial	Esquema
Gradiente	Basado en celdas de mínimos cuadrados
Presión	Estándar
Momentum	Primer Orden upwind
Tasa de disipación turbulenta	Primer Orden upwind
Energía cinética turbulenta	Primer Orden upwind
H_2O	Primer Orden upwind
O_2	Primer Orden upwind
CO_2	Primer Orden upwind
Energía	Primer Orden upwind

4. RESULTADOS

4.1 Distribución de espacios

Las medidas tomadas en la universidad arrojan medidas generales del espacio de $7,1 \times 6 \times 2,66$ (m). Siendo la longitud de 6m la correspondiente a la ubicación del tablero y la pared opuesta. La longitud de 7m corresponde a la pared que contiene las ventanas. En la Figura 8, se muestran esquemas de las medidas espaciales del recinto. Para los resultados de trazado de CO_2 la parte frontal del salón es la pared adyacente a la puerta y los puestos se prevé que estarán lo más alejado posible como en la distribución planteada.

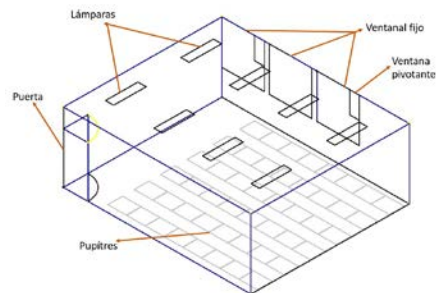


Figura 8. Salón piloto, descripción general de elementos del recinto

4.2 Sistema de Ventilación

De acuerdo con las dimensiones del salón piloto y restricciones arrojadas por el software de cálculo de cargas CHvac 8 el diseño para el sistema de extracción se mostrará en las Figuras 9a, 9b, 9c y 9d.

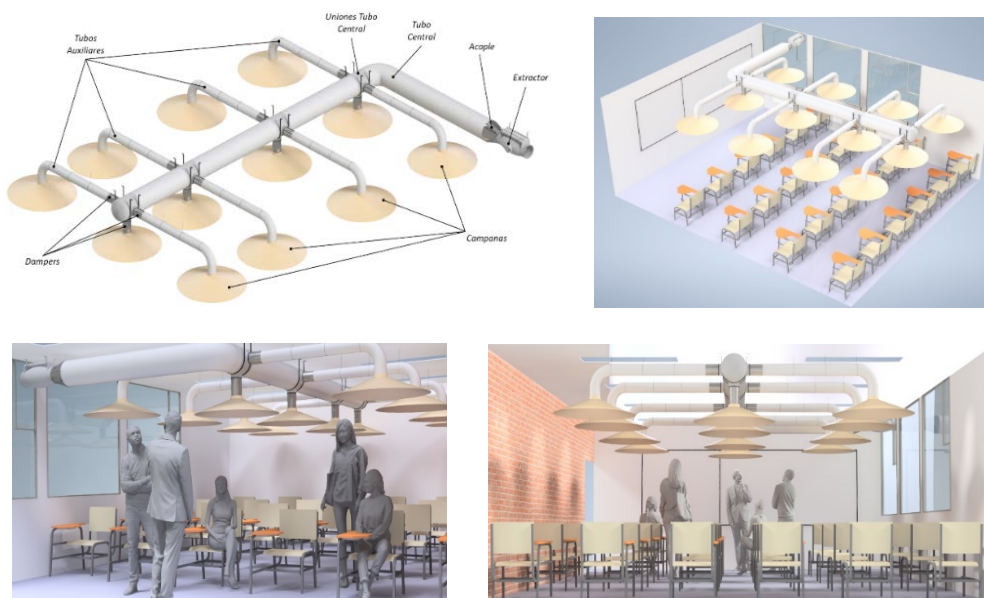


Figura 9. Distribución, descripción y renders del sistema de ventilación: a) Sistema de extracción diseñado, b) Visualización de sistema montado, c) Interior de salón con sistema, y d) Interior de salón con sistema vista trasera

Las piezas que componen el sistema son: Tubo central, tubos auxiliares, campanas, acoplador tubo central-tubos auxiliares, dampers, soportes al techo, extractor y acople.

4.3 Cargas térmicas

Para poder desarrollar el acondicionamiento contando la radiación del sol y energía creada por los objetos y personas en las actividades esperadas se necesitan 248L/s de movimiento de aire con extracción. Equivalente a extraer 0.56, ton con aire exterior basado en el caso extremo de diseño en agosto con una diferencia de temperatura de 14C°. En suma, el calor ganado parte con un factor de seguridad (dado la necesidad de hacer un retorno a clases con las mejores condiciones) de 3000+127W lo último aproximado con la potencia esperada del ventilador²¹. Por ende, el Cooling supply air CSA resulta de la ecuación (7).

$$CSA = \frac{3127}{0.731 \times 1.23 \times 14} = 228 \text{ L/s} \approx 525 \text{ CFM} \quad (7)$$

Se obtienen 5.781L/s/m² si asumimos el área total por ocupante de 43/25 = 1.72m²/p cada persona tendría más de 9.94L/s/p, un valor superior a lo recomendado por [7]. claro está que sería la condición óptima de diseño. La tasa de ventilación verdadera será confirmada experimentalmente tras la instalación.

Por último, teniendo en cuenta los cambios de temperatura se verifican de las condiciones psicrométricas de tal forma que el sistema funcione en las condiciones de mayor adversidad. De manera que, se asume un cambio de temperatura y humedad específica del aire para llegar a condiciones confortables para calcular la cantidad de calor sensible y latente que se produce. TSH es Total sensible heat (ecuación (8)) y TLH Total latent heat (ecuación (9)). El calor total da una suma de 2796W.

$$TSH = 0.731 \times 1.23 \times 248 \times (20.4 - 9.0) = 2542 \text{ W} \quad (8)$$

$$TLH = 0.731 \times 1.96 \times 248 \times (10.2 - 9.7) = 254 \text{ W} \quad (9)$$

De acuerdo con lo anterior es posible constatar que efectivamente el cambio del aire por sus propiedades psicrométricas coincide con la suma total de cargas y disipaciones generadas por las propiedades físicas del salón ingresadas en I. En resumen, las personas y la radiación solar en las condiciones más críticas (agosto 4 de la tarde) acumulan 1765W y 645W el contraste anterior permite predecir que las necesidades de ventilación con respecto al calor generado y una temperatura adecuada tanto para reducir la probabilidad de contagio como para no interrumpir las actividades educativas en este caso es de 1,98kW en promedio. Como en este caso no es necesario usar serpentines de enfriamiento o algún sistema fan-coil el extractor adquirido no solamente conservará el movimiento del aire requerido como ya se ha visto sino mantendrá las condiciones del aire estables reduciendo 994W de calor sensible, 1.85 gH₂O de humedad y 2.62^{circ} C la temperatura.

4.4 Selección del extractor

Dado que según los cálculos del software y verificados para que puedan cumplir el mínimo de ACH necesarios idealmente de 6 [20], [7] se opta por un extractor de la familia *TD- Silent* de la empresa Soler & Palau. La caída de presión resultante en el sistema se puede resumir en la Tabla 4.²²

Con dichos valores y el caudal calculado se cruzan los datos con las especificaciones del fabricante y se llega a la conclusión que la compra de un ventilador más grande como el de referencia 1000/200 no beneficiaría en el criterio de ruido, pero consumiría mayor energía para el mismo punto de operación. Como se aprecia en la Figura 10a el criterio de sonido para ambos ventiladores es igual en los puntos de operación más cercanos al de diseño (hacia el más ruidoso) que está reportado por el fabricante.

²¹ Si se contrasta con la selección final los valores solo varían poco probablemente por el cambio de eficiencia que se asumió en el diseño como de 90%.

²² Ramales auxiliares 2,3. Secciones centrales (unidas por codo). V velocidad del aire. Re número de Reynolds. f factor de fricción. h_l pérdidas a lo largo de.

Tabla 4. Criterios de caída de presión

Parámetro	Valor
V_1	1.63 m/s
V_2	3.39 m/s
ReD_1	7817
ReD_2	39020
f_1	0.0419
$f_2 = f_3$	0.0294
h_L	6.023m
ΔPa	52.77
Pa	0.21 in wg

Se prevé que el criterio de ruido reduzca considerablemente puesto que los puntos de operación objetivo están a un menor caudal que los puntos morados mostrados en la Figura 10a que son el punto de operación con caída de presión 0 a la máxima velocidad. Por otra parte, las líneas rojas son el punto de operación siguiente con menor caudal para la velocidad máxima (los tres niveles se aprecian en la Figura 10b). Para el mismo caudal el extractor de mayor tamaño consumirá más energía y generará un sonido equivalente pues el real del ventilador con referencia 800/200 estará entre las curvas roja y morada. Se espera que, el extractor consuma poco menos de 104W.

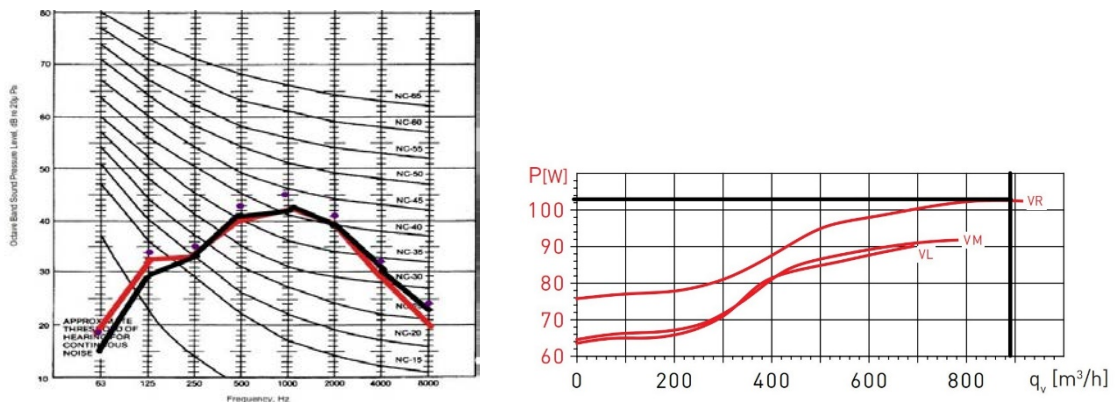


Figura 10. Criterio de ruido y potencia consumida del ventilador seleccionado: a) Niveles de ruido de ventiladores 800/200 en rojo, y b) Potencia consumida por el ventilador TD Silent 800/200 [23] y 1000/200

4.5 Selección de tubería

Se valoraron las siguientes opciones como posible material para los ductos: Polietileno (PE), Policloruro de Vinilo (PVC), aluminio y acero galvanizado. Se seleccionó para el prototipo usar PVC dado su sencilla instalación, peso reducido, facilidad de acople, transparencia y versatilidad en su manejo.

4.6 Dampers

Se decide implementar dampers de tipo mariposa para cada uno de los ramales del sistema con el objetivo de regular el aire absorbido por cada campana.

4.7 Acoplador central-Auxiliar

El diseño del acoplador se genera a partir de los siguientes criterios: Peso reducido y buena rigidez. Para ello se selecciona aluminio 6061 de 1.5 mm de espesor. Como función adicional se plantea que el sistema sea soportado por medio de platinas ancladas al techo y sostenidas sobre los acoples.

4.8 Rejillas de Suministro

Para el ingreso de aire desde el exterior, se seleccionaron rejillas de suministro tipo L-VH/HV, cuyo alcance máximo y criterio de ruido está asociado directamente al caudal de entrada y las dimensiones de las mismas. Para el rango entre 500 – 550 CFM, las rejillas con un área libre de 0,81ft² (0.075m²), presentan un

alcance mínimo de 20 ft (1.86m²) adecuado para el ancho de 6.1 m del salón y un criterio de ruido por debajo de 22. Dentro de las varias posibilidades se eligieron las de dimensiones 16x8 pulgadas.

En la Tabla 5 se observan los materiales empleados para el desarrollo del prototipo junto con sus precios estimados, esto permite obtener un valor neto de \$6.803,300 COP.

Tabla 5. Costos totales de ductos y accesorios

Pieza	Precio (COP)
Ductos	2.304.000
Campanas	480.000
Acoples	1.480.000
Extractor TD Silent 800/200	1.223.700
Dampers	856.800
Rejillas de suministro	458.800
Total	6.803.300

4.9 Trazado de CO₂

Una vez se terminó la toma de datos se procedió a graficar la concentración de CO₂ con respecto al tiempo para cada uno de los sensores ubicados en el salón. Una vez procesados los datos se obtuvo la información que se muestra en la Figura 11.

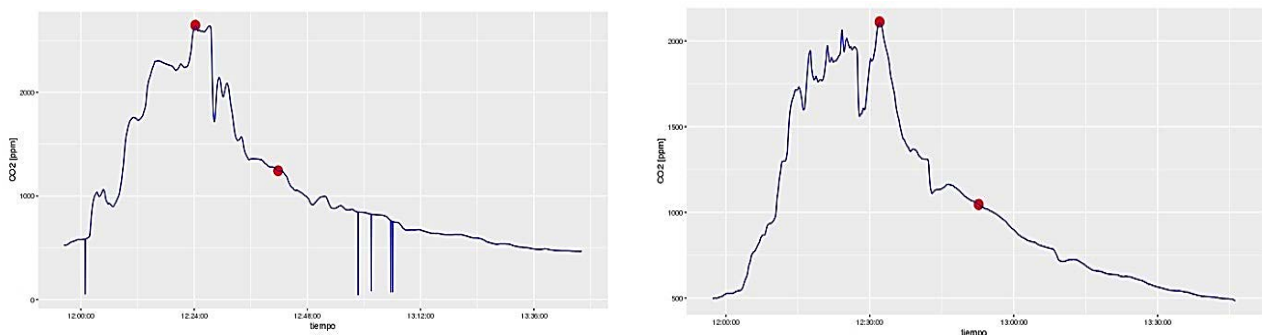


Figura 11. Trazado de CO₂ en el salón 115 del edificio 453: a) Traza de CO₂ al lado de la ventana delantera, y b) Traza de CO₂ al lado de la ventana trasera

Como se puede observar en las gráficas el tiempo que tarda en disminuir el CO₂ dentro del salón es similar para cada punto seleccionado. A continuación, en la Tabla 6 se muestran los ACH determinados por cada conjunto de datos.

Tabla 6. Cambios de aire registrados por cada sensor

Ubicación del sensor	Cambios de aire por hora (ACH)
Ventana delantera	3.401
Puerta	2.885
Ventana trasera	3.401
Esquina trasera pared	3.286
Centro del salón	2.543
Promedio	3.103

Con tal de confirmar la calidad de ventilación en el edificio se llevaron a cabo medidas en diferentes salones, así como lo recomienda [20], obteniendo resultados similares.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en un salón ubicado en la tercera planta del mismo edificio (Figura 12), el cual se denominará salón de comprobación, para este caso la disposición espacial del salón se ve invertida, pero se conservan las dimensiones. Los ACH encontrados para el salón de comprobación se muestran en la Tabla 7. Como se puede ver en ambos salones los cambios de aire se registran alrededor de 3 por hora validando una ventilación baja en el salón.

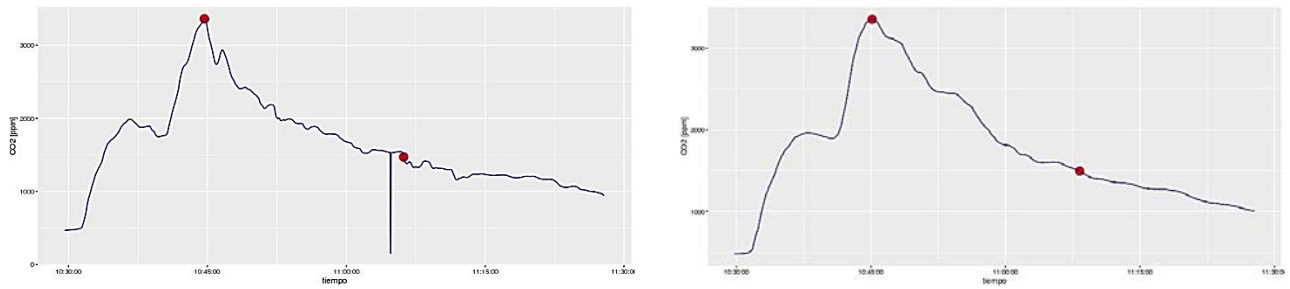


Figura 12. Trazados de comprobación en otro salón para parte delantera y trasera: a) Traza de CO₂ salón de comprobación frontal, y b) Traza de CO₂ salón de comprobación parte trasera

Tabla 7. Cambios de aire registrados en el salón de comprobación

Ubicación del sensor	Cambios de aire por hora (ACH)
Zona frontal	2.833
Zona trasera	2.577
Promedio	2.705

4.10 Resultados simulación computacional 2D

Se utilizó el módulo de CFD-post para visualizar los campos obtenidos por la solución en ANSYS Fluent 2020 R2 con los parámetros mencionados previamente. Se muestran los contornos de velocidad, presión, temperatura, humedad y concentración de CO₂.

En la Figura 13a se puede observar que el flujo entra en dirección horizontal por la parte superior del salón y da la vuelta en el extremo opuesto donde se ubica la geometría que representa al profesor. También se observa una baja recirculación del flujo en el centro del salón donde se ubican los primeros dos estudiantes de derecha a izquierda. En la Figura 13b se puede apreciar la entrada de aire a temperatura ambiente por la parte superior del salón, así mismo los contornos de los estudiantes en color rojo indican la temperatura de frontera de los cuerpos a 310 K. Se evidencia que la primera campana de izquierda a derecha recibe una cantidad considerable de aire del exterior y directamente lo extrae. En la Figura 13d se evidencia la fracción másica presente en el salón y que se produce, se puede evidenciar cómo, en la parte derecha, se encuentran representados el profesor y los dos primeros estudiantes se cruzan flujos, mientras que más a la izquierda, representando la parte trasera del aula, la producción de CO₂ se aprecia en menor cantidad.

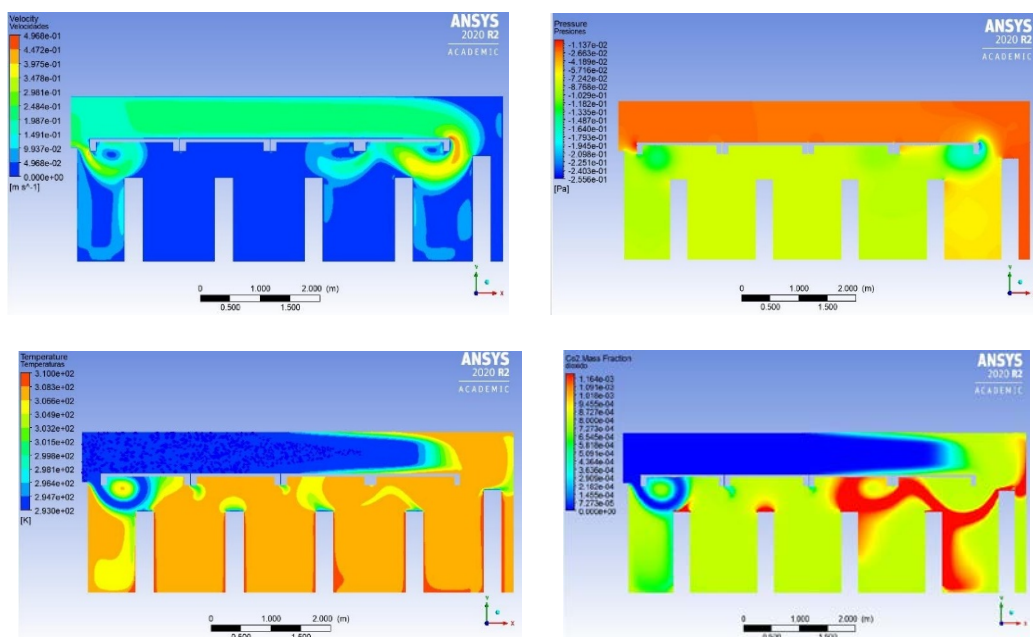


Figura 13. Resultados simulación 2D campos de presión, temperatura, velocidad y concentración de especies: a) Campo de velocidad en el modelo bidimensional del aula de clase en m/s, b) Campo de presiones en aula de clase 2D, c) Campo de temperaturas en el aula de clase 2D, y d) Fracción másica del CO₂ hasta 1200ppm en el dominio bidimensional

4.11 Resultados simulación 3D

Para visualizar los campos obtenidos por la solución en ANSYS Fluent 2021 R1 se implementó el módulo de CFD-post con los parámetros previamente mencionados.

En las Figuras 15 y 16 se ilustran algunos de los resultados más representativos del trabajo realizado con la geometría tridimensional con el fin de verificar la eficiencia de la configuración del sistema. Se debe recordar que la forma de los estudiantes se aproximó como si estos fueran paralelepípedos, de modo que en los planos horizontales o verticales los estudiantes se verán como rectángulos. En la Figura 15 se aprecia el contorno de la magnitud de la velocidad en un plano transversal del aula. Se evidencia una alta velocidad de flujo en los ductos correspondientes a las campanas de extracción de aire y a los alrededores de estas.

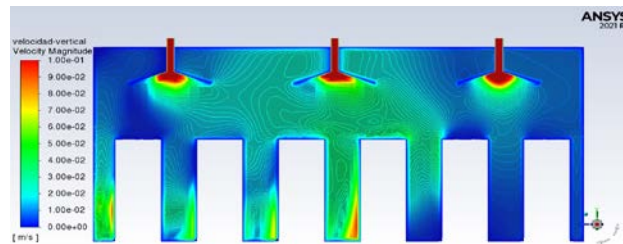


Figura 15. Campo escalar de la magnitud de la velocidad hasta una magnitud de 0,1m/s en un plano transversal

En la Figura 16a se evidencian líneas de flujo las cuales cambian su color dependiendo a la velocidad a las que se encuentran sometidas, como se puede apreciar, las velocidades más altas que se encuentran en el recinto son las correspondientes a la entrada de flujo al salón y las de extracción de aire en las campanas. La Figura 16b muestra las líneas de corriente en el plano XZ donde se ve el comportamiento del flujo al ingresar al salón y la manera en que se comporta al interior de este. El tiempo en el cual se presentan los resultados es $t = 60s$ de estabilización del flujo para permitir que la entrada de aire por medio de las rejillas se desarrolle adecuadamente.

En las Figuras 16c y 16d se aprecia la concentración de CO_2 al interior del recinto, teniendo en cuenta las condiciones de entrada y una cantidad más realista de generación de CO_2 presente en el ambiente, se pueden evidenciar comportamientos más cercanos a la realidad. En la Figura 16d se evidencia un color más claro entre el interior de las campanas de extracción y la zona que representa las cabezas de los estudiantes, a diferencia del color más oscuro encima de las campanas de extracción que representa una cantidad más pequeña de CO_2 presente en la zona.

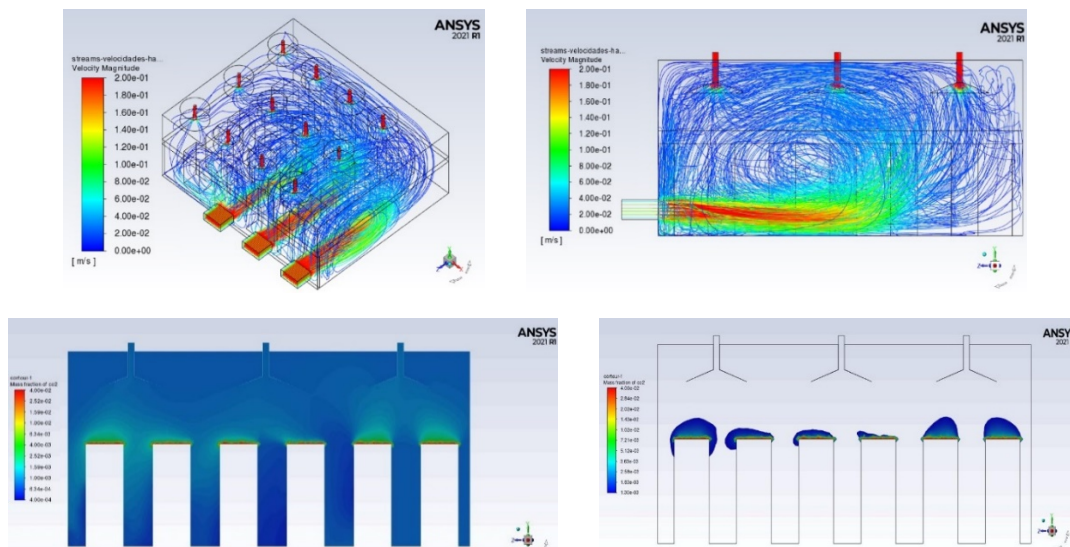


Figura 16. Resultados simulación 3D líneas de corriente y concentración de especies con atmósfera contaminante: a) Líneas de corriente obtenidas para el campo de velocidades, b) Líneas de corriente del modelo 3D en una vista horizontal, c) Contorno de la concentración de CO_2 en el dominio 3D, y d) Contorno de concentraciones de CO_2 mayores de 1200ppm considerado como peligroso

Adicionalmente, en la Figura 17 se puede visualizar el campo escalar para la temperatura T en el salón a diferentes alturas, en las Figuras 17a, 17b y 17c las representaciones corresponden a una vista de techo del salón, lo cual permite ver solamente las cabezas de los estudiantes y el comportamiento de la temperatura alrededor de los mismos, en la Figura 17a al encontrarse a la altura de las rejillas de ventilación, se aprecia la diferencia de temperaturas con la que ingresa el flujo al recinto. Finalmente, en la Figura 17d se evidencia el comportamiento de la temperatura en un plano transversal.

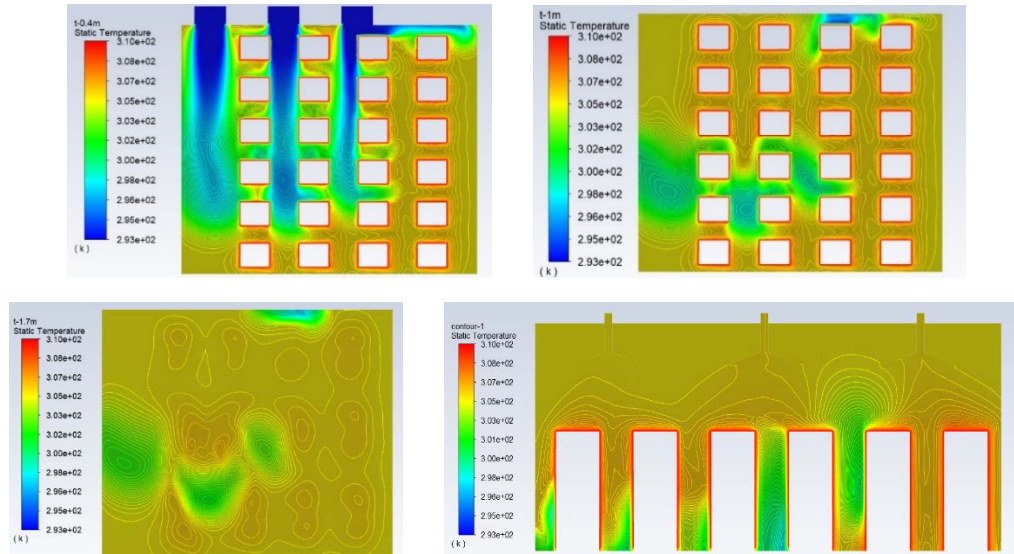


Figura 17. Contornos de temperatura en la simulación 3D donde h hace referencia a la altura en la cual se registra el campo de temperatura con respecto al nivel del suelo: a) Temperatura T a $h = 0.4$ m, b) Temperatura T a $h = 1.0$ m, c) Temperatura T a $h = 1.7$ m, y d) Temperatura T en un punto transversal

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Sistema de ventilación

Teniendo en cuenta las pérdidas presentes dentro de la tubería y sus codos, el uso de un extractor capaz de generar un flujo de 525 Cubic feet per minute CFM, compensa las pérdidas y mantiene un flujo constante dentro del sistema con la suficiente diferencia de presión como para extraer el aire contaminado del salón. Los dampers seleccionados posicionados en cada unión al tubo central nivelan el flujo de aire evitando una absorción irregular en las campanas.

5.2 Trazado de CO₂

A partir de las gráficas obtenidas de la concentración de CO₂ en el tiempo y utilizando la ecuación 1 se calcularon los ACH para los datos de cada sensor. Al sacar el promedio, se obtuvo que en el salón piloto por ventilación natural hay 3,104 cambios de aire por hora. De acuerdo a las normas ASHRAE los cambios de aire por hora necesarios para garantizar una disminución en la concentración de aerosoles significativa para disminuir la probabilidad de contagio debe ser de 6,000 ACH o superior. Por consiguiente, es propicio resaltar que, no solo los ACH obtenidos pueden llevar a cierta disconformidad para aquellos presentes en el salón después de un tiempo, sino que no se hacen los suficientes cambios por hora para que el recinto sea seguro.

La disposición de las entradas y salidas de aire en el salón puede ser la razón por la cual se presentan resultados bajos en la ventilación. Al ser las ventanas superiores la única posible entrada de aire no contaminado, el proceso de intercambio se complica, ya que por diferencia de temperatura el CO₂ y el aire caliente (que, se asume, está contaminado) subirán y buscarán evacuar por medio de las ventanas. El no presentar una entrada inferior para ingresar aire fresco gracias al efecto de vacío generado por la salida de aire caliente con CO₂ crea un efecto de recirculación, que evita una salida constante de aire contaminado. Sumado a esto el CO₂ tiende a asentarse disminuyendo su altitud, por lo cual su tasa de extracción disminuye a medida que pasa el tiempo.

En [20] se recomienda que llevar a cabo el proceso de medición en otros espacios del mismo recinto para confirmar el nivel de ventilación del recinto. En la tabla 7 se muestran los cambios de aire por hora obtenidos en el salón de comprobación, la cercanía a los resultados del salón piloto lleva a poder afirmar que la ventilación de los salones en el edificio es deficiente y con tal de disminuir la probabilidad de contagio es necesario abrir un paso a la entrada de aire, así como extraer de forma constante el CO_2 para evitar su estancamiento dentro del salón.

5.3 Simulación 2D

- *Velocidades:* En la Figura 13a se puede observar que gran parte del aire que ingresa al salón es absorbido por las campanas de la entrada y del fondo, dejando poca posibilidad de circulación en la parte donde estarían sentados los estudiantes (donde sería ideal que hubiera renovaciones del aire, aunque sin que llegasen a mezclarse entre los distintos estudiantes las líneas de corriente cercanas). La menor velocidad registrada es cero (consistente con la condición de no deslizamiento) y la mayor es de 0.4968m/s.
- *Presiones:* Se tiene que la mayor presión dentro del salón se da en la entrada y la menor es en puntos cercanos a las campanas (Figura 13b). Esto es consistente con lo esperado, ya que se tomó una condición de entrada a presión atmosférica y un flujo másico especificado de salida, por ende, se debe generar un diferencial de presiones para que el aire entre desde el exterior a ocupar el espacio del aire que está siendo extraído, lo cual satisface la conservación de la masa.
- *Temperaturas:* Por otra parte, el contorno de temperaturas (Figura 13c) muestra que la región más fría teniendo en cuenta esta configuración sería en la parte superior de las campanas en donde ingresa el flujo a temperatura ambiente exterior a 293K. En la parte donde están los estudiantes y el profesor se distingue una temperatura que en promedio es de 306K aproximadamente. Si se realiza la comparativa con el contorno de velocidades se puede decir que las regiones de la entrada tienen menor temperatura debido al ingreso del aire fresco, sin embargo, a medida que este va entrando al salón se va calentando y al llegar hasta la campana del fondo, ya tiene la misma temperatura promedio del aire cercano a los estudiantes.
- *Concentración de CO_2 :* El contorno de CO_2 2D (Figura 14) muestra que con el sistema de ventilación implementado la concentración de CO_2 en el recinto no supera las 1200 partes por millón en la mayoría del dominio. Sin embargo, debido a la naturaleza del flujo de entrada podría presentarse una *mezcla* del aire contaminado entre las dos primeras personas que están enfrente al tablero (o al fondo de la entrada, en la última campana), lo cual sugiere que la naturaleza de la entrada debería modificarse y es uno de los pasos siguientes en el modelado tridimensional. De hecho, los resultados de esta simulación fueron los que motivaron la inclusión de las rejillas de extracción en el salón. Cabe notar que el salón real se intervendrá para la instalación de dichas rejillas.

5.4 Simulación 3D

Debido a la manera en que se realizó la simulación, primero resolviendo los campos de velocidad y presión, y posteriormente solucionando las concentraciones como escalares pasivos, el proceso de transporte de la temperatura y de la concentración de CO_2 está dominado por un proceso de difusión-advención. Se muestran los resultados después de un minuto de simulación (60s).

- *Velocidad:* En la Figura 15 se ilustra un contorno de la magnitud de la velocidad que evidencia como la mayor velocidad se encuentra a la salida de las campanas y muestra el campo vectorial escalado. En este se observa de forma más clara como el flujo tiende a salir por las campanas. Asimismo, las líneas de corriente mostradas en la Figura 16a muestran que el flujo que ingresa por las rejillas de extracción de la parte baja efectivamente es evacuado por las campanas de extracción.
- *Temperaturas:* Con respecto a las temperaturas obtenidas, en la Figura 17 se muestran los contornos de las temperaturas en tres planos horizontales diferentes a $h = 0,4$ m, $h = 1,0$ m y $h = 1,7$ m y un plano transversal que corta una sección que pasa por los estudiantes y las campanas. Se aprecia que las

temperaturas decrecen en las zonas de mayor flujo de velocidades, dada la configuración de entrada y salida del aire. Las mayores temperaturas se encuentran en las superficies que representan a los estudiantes y caen rápidamente a valores que garantizan un alto confort. Lo que evidencia que la inclusión de las rejillas y el sistema de ventilación mejoran notablemente el flujo de aire en el recinto y justifican la construcción del sistema.

- *Concentración de CO₂*: Para este análisis se consideró un umbral de concentración de CO₂ de 1200ppm. Este es el parámetro más importante para disminuir el riesgo de contagio, que es el objetivo de este trabajo. Concentraciones superiores suponen un riesgo para los ocupantes del recinto. Así pues, la cantidad de CO₂ en el dominio se puede evidenciar en las figuras 16c y 16d. Por una parte, la Figura 16d muestra un contorno de la concentración de CO₂ en un plano vertical que tiene un rango que va desde la concentración máxima de 4% en la parte superior de los cuadrados que representan a las personas hasta los lugares más alejados de la producción de CO₂. Se debe recordar que estas superficies se consideran como la fuente del CO₂ producido por la *exhalación* de las personas. Aunque este contorno muestra cómo el CO₂ efectivamente se difunde a través del dominio, se recurre a la representación de la Figura 16d para justificar el funcionamiento del sistema.

Por otra parte, en la Figura 16d se muestran únicamente los contornos de concentraciones de CO₂ superiores al umbral de 1200ppm. Es evidente que las concentraciones de CO₂ superiores a 1200ppm permanecen en la cercanía de la *cabeza* de las personas, con lo que se considera que las simulaciones muestran que el sistema de extracción logra disipar adecuadamente la concentración de CO₂ y evitar que las concentraciones de cada individuo se mezclen entre sí para que la dispersión de aerosoles no sea peligrosa.

El resto de los contornos obtenidos verifican los resultados de la simulación 2D. Con el sistema implementado se cumplen las condiciones de confort y de sanidad que se requieren en el salón, incluso con una ocupación de 24 personas.

A partir de lo anterior se concluye que el sistema supone una mejoría sustancial con respecto a las condiciones iniciales del salón sin intervenir. En futuros trabajos se espera mostrar la implementación en físico del sistema, así como la validación experimental de los resultados obtenidos mediante las simulaciones desarrolladas.

6. CONCLUSIONES

Un retorno a clases sin adecuar apropiadamente los espacios similares al salón piloto puede significar un contagio masivo en el campus de la universidad, pues la falta de renovación de aire causaría una concentración elevada de aerosoles capaces de transmitir el virus SRAS-CoV-2.

Con tal de garantizar la renovación del aire en un recinto cerrado, tanto desde el proceso de diseño, como desde las simulaciones computacionales, fue evidente que es deseable situar las entradas de aire en la zona inferior del espacio y las salidas en la zona superior, de modo que se aprovechen los cambios de densidad del aire para obtener una ventilación por desplazamiento.

Cuando la toma de aire se hace únicamente por las ventanas, que se ubican en la parte superior del salón, las corrientes convectivas que se forman dentro del salón hacen que haya una mezcla turbulenta de los posibles agentes contaminantes. De tal manera, para contar con la ventilación requerida en el salón piloto, es necesario intervenir las paredes del lugar para generar entradas de aire que queden a un nivel mucho más bajo que el de las campanas de extracción.

En este momento se tiene finalizado el proceso de diseño y selección de materiales. El sistema fue comprobado mediante simulaciones computacionales y los resultados son prometedores. En futuros trabajos se espera implementar la tecnología diseñada y realizar mediciones experimentales que permitan verificar los resultados computacionales. Por último, no debe olvidarse que, para poder escalar la producción del sistema, es importante optimizar los costos, de modo que sea lo más asequible posible.

REFERENCIAS

- [1] Fernstrom, A. and Goldblatt, M., "Aerobiology and Its Role in the Transmission of Infectious Diseases," *Journal of Pathogens*, vol. 2013, pp. 1–13, 2013.
- [2] Hitchcock, P. J., Mair, M., Inglesby, T. V., Gross, J., Henderson, D. A., O'Toole, T., Ahern-Seronde, J., Bahn leth, W. P., Brennan, T., Burroughs, H. E., Davidson, C., Delp, W., Ensor, D. S., Gomory, R., Olsiewski, P., Samet, J. M., Smith, W. M., Streifel, A. J., White, R. H., and Woods, J. E., "Improving performance of HVAC systems to reduce exposure to aerosolized infectious agents in buildings; recommendations to reduce risks posed by biological attacks," *Biosecurity and Bioterrorism*, vol. 4, no. 1, pp. 41–54, 2006.
- [3] Stewart, E. J., Olmsted, R. N., Schoen, L. J., Vernon, W., and Conlan, W., "ASHRAE sobre Aerosoles Infecciosos," ASHRAE, Atlanta, Tech. Rep., 2020.
- [4] Prof. Jose L Jimenez & Dr. Zhe Peng, Dept. of Chem. & CIRES, "COVID-19 Aerosol Transmission Estimator," Univ. Colorado-Boulder, Colorado, Tech. Rep., 2021.
- [5] ASHRAE, "2017, ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Enviromental Conditions for Human Occupancy," Tech. Rep., 2017.
- [6] ASHRAE, "2019, ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019 – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings," ASHRAE, Tech. Rep., 2019.
- [7] ASHRAE, "2019, ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality," ASHRAE, Tech. Rep., 2019.
- [8] A., Y., ÇENGEL, M. A., MEHMET, and KANOĞLU, *Thermodynamics an Engineering Approach*, 9th ed. Mc Graw Hill Education, 2013.
- [9] Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H., and Sterling, T. D., "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments," *Environmental Health Perspectives*, vol. VOL. 65, no. 3, pp. 351–361, 1986.
- [10] Salud, I. N. d., "Módulo de datos de COVID-19 en Colombia," 2021. Recuperado: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/modelos-covid-19>
- [11] O. López, P., "Confort térmico y calidad del aire, una evaluación cuantitativa post ocupación desde la arquitectura." Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Tech. Rep., 8 2019.
- [12] Morales Adames, G. A. and García Álvarez, M. C., "Problemas de Confort Térmico en Edificios de Oficinas. Caso Estudio: Torre Colpatria en la Ciudad de Bogotá," *10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, p. 11, 2012.
- [13] LAURA NATALIA LÓPEZ PRADA and JUAN CAMILO MORENO MEDINA, "Diseño de un sistema de climatización aplicando la norma FAIAR de calidad de aire interior para el edificio de ACAIRE en Bogotá D.C.," Ph.D. dissertation, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, Bogotá, 2019.
- [14] Klimach, T. and Helleis, F., "Provisional Documentation Exhaust Air Unit for Classrooms," Max-Planck-Institut, Mainz, Tech. Rep. November, 2020.
- [15] Gao, N. and Niu, J., "Transient CFD simulation of the respiration process and inter-person exposure assessment," *Building and Environment*, vol. 41, no. 9, pp. 1214–1222, 2006.
- [16] Aliabadi, A. A., Rogak, S. N., Green, S. I., and Bartlett, K. H., "CFD simulation of human coughs and sneezes: A study in droplet dispersion, heat, and mass transfer," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, vol. 7, no. PARTS A AND B, pp. 1051–1060, 2010.
- [17] Bhattacharyya, S., Dey, K., Paul, A. R., and Biswas, R., "A novel CFD analysis to minimize the spread of COVID19 virus in hospital isolation room," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 139, p. 110294, 2020.
- [18] Duguid, J. P., "The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei," *Journal of Hygiene*, vol. 44, no. 6, pp. 471–479, 1946.
- [19] Bernal, D., "Aire Ciudadano: Guía de Construcción medidos CO2," 2021. Recuperado: <https://aireciudadano.com/guia-de-construccion-medidor-libreco2/>
- [20] Joseph Allen, E. J. J. C.-L., "5-Step Guide To Checking Ventilation Rates in Classrooms," *Harvard T.H. CHAN School of public health*, pp. 1–27, 2020.
- [21] ASHRAE, "ASHRAE fundamentals (SI)," in *ASHRAE, "2017, ASHRAE fundamentals (SI)," in 2017, ASHRAE fundamental handbook SI, 2017th*, 2017th ed., Mark S. Owen, H. E. K., Ed. W. Stephen Comstock, 2017, ch. 7, 11, pp. 7.10, 11.11.
- [22] Sound, S., The, L. I. N., Of, A., and Terminals, A. I. R., "AHRI 885-2017: Standar for Procedure for estimating occupied space sound levels in the application of air terminals and air." *What's New*, vol. 1, 2017.
- [23] S&P, S. and Palau, "Ventiladores helicocentrífugos in-line ultrasilenciosos serie td-silent ventiladores helicocentrífugos in-line ultrasilenciosos Serie TD-SILENT," 2021. Recuperado: https://statics.solerpalau.com/media/import/documentation/ES_TD-SILENT.pdf

Obtención y caracterización de grafeno multicapas depositado sobre alambres de cobre a altas temperaturas bajo el método CVD a partir de metano

Hermann E. Alcázar¹

Andrés R. Rodríguez²

Hilda M. Quispe³

Tiffany L. Trujillo⁴

Briam R. Velásquez⁵

José A. Coaquira⁶

Leopoldo O. Alcázar⁷

^{1-5,7} *Universidad Católica de Santa María*
Perú

⁶ *Universidade de Brasilia*
Brasil

La obtención de alambres de cobre recubiertos de grafeno muestra aplicaciones en crecimiento a nivel global. En este estudio se obtuvieron a altas temperaturas, 1000°C, empleando el método de deposición química de vapor CVD. Para bajo flujos máxicos de metano se obtiene grafeno de mejores características, siendo caracterizados por espectroscopía Raman y microscopio de barrido electrónico MEB. A mayores flujos y tiempos de deposición de metano se obtiene grafeno con mayor número de capas. Sus propiedades de resistencia última y resistencia eléctrica disminuyen con respecto al alambre de cobre sin tratar. Esto debido a la difusión del hidrógeno presente y requerido para la activación del cobre, paso previo para la deposición del grafeno. Reduciendo el flujo y tiempo de deposición del metano, limitando la presencia de hidrógeno solo durante la etapa de activación a la menor temperatura posible (tal vez cercana a los 300°C) y utilizando argón como gas inerte en lugar de nitrógeno, sería posible obtener mejoras en las propiedades mecánicas y eléctricas de un alambre de cobre recubierto con grafeno.

¹ Contacto: hermannalcazar@ucsm.edu.pe

² Contacto: 72477198@ucsm.edu.pe

³ Contacto: hilda.quispe@ucsm.edu.pe

⁴ Contacto: ttrujillo@ucsm.edu.pe

⁵ Contacto: 72099424@ucsm.edu.pe

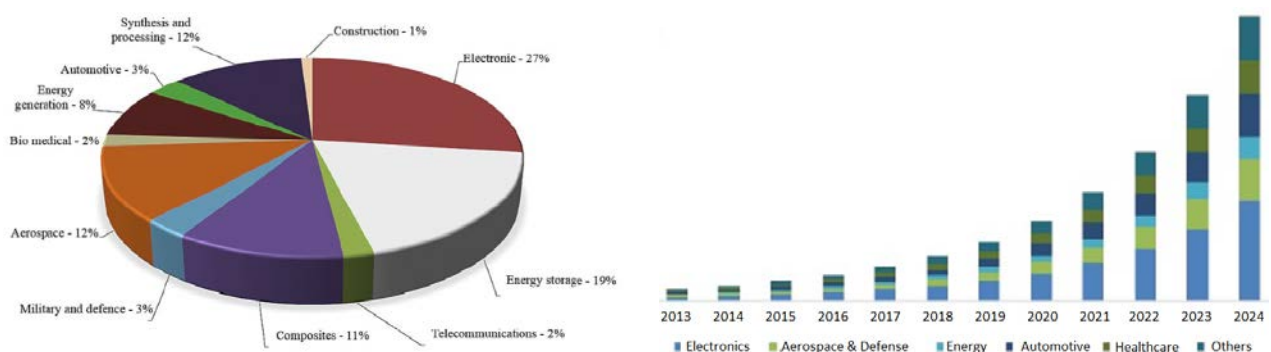
⁶ Contacto: coaquira.ja@gmail.com

⁷ Contacto: lalcazar@ucsm.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN

El grafeno es una monocapa de átomos de carbono, dispuestos en una red en forma de panal hexagonal bidimensional, unidos por un enlace sp^2 y longitud de enlace C-C de 0.142 nm [1]. Este material ha llamado la atención de la comunidad científica en los últimos años debido a sus propiedades físicas, tales como alta movilidad de electrones de $250,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [2], alta conductividad térmica hasta de 5000 W / m-K [3] y excepcional módulo de Young de 1 TPa [4]. Debido a sus excepcionales propiedades, se han estudiado varias aplicaciones para el grafeno, en donde se distingue su uso en nanoelectrónica [5] y aplicaciones para el almacenamiento de energía [6]. Zhang [7] expande este potencial de aplicaciones globales y las distribuye porcentualmente, como se observa en la Figura 1a [8]. Estas aplicaciones se incrementarán exponencialmente en el futuro cercano, como se observa en la Figura 1b. Es pues de interés entender su obtención y aplicaciones.

El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono como grafito, diamante, nanotubos de carbono [9], o fullerenos [10], por presentar unas propiedades físico-químicas muy beneficiosas que no existen en otro material en la actualidad [11, 12]. Su descubrimiento fue realizado por Geim y Sergeevich [2], consiguiendo aislar unas pocas capas de grafeno mediante el método de la exfoliación micromecánica. Debido a este descubrimiento se les otorgó el Premio Nobel de Física en 2010.



(a) **Figura 1.** Distribución y demanda proyectada de aplicaciones de grafeno: a) Distribución porcentual de aplicaciones [7], y b) Demanda proyectada por aplicación [8]

Ante su descubrimiento a nivel mundial se han realizado diferentes investigaciones científicas para una correcta obtención de grafeno. Los procesos de síntesis más utilizados y viables son la exfoliación micromecánica, exfoliación química, crecimiento epitaxial, reducción de óxido de grafeno, por deposición química de vapor, entre otros. La exfoliación micromecánica es un proceso que se caracteriza por ser un método sencillo y económico para obtener grafeno de una elevada pureza, pero es un método laborioso e iterativo con un rendimiento bajo [2, 13, 14]. La exfoliación química es un proceso de que emplea ultrasonido y centrifugación, obteniendo así grafeno con una buena calidad estructural ya que se evitan procesos químicos (oxidación y reducción), pero presenta grafeno en pocas proporciones [15].

El crecimiento epitaxial de grafeno en carburo de silicio es un proceso de sublimación caracterizado por su utilización en el campo de la electrónica, debido a que el grafeno producido crece sobre obleas de SiC u otros materiales que no necesitan una transferencia a otro tipo de sustrato. Además, es considerado un proceso limpio debido a que no se utilizan agentes químicos, sin embargo, es un proceso lento, costoso y no viable comercialmente [16-18]. La reducción de óxido de grafeno es un proceso que se caracteriza por ser laborioso por sus etapas vía exfoliación química [19] y por sus diferentes vías de reducción como química [20-23], térmica [24], hidrotérmica [25] o fotoinducida [26].

Se logra obtener una calidad de grafeno que depende específicamente de los grupos funcionales que estén contenidos en su estructura, siendo por lo tanto su principal desventaja, ya que para obtener unas mejores propiedades del material es necesario eliminar los grupos oxigenados [27, 28]. Por último, el proceso de deposición química de vapor se caracteriza por realizarse en menor escala, pero con posibilidad de escala industrial mediante la técnica de lecho fluidizado a un costo alto de producción. Se pueden obtener láminas de grafeno con una alta calidad estructural y en elevadas proporciones [29, 30].

La deposición química de vapor CVD es una de las técnicas más prometedoras para producir grafeno a gran escala. Se define como la deposición de átomos o moléculas sobre un sustrato a partir de una reacción química en la fase de vapor [6]. Para ello se emplean gases químicamente reactivos para depositar una delgada película sobre el sustrato sólido. Los sustratos más usados en la literatura son de Ni y Cu, aunque se han realizado investigaciones con metales de transición como Ru [31] e Ir [32].

Las condiciones de crecimiento como presión, temperatura y velocidad del gas de aporte definen el mecanismo de deposición, su morfología y la solubilidad del carbono en el metal o sustrato [33]. El grafeno obtenido es indicado como mono capa o multicapa. Berman [34] (Figura 2), muestra imágenes de microscopía electrónica SEM, donde se observa diferencias entre grafeno mono capa y multicapa. Esta diferencia se muestra con mayor claridad en los espectros Raman que se indican. En tanto que los picos 2D sean de mayor intensidad relativa con respecto a los picos G, se tendrá un grafeno monocapa, caso contrario será multicapa.

En la literatura se analiza la obtención de grafeno, sin considerar al sustrato en las evaluaciones finales. Es por ello que en este trabajo se pretende analizar la obtención y caracterización de grafeno manteniendo el sustrato en el análisis. Esto es, puesto que entiende el proceso de grafeno, existen aún ciertas incertidumbres sobre el comportamiento del sustrato recubierto con grafeno como un todo para aplicaciones finales. Por ejemplo, el análisis de cables eléctricos de cobre recubiertos de grafeno reviste una gran importancia en la conducción de electricidad industrial y doméstica. Si estos cables eléctricos pueden mantener o incrementar sus propiedades mecánicas y de conductividad eléctrica, implicaría que se podría utilizarlos en ambientes industriales o domésticos en donde sería posible emplear corriente directa y no corriente alterna como en la actualidad.

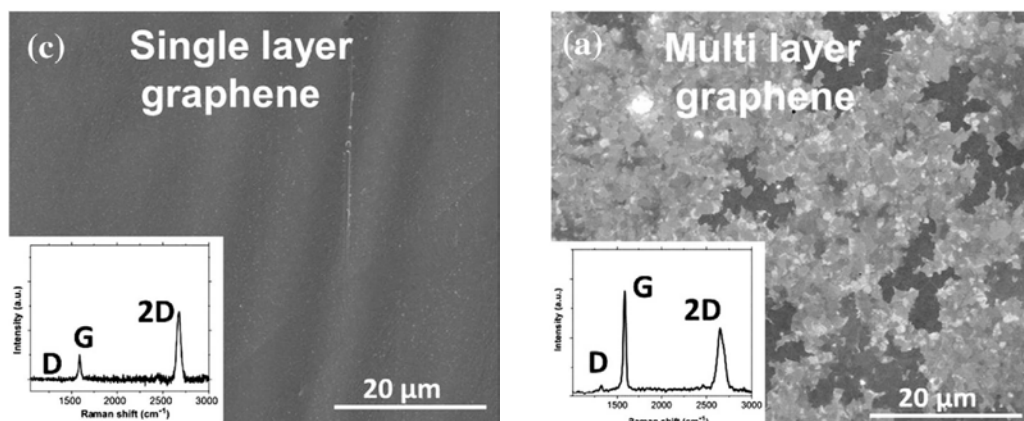


Figura 2. SEM y microscopía Raman de grafeno: a) Monocapa, b) Multicapa [34]

En este estudio se analiza el comportamiento de cables de cobre recubiertos de grafeno, mediante el proceso CVD. En la literatura se indica que la temperatura de deposición de grafeno se encuentra entre 900 y 1000°C, rango de temperatura de deposición que es base de este estudio. Como gas de aporte se empleará metano CH_4 de alta pureza y como gas inerte hidrógeno H_2 . Los parámetros a analizar son la resistencia a la tracción y resistencia eléctrica del alambre de cobre recubierto de grafeno.

2. MÉTODO

2.1 Equipamiento para la deposición de grafeno en alambres de cobre

Para la deposición de grafeno sobre alambres de cobre se utilizó el método CVD. Este proceso requiere de gases reactivos, quienes durante el contacto con el sustrato depositarán un producto sólido de la reacción química [35]. Esta reacción se produce en fase de vapor y a escala atomística [36]. Para lograr este objetivo, es necesario controlar el caudal y presión de los gases reactivos y la temperatura del medio, en la cual se producirá la reacción.

Para lograr obtener grafeno sobre sustrato de cobre es necesario tres gases. El primero es algún gas inerte, el cual puede ser nitrógeno, neón, helio, etc., el cual mantiene una atmósfera inerte libre de oxígeno en el

reactor. Luego, se requiere de hidrógeno, cuyo objetivo es desoxidar o activar el sustrato. Finalmente se requiere del portador de carbono, que puede ser metano, etano, etc.

En la Figura 3 se muestra el esquema de disposición de gases para el proceso CVD. Se emplearon tres gases metano (4x), hidrógeno y nitrógeno obtenidos de Praxair. Cada cilindro de gas tiene su propia válvula reguladora de presión de dos etapas, la cual permite reducir la presión del cilindro de 200 bar a la presión de entrada al sistema a 4 bar (regulable de 0 a 8 bar) con una variación de ± 0.5 bar.

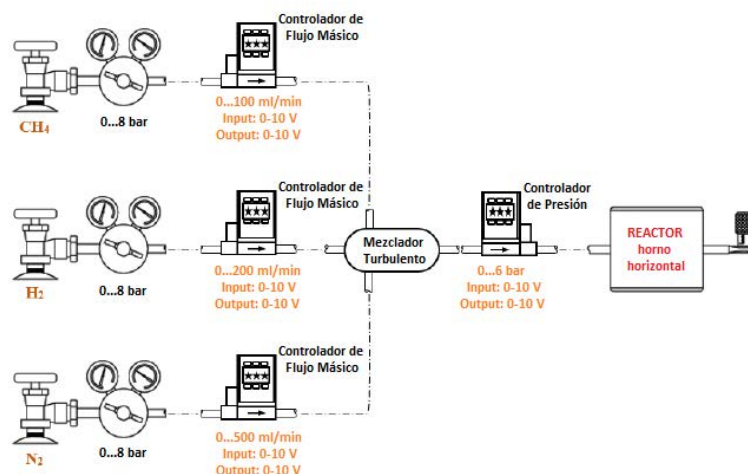


Figura 3. Esquema de disposición de gases para el proceso CVD

Cada gas de proceso tiene su propio controlador de flujo másico. Este controlador permite regular el flujo másico del gas que ingresa al proceso con elevada repetibilidad, pues cuenta con un controlador PID que regula el caudal tomando en consideración la presión entrada y salida, y la temperatura del gas. Los reguladores son de la marca Alicat, con flujos de 0...100 (MC-100SCCM-D-PCV03), 0...200 (MC-200SCCM-D-PCV03) y 0...500 ml/min (MC-500SCCM-D-PCV03) para el control de metano, hidrógeno y nitrógeno respectivamente. El error de estos reguladores es de ± 0.1 con respecto a la escala máxima, permitiendo una elevada repetibilidad de los ensayos realizados. También se dispone de un regulador de presión, quien regula la presión de entrada (regulación primaria) al reactor. Para una adecuada regulación de la presión de reacción, se dispone de un regulador de presión marca Alicat (PC-100PSIG-D), ubicado luego de un homogeneizador de gases o mezclador turbulento. Se dispone de una válvula de aguja o una columna de líquido que genera la contrapresión necesaria luego del reactor.

El reactor consiste en un tubo de cuarzo de 60 mm de diámetro por 1200 mm de longitud (Figura 4). Tanto a la entrada como a la salida del reactor se dispone de bridas de conexión, con conectores para los gases de entrada y salida. También dispone de conectores para la conexión de una termocupla, que mide la temperatura al interior del reactor. Se dispone de termocuplas de 300, 400, 600 y 800 mm de longitud, que permiten medir la temperatura interna en diversas zonas del reactor.



Figura 4. Horno horizontal de tres etapas con reactor de cuarzo

Este reactor está dispuesto en un horno vertical de tres etapas. El horno vertical es de marca Nan Yang Xinyu Furnaces Co LTD (SK2C-5-12TPB). Dispone de tres controladores de temperatura, uno para cada zona,

los cuales permiten tener una zona de precalentamiento, una zona de reacción y otra zona de postenfriamiento. Esta disposición permite asegurar que los gases durante la reacción mantengan la temperatura requerida. La potencia del horno es de 30 kW (80A) y alcanza una temperatura máxima de 1200°C.

El sistema de control de cada ciclo de trabajo está basado en un sistema SCADA. Para ello, se capturan las señales de los controladores de flujo másico, presión y de temperatura (del horno), y de los sensores de temperatura. Estas señales analógicas son digitalizadas y llevadas a una PC que adquiere toda la data del sistema, por el puerto USB. En la PC se controlan las señales y se regresan a los controladores los setpoints siguiendo el camino inverso [37].

Como medida de seguridad, el horno vertical está dispuesto dentro de una cámara de extractora de gases. El extractor es de marca HNG (serie A6). Todo el sistema de control está dispuesto en las compuertas inferiores de la cámara extractora de gases.

2.2 Síntesis de grafeno sobre alambre de cobre

El método CVD tiene en general cuatro etapas, a decir purga, activación, deposición y enfriamiento. La variación del sustrato y las condiciones de operación como temperatura, tiempo y caudales de los diversos gases, hacen que el producto final obtenido tenga sus propias características. En la Figura 5, se muestra gráficamente las etapas de un proceso CVD para la obtención de grafeno.

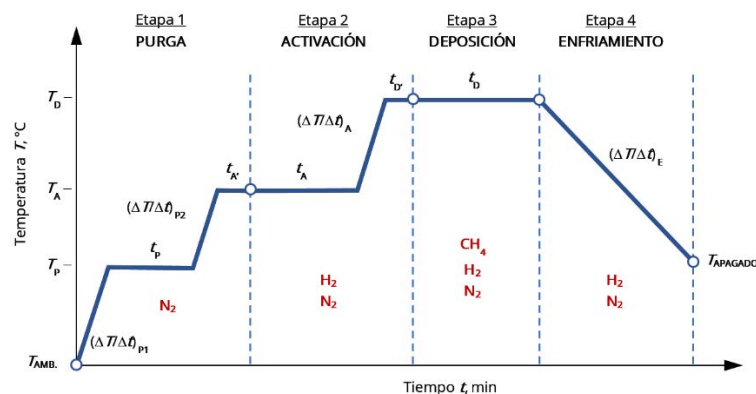


Figura 5. Etapas para la deposición de grafeno mediante CVD

El proceso se inicia con la etapa de purga, en donde se inyecta nitrógeno (N_2). El propósito principal es desplazar el oxígeno presente en el reactor, dejando una atmósfera inerte. El caudal de nitrógeno fue de 250 sccm (*standard cubic centimeter per minute*) durante la purga. La temperatura de purga se mantuvo en $T_P = 100^\circ C$ por un tiempo de $t_P = 10$ min, manteniendo las rampas de incremento de temperatura en $(\Delta T/\Delta t)_{P1} = (\Delta T/\Delta t)_{P2} = 30^\circ C/min$. El tiempo de permanencia previo a la activación se mantuvo en $t_A = 10$ min. Esta permanencia a la temperatura de activación por el tiempo indicado, permite que la temperatura en el horno y reactor se homogenicen, reduciendo las zonas o puntos fríos o calientes. Las condiciones de purga se mantuvieron constantes para todos los ensayos.

El siguiente paso es el de activación del sustrato o catalizador. Esta activación consiste en la remoción del óxido de cobre de la superficie del alambre a recubrir de grafeno. Para ello, se mantiene la temperatura del sustrato (cobre) a una temperatura de reacción adecuada, en la cual el hidrógeno tiene mayor afinidad por el oxígeno que el cobre. El reactor debe mantener un ambiente inerte, por ello se inyecta una mezcla de H_2 y N_2 . Para estos ensayos se consideró la misma temperatura tanto de activación como de deposición para cada ensayo. Luego, tanto el incremento de temperatura de activación como el tiempo de deposición previo son considerados nulos, o $(\Delta T/\Delta t)_A = 0$ y $t_A = 0$ respectivamente. Las condiciones individuales para cada ensayo se indican en la siguiente sección.

La deposición de grafeno sobre el sustrato de cobre es la siguiente etapa. En esta etapa el metano (CH_4) se descompone bajo la presencia de cobre. Se mantiene la presencia de hidrógeno y nitrógeno para asegurar

una atmósfera inerte y activadora. El carbono se deposita sobre la superficie de cobre en forma de grafeno y el hidrógeno es liberado. La temperatura, tiempo y caudal de los gases se indican para cada ensayo.

Finalmente se debe enfriar el sistema lentamente. Para ello se asegura una rampa de enfriamiento de $(\Delta T/\Delta t)_E = 4^\circ\text{C}/\text{min}$, hasta una temperatura de apagado $T_{\text{apagado}} = 200^\circ\text{C}$. Luego de alcanzar la temperatura de apagado, se puede abrir el horno por 30 min para llevar el reactor a temperatura ambiente. Pasado este tiempo, recién se procede a retirar el reactor del horno y abrirlo para retirar la probeta. Durante el enfriamiento, se mantiene una atmósfera inerte con caudales de nitrógeno e hidrógeno de 100 sccm y 20 sccm, respectivamente. La presión de trabajo para las etapas y los ensayos se mantuvo en 0.1 bar.

2.3 Probeta

La probeta es fabricada a partir de cable eléctrico AWG 14 sólido. Primero se retira el recubrimiento aislante del alambre empleando un cúter, a un ángulo de 10° para evitar rasgar la superficie del alambre. Se debe asegurar que el alambre esté alineado, caso contrario se enderezó manualmente. Se corta el alambre a una longitud de 130 mm y luego se hace un doblez por cada lado de $5\text{ mm} \times 90^\circ$ (Figura 6). Se preparan tres tubos de ensayo con agua desionizada, etanol y ácido acético. Se sumerge la muestra por 10 minutos en cada tubo, primero en el de agua desionizada, luego en etanol y finalmente en ácido acético. El objetivo es limpiar de grasas y desoxidar la superficie del alambre.



Figura 6. Probeta de cobre con soporte y base

Sobre la base de alúmina se coloca el soporte fabricado en acero inoxidable 316L, Figura 6. La probeta de cobre se coloca sobre el soporte. Todo el conjunto se introduce dentro del reactor por uno de los lados, centrándolo. Este arreglo permite que el flujo de metano discorra longitudinalmente a la probeta. Finalmente se coloca el reactor en el horno y se procede a la síntesis de grafeno, de acuerdo a lo visto en el apartado anterior.

2.4 Ensayo de Tensión

Este fue realizado siguiendo el estándar ASTM E8/E8M 2009. Se considera la probeta como un eje de longitud constante (alambre) de diámetro 2.5 mm y longitud 120 mm. El equipo empleado es una máquina universal de ensayo de 20 kN de capacidad, marca YILI.

2.5 Ensayo de Resistencia Eléctrica

Para la medición de la resistencia eléctrica se utilizó el puente de Wheatstone marca Yokogawa 2755. Cada alambre se midió con una precisión $1 \pm \text{m}\Omega$, teniendo una longitud de 130 mm.

2.6 Ensayo de Espectroscopía Raman

Los espectros obtenidos por espectroscopía Raman se analizaron en un equipo Horiba Scientific, con una fuente láser de argón de 405 nm. El equipo se calibró con un diamante cristalino, a un pico característico de 1333 cm^{-1} .

2.7 Microscopio Electrónico de Barrido MEB

Las imágenes que muestran la morfología de la deposición de grafeno sobre los alambres de cobre fueron realizadas con un microscopio electrónico de barrido marca Zeiss, modelo EVO MA10.

3. RESULTADOS

Las características de síntesis de las diferentes probetas se presentan en la Tabla 1. Se observa que las temperaturas de activación a analizar son de 900, 1000 y 1050°C, temperatura cercana a la temperatura de fusión de cobre que es de 1085°C. Se variaron los valores de tiempo y flujo másico de deposición.

Tabla 1. Propiedades mecánicas, resistencia eléctrica y características de síntesis de las probetas

Probeta	T_A , T_D (°C)	Activación			Deposición			Propiedades Mecánicas			Resistencia Eléctrica (Ω)	
		t_A (min)	H ₂ (sccm)	N ₂ (sccm)	t_D (min)	CH ₄ (sccm)	H ₂ (sccm)	N ₂ (sccm)	Resistencia Máxima (MPa)	Deformación (%)		Módulo Young (GPa)
P-01	1050	10	50	100	5	10	50	100	210.59	18.05	1.17	0.172
P-02	1000	10	20	100	20	5	20	100	208.46	22.01	0.95	0.178
P-03	1000	10	20	100	20	5	20	100	194.59	18.09	1.08	0.159
P-04	1000	10	50	100	5	10	50	100	197.79	17.92	1.10	0.156
P-05	1000	10	75	100	15	5	75	100	121.61	11.40	1.07	0.153
P-06	1000	10	75	100	45	10	75	100	121.61	11.40	1.07	0.150
P-07	900	10	50	100	5	10	50	100	123.11	4.86	2.53	0.155
P-08	900	10	20	100	20	5	20	100	167.91	15.40	1.09	0.149
P-09	900	10	75	100	45	10	75	100	159.60	13.06	1.22	0.174
P-10	1050	10	20	100	20	5	20	100	140.82	6.77	2.08	0.152
P-11	1050	10	75	100	45	10	75	100	89.40	2.87	3.12	0.149
P-12	1000	180	20	450	90	1	20	450	187.11	15.89	1.18	0.323
P-13	1000	180	20	450	90	0.5	20	450	163.43	18.56	0.88	0.177
P-14	1000	180	20	450	90	0.1	20	450	157.67	10.65	1.48	0.191
P-15 ⁽¹⁾	1000	270	20	450	-	-	20	450	207.07	16.84	1.23	-
P-16 ⁽²⁾	1000	-	-	-	-	-	-	-	20.06	0.91	2.21	-
P-17 ⁽³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	267.55	27.52	0.97	0.172

⁽¹⁾ Recocido bajo atmosfera de N₂ y H₂, ⁽²⁾ Recocido sin atmosfera inerte, Aire, ⁽³⁾ Sin tratar

Los resultados obtenidos para cada probeta en los ensayos mecánicos como resistencia máxima, deformación unitaria porcentual y módulo de elasticidad, y resistencia eléctrica se presentan en la Tabla 1. En adición a las probetas con recubrimiento de grafeno, se hicieron tres ensayos adicionales. En estos ensayos no se recubrió con grafeno, aunque se mantuvo bajo atmósferas inerte y sin ella. También se hizo el ensayo para el alambre sin tratamiento.

En la Figura 7 se presenta la espectroscopía Raman para cuatro probetas. Se presentan las probetas con diferentes tiempos de deposición y flujos de metano.

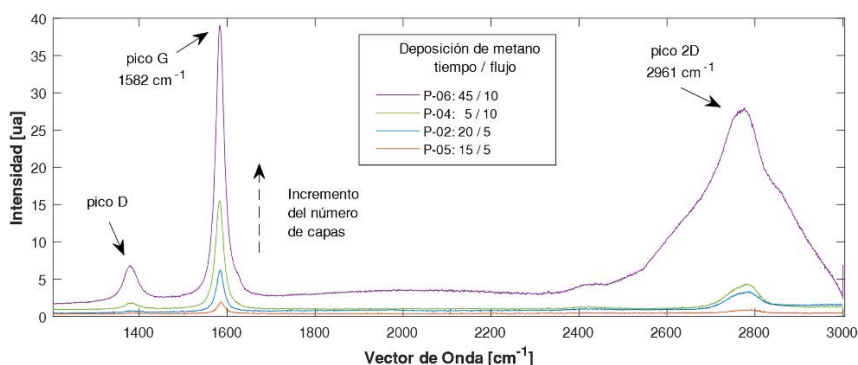


Figura 7. Espectroscopía Raman

En las Figuras 8 a 12 se presentan las imágenes del microscopio electrónico de barrido MEB de las probetas P-02, P-06, P-13, P-14 y P-15, respectivamente.

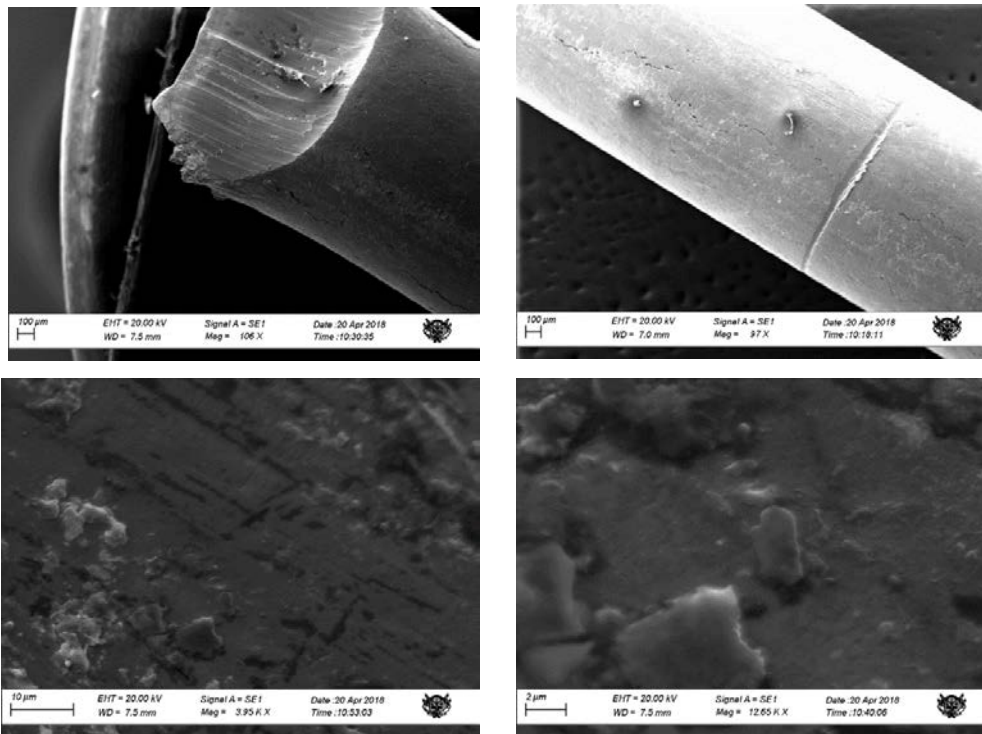


Figura 8. Imágenes MEB de probeta P-02, deposición CH₄: 1000°C, 20 min, 5 sccm

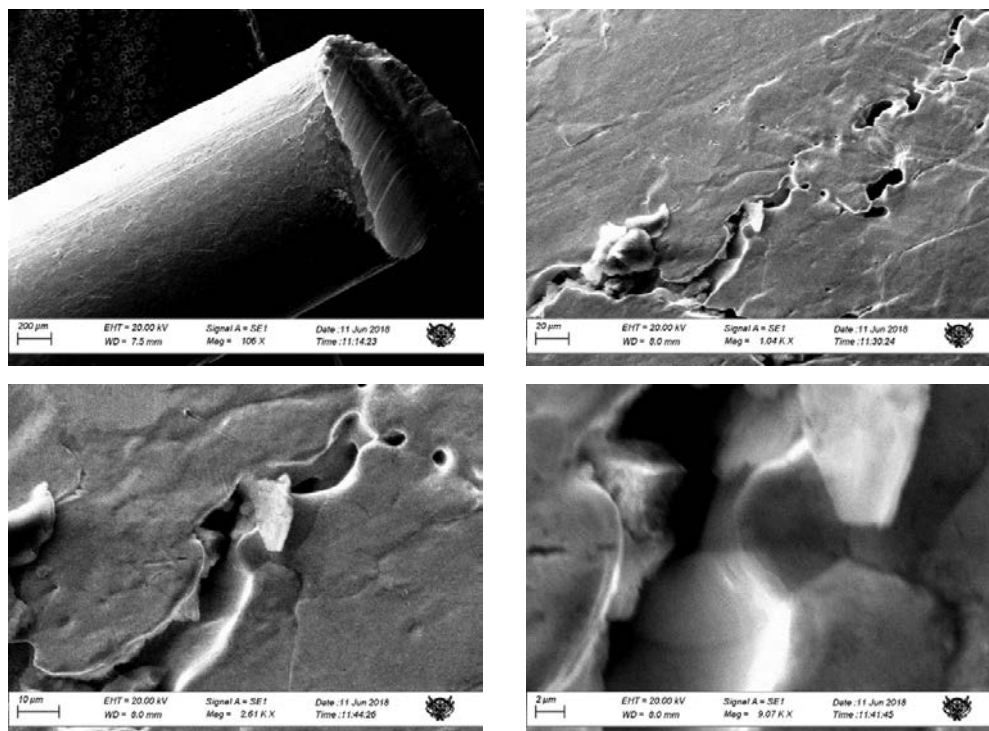
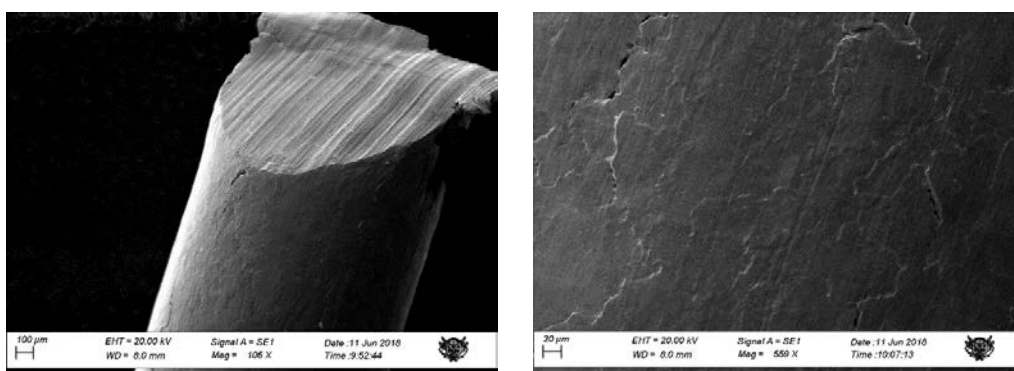


Figura 9. Imágenes MEB de probeta P-06, deposición CH₄: 1000°C, 45 min, 10 sccm



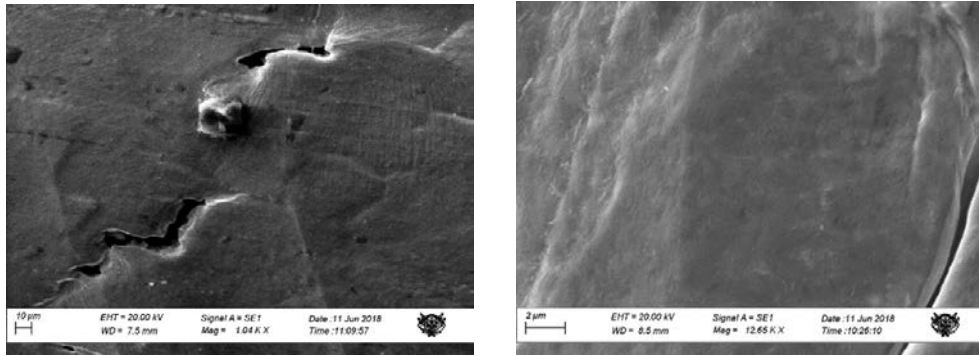


Figura 10. Imágenes MEB de probeta P-13, deposición CH₄: 1000°C, 90 min, 0.5 sccm

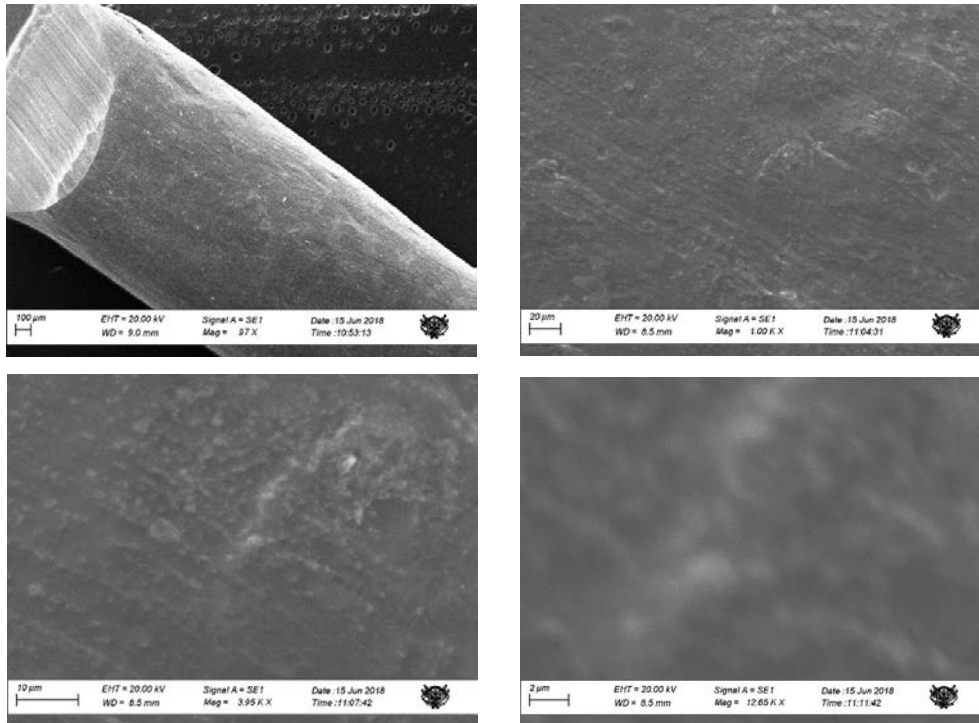


Figura 11. Imágenes MEB de probeta P-14, deposición CH₄: 1000°C, 90 min, 0.1 sccm

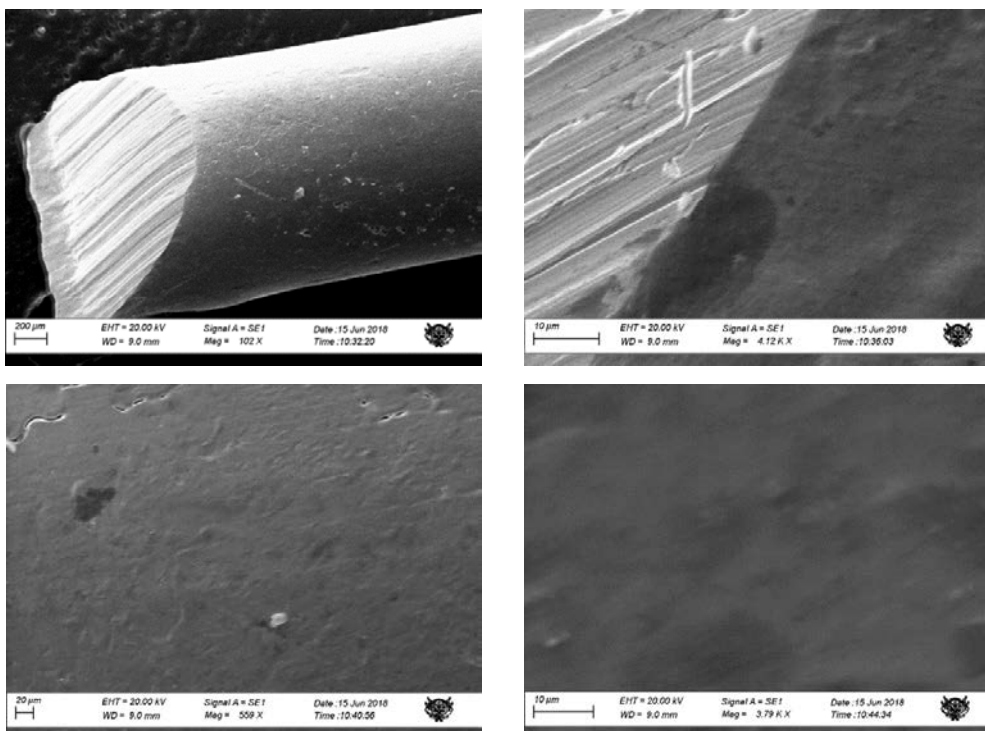


Figura 12. Imágenes MEB de probeta P-15, recocida con N₂ y H₂

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de correlación y de relevancia de parámetros, para determinar la relación que existe entre los parámetros de entrada y la resistencia máxima a la tracción como parámetro de salida, fue realizado. Para ello se empleó la correlación de Spearman, este método se eligió ya que la correlación de Pearson solo mide correlaciones lineales, y por el contrario la correlación de Spearman tiene una mayor flexibilidad. Además, se estableció un filtrado por correlación y por contribución de R2 para tener un mejor filtrado y así obtener los parámetros de entrada más relevantes. El criterio para determinar la relevancia de un parámetro se estableció como mayor o igual a 0.5. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 13.



Figura 13. Relevancia y correlación de parámetros para la Resistencia Máxima

Como se observa, el parámetro con más relevancia y con mayor correlación es el flujo de hidrogeno durante el tiempo de activación. Esto no invalida el hecho de que exista una relación de causalidad fuerte entre el tiempo de deposición y el esfuerzo máximo. Los parámetros restantes no se muestran en la Figura 11 debido a los filtros establecidos, con un valor límite establecido de relevancia de 0.5. Este es el caso del flujo de metano durante la deposición, el cual obtuvo una correlación de 0.20 y relevancia de 0.40.

Para tener otro punto de vista se realiza el análisis de sensibilidad de parámetros de entrada (Figura 14). El parámetro más relevante es el flujo de hidrogeno tanto en la etapa de activación como en la etapa de deposición con un valor de -0.49 mostrando que tiene un impacto inverso, es decir mientras mayor sea el flujo de Hidrogeno menor es el esfuerzo máximo obtenido.

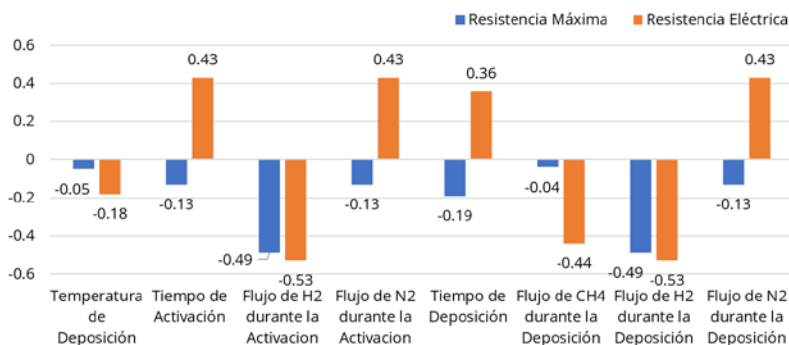


Figura 14. Sensibilidad de parámetros para la resistencia máxima y resistencia eléctrica

Para el caso de la resistencia eléctrica sucede lo mismo, el flujo de hidrogeno se mantiene como el parámetro más sensible con un valor de -0.53. El tiempo de deposición es el segundo parámetro de entrada en sensibilidad. El flujo y temperatura de deposición tienen una sensibilidad baja con respecto a la resistencia última, pero media para la resistencia eléctrica.

Posterior a ello, se determinó un modelo matemático que relacione el esfuerzo máximo y la resistencia eléctrica con los parámetros de entrada para ello se empleó la metodología de Superficies de Respuesta. El método utilizado fue Genetic Agregation, este método, comparado con los demás métodos como Krigging o second-order complete polynomials, crea las superficies de respuesta más apropiadas para el parámetro de salida [38].

En la Figura 15 se muestra la visualización del modelo obtenido para la resistencia máxima al especificar el tiempo y el flujo de hidrogeno durante la activación como parámetros independientes (izquierda). Los otros

parámetros se establecieron de la siguiente forma: una temperatura de activación de 1000°C, con un flujo de nitrógeno durante la activación de 100, un tiempo de deposición de 20 minutos, un flujo de metano, hidrogeno, nitrógeno durante la deposición de 0.1, 20, 100 sccm, respectivamente. Para la Figura 15 (derecha) se colocó como parámetros independientes al tiempo y flujo de metano durante la deposición, para los mismos valores establecidos en la Figura 15 (izquierda). La diferencia radica en que el tiempo y flujo de metano durante la deposición ahora son constantes, y el tiempo y flujo de hidrogeno durante la activación se mapeó con valores de 10 minutos y 50 sccm, respectivamente. En ambas superficies se observa que presentan un comportamiento cuasi plano.

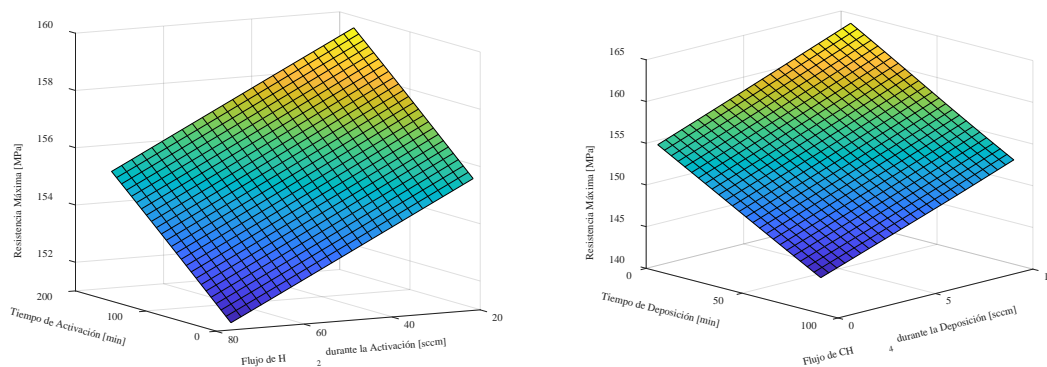


Figura 15. Mapeo de la resistencia máxima de acuerdo a la activación y deposición

Para la resistencia eléctrica se realizó el mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior, es decir en la Figura 16 (izquierda) se mantiene como parámetros independientes el tiempo y el flujo de hidrogeno durante la activación y en la Figura 16 (derecha) se mantiene el tiempo y flujo de metano durante la deposición como parámetros independientes y todos los demás como valores constantes. Las superficies obtenidas muestran valles representando así los valores mínimos para la superficie (izquierda) aproximadamente en 40 sccm y 10 minutos y para la superficie (derecha) en 68 min y 2 sccm. Los valores máximos para la superficie (izquierda) se encuentran en 180 min y 75 sccm y para la superficie (derecha) en 90 min y 10 sccm.

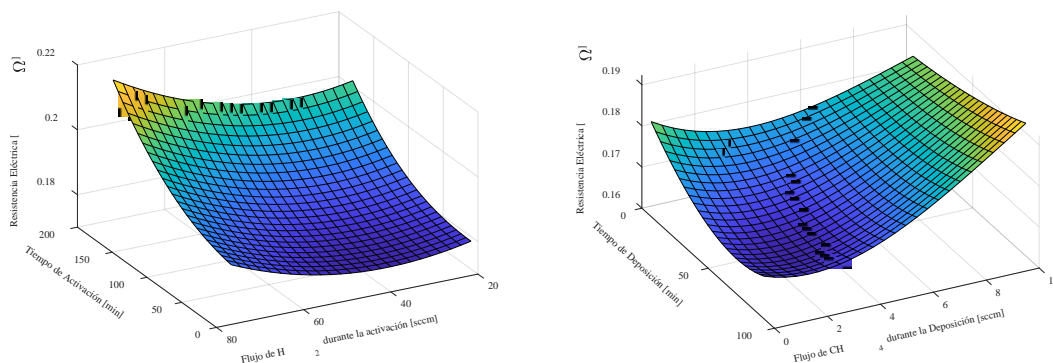


Figura 16. Mapeo de la resistencia eléctrica de acuerdo a la activación y deposición

Se observa de la espectroscopía Raman, Figura 5, y de las imágenes con el microscopio de barrido electrónico (MEB) la presencia de grafeno en multicapas. La presencia de grafeno en multicapas se indica en la microscopia Raman como valores de pico G mayores que pico 2D [39, 40], alrededor de los valores de vector de onda de 1582 y 2961 cm^{-1} , respectivamente. También se indica en la literatura que mayor número de capas se expresa como mayor valor de intensidad. Tiempos y flujos másicos elevados contribuirán a un mayor número de capas, precisión que se observa en la Figura 7 donde claramente se observa grafeno en multicapas. En la Figura 9 se observa imágenes MEB para un bajo flujo másico de metano, 0.1 sccm. En este caso la presencia de grafeno en multicapas no se puede observar. El grafeno en este caso es monolayer o cercano.

Se observa que las propiedades mecánicas de resistencia última y resistencia eléctrica caen con respecto al alambre de cobre sin tratamiento. Una prueba realizada en ambiente oxidante a condiciones de

temperatura y tiempo, muestran una caída drástica de la resistencia de 20 MPa. En un ambiente reductor, con hidrógeno y nitrógeno, su resistencia es de 207 MPa. Cuando se recubre de grafeno, las propiedades en general son inferiores al ambiente reductor, entre un 60 al 93% para todos los casos analizados. De manera similar se observa que la resistencia eléctrica se incrementa cuando se recubre de grafeno.

En las imágenes MEB se observa una falla dúctil en la zona de rotura. La temperatura de 900 a 1050°C es muy cercana a la temperatura de fusión del cobre de 1080°C. Esto muestra la falla del material recocido a muy altas temperaturas, lo cual es consistente. Lo que genera estas elevadas temperaturas es el cambio en la estructura cristalina del cobre, y al estar en una atmósfera reductora, el hidrógeno y nitrógeno [33, 41, 43] se difunden en el cobre. Esta difusión reduce sus propiedades mecánicas. El metano incrementa la concentración de hidrógeno al separarse el carbono del hidrógeno, aumentando su difusión. Estos defectos se observan sobre las deficiencias en la superficie de cobre debido a sus procesos de fabricación como extrusión. Sobre estas rayaduras se observan discontinuidades en el grafeno multicapas, generándose en esas zonas las inclusiones indicadas.

Otro aspecto a indicar es la presencia de nitrógeno, el cual influye negativamente en la resistencia eléctrica del cobre recubierto de grafeno, sensibilidad de 0.43. Sharma [33] indica que la presencia de nitrógeno genera defectos en el crecimiento del grafeno en sustratos de cobre.

5. CONCLUSIONES

Grafeno multicapas sobre un sustrato de alambre de cobre fue obtenido. Mejores propiedades del grafeno se obtienen para bajos flujos máxicos de metano, cercanos a 0.1 sccm. La temperatura de deposición cercana a 1000°C es adecuada y corresponde a lo indicado en la literatura.

La presencia de hidrógeno en el proceso CVD, necesario para activar la superficie de cobre, influye negativamente en las propiedades del alambre de cobre con recubrimiento de grafeno. A mayores flujos y tiempos de hidrógeno, las propiedades de resistencia última y resistencia mecánica disminuyen. Esto debido a la difusión presente a temperaturas elevadas. Se observa este efecto al comparar un ensayo en ambiente reductor, hidrógeno y nitrógeno, con aquellos en donde se adiciona metano durante la deposición de grafeno. Las propiedades de resistencia última caen entre un 60 al 93%, en tanto que la resistencia eléctrica se incrementa en porcentajes similares. Esto debido al incremento de hidrógeno durante la descomposición del metano en carbono e hidrógeno.

Finalmente, se puede concluir que el recubrimiento de grafeno por el método CVD reduce las propiedades de resistencia última e incrementa su resistencia eléctrica, cuando el crecimiento se produce a altas temperaturas bajo atmósferas de hidrógeno y nitrógeno. Reduciendo el flujo y tiempo de deposición del metano, limitando la presencia de hidrógeno solo durante la etapa de activación a la menor temperatura posible (tal vez cercana a los 300°C) y utilizando argón como gas inerte en lugar de nitrógeno, sería posible obtener mejoras en las propiedades mecánicas y eléctricas de un alambre de cobre recubierto con grafeno.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Católica de Santa María por el apoyo financiero y físico, a través del Proyecto de Investigación 27019-R-2019.

REFERENCIAS

- [1] A. K. Geim and K. S. Novoselov, "The rise of graphene," *Nature Materials*, vol. 6, no. 3, pp. 193-191, February 2007.
- [2] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669, October 2004.
- [3] A. A. Baladin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, L, and C. N. Lau, "Superior thermal conductivity of single-layer graphene," *Nano Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 902-907, February 2008.
- [4] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, "Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene," *Science*, vol. 321, no. 5887, pp. 385-388, July 2008.
- [5] C. Berger, Z. Song, et al. "Ultrathin epitaxial graphite: 2d electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 52, pp. 19912-19916, December 2004.

- [6] B. L. Dasari, J. M. Nouri, D. Brabazon, and S. Naher, 2017 "Graphene and derivatives – Synthesis techniques, properties and their energy applications," *Energy*, vol. 140 (P1), pp. 766-778, 2017.
- [7] X. Zhang, B. R. S. Bajamaran, H. Liu, and S. Ramakrisna, "Graphene's potential in materials science and engineering," *RSC Advances*, vol. 4, no. 55, pp. 28987-29011, 2014.
- [8] MarketersMEDIA, "Graphene Market Forecasts | 200 Million-Dollar Mark by 2024," 22 July 2019. Recuperado: <https://marketersmedia.com/graphene-market-forecasts-200-million-dollar-mark-by-2024-85-pages-report/88899665>
- [9] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, no. 56-58, 1991.
- [10] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, "C₆₀: Buckminsterfullerene," *Nature*, vol. 318, pp. 162-163, 1985.
- [11] Ma. G. Méndez Medrano, H. C. Rosu y L. A. Torres Gonzáles, "Grafeno: el alótropo más prometedor del carbono," *Acta Universitaria*, vol. 22, no. 3, pp. 20-23, 2012.
- [12] C. Rodríguez Gonzales, "Obtención de hojas de óxido de grafeno para el desarrollo de nanocompositos poliméricos", Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, 2012.
- [13] C. Rodríguez Gonzáles and O. V. Kharissova, "Propiedades y aplicaciones del grafeno," *Ingenierías*, vol. 11, no. 38, pp. 17-23, 2008.
- [14] K. Xu, P. Cao y J. R. Heath, "Scanning tunneling microscopy characterization of the electrical properties of wrinkles in exfoliated graphene monolayers," *Nano Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 4446-4451, 2009.
- [15] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide," *Carbon*, vol. 45, no. 7, pp. 1558-1565, June 2007.
- [16] I. Forbeaux, J.-M. Themlin, and J.-M. Debever, "Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC(001): Interface formation through conduction-band electronic structure," *Physical Review B*, vol. 58, no. 24, pp. 16396-16406, 1998.
- [17] F. Varchon, R. Feng, J. Hass, X. Li, B. N. Nguyen, C. Naud, P. Mallet, J.-Y. Veuillen, C. Berger, and E. Conrad, "Electronic structure of epitaxial graphene layers on sic: effect of the substrate," *Physical Review Letters*, vol. 99, no. 12, p. 126805, September 2007.
- [18] K. V. Emtev, A. Bostwick, K. Horn, J. Jobst, G. L. Kellogg, L. Ley, J. L. McChesney, T. Ohta, S. A. Reshanov, J. Röhr, E. Roterberg, A. K. Schmid, D. Waldmann, H. B. Weber y T. Seyller, "Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide," *Nature Materials*, vol. 8, pp. 203-207, February 2009.
- [19] W. S. Hummers and R. E. Offerman, "Preparation of graphitic oxide," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 80, no. 6, p. 1338, March 1958.
- [20] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. W. SonBinh, T. Nguyen, and R. S. Ruoff, "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide," *Carbon*, vol. 45, no. 7, pp. 1558-1565, June 2007.
- [21] H.-J. Shin, K. K. Kim, A. Benayad, S.-M. Yoon, H. K. Park, I.-S. Jung, M. H. Jin, H.-K. Jeong, J. M. Kim, J.-Y. Choi, and Y. H. Lee, "Efficient reduction of graphite oxide by sodium borohydride and its effect on electrical conductance," *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 12, pp. 1987-1992, June 2009.
- [22] S. Pei, J. Zhao, J. Du, W. Ren, and H.-M. Cheng, "Direct reduction of graphene oxide films into highly conductive and flexible graphene films by hydrohalic acids," *Carbon*, vol. 48, no. 15, pp. 4466-4474, December 2010.
- [23] M. J. Fernández-Merino, L. Guardia, J. I. Paredes, S. Vilar-Rodil, P. Solís Fernández, A. Martínez-Alonso, and J. M. D. Tascón, "Vitamin C is an ideal substitute for hydrazine in the reduction of graphene oxide suspensions," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 14, pp. 6426-6432, March 2010.
- [24] W. Lv, D.-M. Tang, Y.-B. H., C.-H. You, A.-Q. Shi, X.-C. Chen, C.-M. Chen, P.-X. Hou, C. Liu, and Q.-H. Yang, "Low-temperature exfoliated graphenes: vacuum-promoted exfoliation and electrochemical energy storage," *ACS Nano*, vol. 3, no. 11, pp. 3730-3736, October 2009.
- [25] Y. Zhou, Q. Bao, L. A. Ling Tang, Y. Zhong, and K. Ping Loh, "Hydrothermal dehydration for the "green" reduction of exfoliated graphene oxide to graphene and demonstration of tunable optical limiting properties," *Chemistry of Materials*, vol. 21, no. 13, pp. 2950-2956, May 2009.
- [26] L. Guardia, S. Villar-Rodil, J. L. Paredes, R. Rozada, A. Martínez-Alonso, and J. M. D. Tascón, "UV light exposure of aqueous graphene oxide suspensions to promote their direct reduction, formation of graphene-metal nanoparticle hybrids and dye degradation," *Carbon*, vol. 50, no. 3, pp. 1014-1024, March 2012.
- [27] J. Shen, Y. Hu, M. Shi, N. Li, H. Ma, and M. Ye, "One step synthesis of graphene oxide-magnetic nanoparticle composite," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 114, no. 3, pp. 1498-1503, January 2010.
- [28] D. Chen, H. Feng, and J. Li, "Graphene oxide: preparation, functionalization, and electrochemical applications," *Chemical Reviews*, vol. 112, no. 11, pp. 6027-6053, August 2012.
- [29] X. Li, W. Cai, J. An, S. Kim, J. Nah, D. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo, and R. S. Ruoff, "Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils," *Science*, vol. 324, no. 5932, pp. 1312-1314, June 2009.
- [30] C. Mattevi, H. Kim, and M. Chhowalla, "A review of chemical vapour deposition of graphene on copper," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, pp. 3324-3334, 2011.

- [31] P. W. Sutter, J.-I. Flege, and E. A. Sutter, "Epitaxial graphene on ruthenium," *Nature Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 406-411, May 2008.
- [32] J. Coraux, A. T. N'Diaye, C. Busse, and T. Michely, "Structural coherency of graphene on Ir (111)," *Nano Letters*, vol. 8, no.2, pp. 565-570, February 2008.
- [33] D. K. Sharma, S. Fateixa, M. J. Hortigüela, R. Vidyasagar, G. Otero-Irurueta, H. I. S. Nogueira, M. K. Singh, and A. Kholkin, "Defect concentration in nitrogen-doped graphene grown on Cu substrate: A thickness effect," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 513, pp. 62-68, May 2017.
- [34] D. Berman, A. Erdemir, A. V. Zinovev, and A. V. Sumant, "Nanoscale friction properties of graphene and graphene oxide," *Diamond and Related Materials*, vol. 54, pp. 91-96, April 2015.
- [35] J. S. Bunch, S. S. Verbridge, J. S. Alden, A. M. van der Zande, J. M. Parpia, H. G. Craighead, and P. L. McEuen, "Impermeable atomic membranes from graphene sheets," *Nano Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 2458-2462, 2008.
- [36] H. O. Pierson. *Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications*. Noyes Publications, vol. 2, 1999.
- [37] M. E. Onque Quirita, "Implementación de sistema SCADA para el proceso de obtención de trazas de fibra de carbono en el laboratorio de investigación de materiales de la Universidad Católica de Santa María," Tesis de Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2018.
- [38] ANSYS, Inc., *ANSYS Design Xplorer User's Guide*, 2020 R1.
- [39] H. Kato, N. Itagaki, and H. J. Im, "Growth and Raman spectroscopy of thickness-controlled rotationally faulted multilayer graphene," *Carbon*, vol. 141, pp. 76-82, January 2019.
- [40] Q.-Q. Li, X. Zhang, W.-P. Han, Y. Lu, W. Shi, J.-B. Wu, and P.-H. Tan, "Raman spectroscopy at the edges of multilayer," *Carbon*, vol. 85, pp. 221-224, 2015.
- [41] J. C. Hamilton and J. M. Blakely, "Carbon segregation to single crystal surfaces of Pt, Pd and Co," *Surface Science*, vol. 91, no. 1, pp. 199-217, January 1980.

Efecto de los parámetros de soldadura en la disminución de porosidad en uniones disímiles entre aleaciones de aluminio mediante el proceso de soldadura GMAW-CMT

Enrique González Aparicio¹

Rocío Saldaña Garcés²

Gladys Yerania Pérez Medina³

José Jorge Ruiz Mondragón⁴

^{1, 2, 4} *Corporación Mexicana de Investigación en Materiales*

³ *Universidad Autónoma del Noreste*

México

Actualmente las uniones de aleaciones de aluminio se han vuelto un gran reto para los procesos de soldadura por arco más utilizados, ya que éstos tienen facilidad de automatización, otorgan mayor velocidad de aplicación y, por ende, obteniendo mayor producción. Debido a lo anterior, en muchas ocasiones a nivel industrial, la selección de variables esenciales para los procesos de soldadura se lleva a cabo de forma experimental, es decir, a prueba y error, ocasionando muchas veces la generación de discontinuidades en las uniones, quedando fuera de los estándares de calidad requeridos por los fabricantes de automóviles. En los procesos de soldadura, el uso de aleaciones de aluminio llega a ser un gran reto, ya que se debe de considerar la capa de alúmina formada sobre ellas, la cual posee un elevado punto de fusión, a diferencia de la aleación que tiene uno mucho menor. Debido a esto, la selección de parámetros adecuados para el proceso es importante, ya que de ellos depende que se puedan llevar a cabo las uniones sin la presencia de defectos tales como la porosidad. Es por lo que en esta investigación se analiza el efecto de los parámetros del proceso de soldadura GMAW-CMT en aleaciones disímiles de aluminio de la serie 3000 AlMgSi2Mn y 6000 AlMgSi con espesores de 5 mm y 5.5 mm, respectivamente, empleando material de aporte ER4043 y gas argón como protección. Se encontró que al utilizar los parámetros de velocidad de alimentación de hilo 5.2 m/min, corriente 195 A, voltaje 16.7 V y velocidades de aplicación de 10 mm/s y 8 mm/s, muestran disminución en la presencia de discontinuidades como porosidad, siendo confirmado mediante técnicas de microscopía donde se observan microporos con diámetros menores a 0.1 mm, los cuales están dentro de los rangos requeridos por las normas automotrices.

¹ Contacto: jegonzaleza@prodigy.net.mx

² Contacto: rocio.saldana@comimsa.com

³ Contacto: gladysyerania@hotmail.com

⁴ Contacto: jjorge.ruiz@comimsa.com

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad, en busca de cuidar su entorno, se ha dado a la tarea de disminuir las emisiones contaminantes provenientes de fábricas y transportes, siendo el automóvil uno de los puntos de mayor atención. Debido a esto, el utilizar materiales que sean más ligeros tales como el aluminio y sus aleaciones en la fabricación de ciertos componentes como radiadores, bloques de motor, cajas de transmisión, rines, ejes delanteros y traseros de transmisión, parachoques, pistones y marcos de suspensión, permitirá reducir el peso de los vehículos haciéndolos más eficientes, y, por ende, reducir de esta manera la emisión de contaminantes a la atmósfera. Dentro de los procesos de manufactura que se emplean para que se puedan elaborar todos estos componentes automotrices de aluminio es la soldadura, y la que más se utiliza en la industria automotriz es la de arco eléctrico GMAW-MIG.

Sin embargo, una de las problemáticas que se presenta al querer soldar estas aleaciones, es la diferencia en los puntos de fusión tanto del óxido de aluminio, el cual oscila en los 2072°C, como el del aluminio que se encuentra alrededor de 660°C, y sus aleaciones entre 570 y 660°C. Debido a esto, el comportamiento del proceso de soldadura es diferente, ya que primero tiene que eliminar la capa de óxido y posteriormente soldar las aleaciones de aluminio [1-3].

Para que se pueda llevar a cabo la unión en las aleaciones de aluminio, existe un proceso similar a un método de transferencia convencional de corto circuito llamado Cold Metal Transfer CMT [4], el cual ha revolucionado la soldadura de uniones disímiles y materiales más gruesos al producir una mejora visual del cordón, teniendo una deposición de metal controlada y con un bajo aporte de calor [5], siendo ésta última la principal razón por la cual se utiliza en uniones de aluminio.

Este incluye un tipo completamente nuevo de desprendimiento de gotas combinado con un movimiento reversible del electrodo, a diferencia del proceso de arco que emplea una transferencia por inmersión convencional, donde el alambre se alimenta continuamente a la pieza de trabajo y cuando toca a ésta, se crea un corto circuito que produce un aumento en la corriente para volver a encender el arco. Con el proceso CMT, por otro lado, el desprendimiento de gotas y el reinicio se controlan mediante el movimiento mecánico hacia atrás del electrodo de alambre [6].

El desafío de unir aleaciones disímiles de aluminio DIN EN 1706 AC - AlMg5Si2Mn/EN AW AlMgSi T1 por medio del proceso GMAW-CMT, es debido a que, por la naturaleza de obtención de la primera, la cual es mediante vaciado a presión en molde y tiende a presentar porosidad, el margen de tolerancia en la presencia de discontinuidades es mínima [7, 8].

De acuerdo con la especificación de los fabricantes de autopartes, solo se permite un diámetro de poro de 0.84 mm y el 5% del área de la sección transversal de porosidad distribuida [9], lo cual presenta un reto al buscar disminuir la presencia de estas discontinuidades en la soldadura (Figuras 1 y 2). Debido a esto, en esta investigación se llevó a cabo la búsqueda de parámetros del proceso de soldadura GMAW-CMT para unir las aleaciones disímiles DIN EN 1706 AC - AlMg5Si2Mn/EN AW AlMgSi T1 con la finalidad de conocer su efecto en la calidad de las uniones, enfocándose principalmente en la presencia de porosidad.

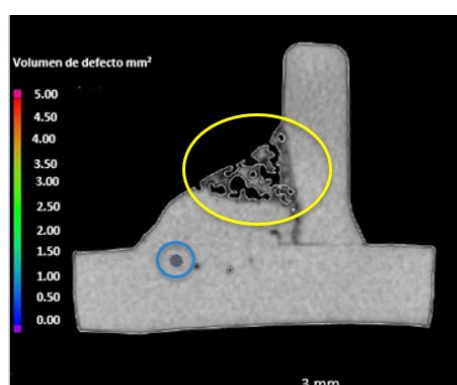


Figura 1. Porosidad en aleación extruida (círculo azul) y porosidad en aleación de fundición (círculo amarillo)



Figura 2. Morfología de cordón

2. MÉTODO

Para llevar a cabo la experimentación, se emplearon dos materiales base de aleaciones de aluminio, la DIN EN 1706AC- AlMg5Si2Mn y la EN AW AlMgSi T1, con espesores de 5 y 5.5 mm respectivamente. La configuración de la unión fue en T, siendo la base el tubo de aleación EN AW AlMgSi T1 y sobre éste se colocó la aleación DIN EN 1706 AC-AlMg5Si2Mn, dicha configuración se puede observar en la Figura 3. Se utilizó un equipo GMAW-CMT marca Fronius TPS 4000 CMT con un robot ABB IRB 2600-12/1.85.

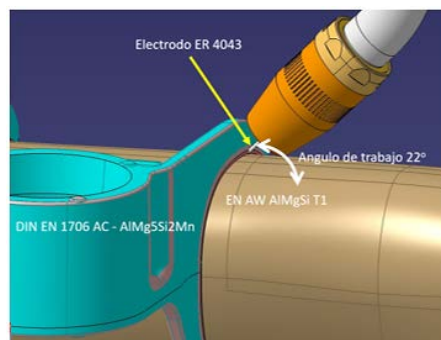


Figura 3. Configuración de unión de aleaciones DIN EN 1706 AC - AlMg5Si2Mn / EN AW AlMgSi T1 aplicando el proceso GMAW-CMT

Como material de aporte se empleó el ER 4043 con un diámetro de 1.6 mm, el cual fue alimentado de forma automática y continua durante el proceso. Se utilizó gas argón con 100% de pureza, con un flujo de 16 litros por minuto. En la Tabla 1 se muestra la composición química de las aleaciones base y del material de aporte empleados, dicha composición fue obtenida mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica con un equipo marca Oxford Instruments, modelo PMI Master Smart.

Tabla 1. Composición química de las aleaciones y material de aporte (% e.p)

Aleación	Elementos de aleación									
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
DIN EN 1706 AC - AlMg5Si2Mn	90.1	1.87	0.129	0.0026	0.594	7.15	< 0.01	< 0.001	0.0111	0.0509
EN AW AlMgSi T1	98.4	0.495	0.187	0.0103	0.0253	0.643	< 0.01	0.0363	0.0117	0.0187
ER4043	Balance	4.96	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.01

Investigaciones hechas sobre efectos atmosféricos en las áreas de experimentación en la aplicación de cordones de soldadura para aleaciones de aluminio disimilares [10], encontraron que uniones soldadas al 50% de humedad mostraron mejor rendimiento de fatiga con valores de 103.75 MPa para un número de 107 ciclos, las soldadas bajo el 70% de humedad mostraron un menor rendimiento de fatiga con valores de 68.67 MPa para el mismo número de ciclos, mientras que la realizada en un ambiente con 90% de humedad, fue la que presentó un incremento en la cantidad de porosidad. Por tal motivo, es importante el monitoreo de la humedad relativa en esta investigación, considerándola al 50% en la atmósfera, la cual fue medida con un termigrómetro marca Extech modelo 445815.

Para la aplicación del cordón se utilizan 4 programas de soldadura los cuales tienen programados las variables esenciales, y el uso de ellos es primordial para la correcta aplicación del cordón. Una vez obtenidos los parámetros, se realizaron pruebas preliminares con la finalidad de verificar si eran los más adecuados para disminuir la presencia de porosidad. Estos valores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de soldadura utilizados en el cordón.

Programa de soldadura	Programa 50	Programa 51	Programa 52	Programa 53
Ángulo de trabajo	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha
Ángulo de viaje	Empuje	Empuje	Empuje	Empuje
Distancia de la punta de contacto a la punta del alambre (Stick-out)	16 mm.	16 mm.	16 mm.	16 mm.
Corriente	174 A.	174 A.	195 A.	195 A.
Velocidad de alimentación de hilo	4.6 m/min.	4.6 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.
Voltaje	16.5 V	16.5 V	16.7 V	16.7 V
Corrección de arco voltaico	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrección Dinámica / Pulsado	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
Tipo de corriente	Corriente directa electrodo positivo			

La trayectoria programada a seguir por el robot está conformada por 6 puntos, los cuales llaman a los programas mostrados en la Tabla 2 y empleando las velocidades mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Velocidades de aplicación de cordón de soldadura realizadas por el robot.

Punto de trayectoria	Programas	Velocidad de aplicación
1	50	10 mm/s
2	50	10 mm/s
3	51	08 mm/s
4	51	08 mm/s
5	52	08 mm/s
6	53	10 mm/s

Se realizaron 7 experimentos preliminares utilizando los parámetros mostrados anteriormente en las Tablas 2 y 3, en cada experimento se realizó un cambio en los valores para las variables de corriente y velocidad de alimentación de alambre. Estos cambios en los valores de los parámetros se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de soldadura utilizados en los experimentos del 1 al 7

Experimento	Programa de soldadura	50	51	52	53
1	Corriente	174 A.	174 A.	195 A.	195 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	4.6 m/min.	4.6 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.
2	Corriente	188 A.	188 A.	195 A.	195 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	5 m/min.	5 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.
3	Corriente	195 A.	195 A.	195 A.	195 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	5.2 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.
4	Corriente	174 A.	174 A.	174 A.	174 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	4.6 m/min.	4.6 m/min.	4.6 m/min.	4.6 m/min.
5	Corriente	154 A.	154 A.	174 A.	174 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	4.0 m/min.	4.0 m/min.	4.6 m/min.	4.6 m/min.
6	Corriente	174 A.	174 A.	174 A.	174 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	4.0 m/min.	4.0 m/min.	4.0 m/min.	4.0 m/min.
7	Corriente	148 A.	148 A.	148 A.	148 A.
	Velocidad de alimentación de hilo	3.8 m/min.	3.8 m/min.	3.8 m/min.	3.8 m/min.

Una vez realizados los 7 experimentos preliminares se tomará el que cumpla mejor con las especificaciones requeridas por la industria automotriz, las cuales son longitud de pierna para cada material base, profundidad de penetración en ambos materiales base, garganta y diámetro de porosidad. Se realizará una prueba de repetibilidad y se analizará mediante técnicas de microscopía para analizar la morfología completa del cordón y sus características microestructurales con un microscopio óptico marca NIKON ECLIPSE MA200 y un microscopio electrónico de barrido marca TESCAN MIRA 3. De igual manera se medirá la microdureza Hv utilizando el microdurómetro WILSON HARDNESS - TUKON 2500.

3. RESULTADOS

3.1 Pruebas preliminares

Como se mencionó anteriormente, se realizaron pruebas preliminares para seleccionar los parámetros que fueran más adecuados para este tipo de uniones, los cuales se mostraron anteriormente en las Tablas 2, 3 y 4. En la Figura 4 se muestran las macrográficas de las uniones de las 7 pruebas preliminares. En los resultados se observó una variación en la presencia de porosidad, encontrando que con una velocidad de alimentación del material de aporte de 5.2 m/min a 4.6 m/min hubo una disminución en la porosidad manteniéndose de forma estable; mientras que con una velocidad de alimentación de 4.5 m/min a 3.8 m/min, se observó una disminución en la penetración en T2 para las muestras 5, 6 y 7, esto debido a la baja entrada de calor, y aunque la presencia de poros es mínima no se cumple con las especificaciones de longitud de pierna para cada material base, profundidad de penetración de cada material base, longitud de garganta y diámetro de porosidad, cabe mencionar que lo observado en la Figura 4, prueba 6, donde el diámetro del poro es menor a 0.05 mm, no se toma en cuenta ya que no cumple con las especificaciones antes mencionadas por la industria automotriz.

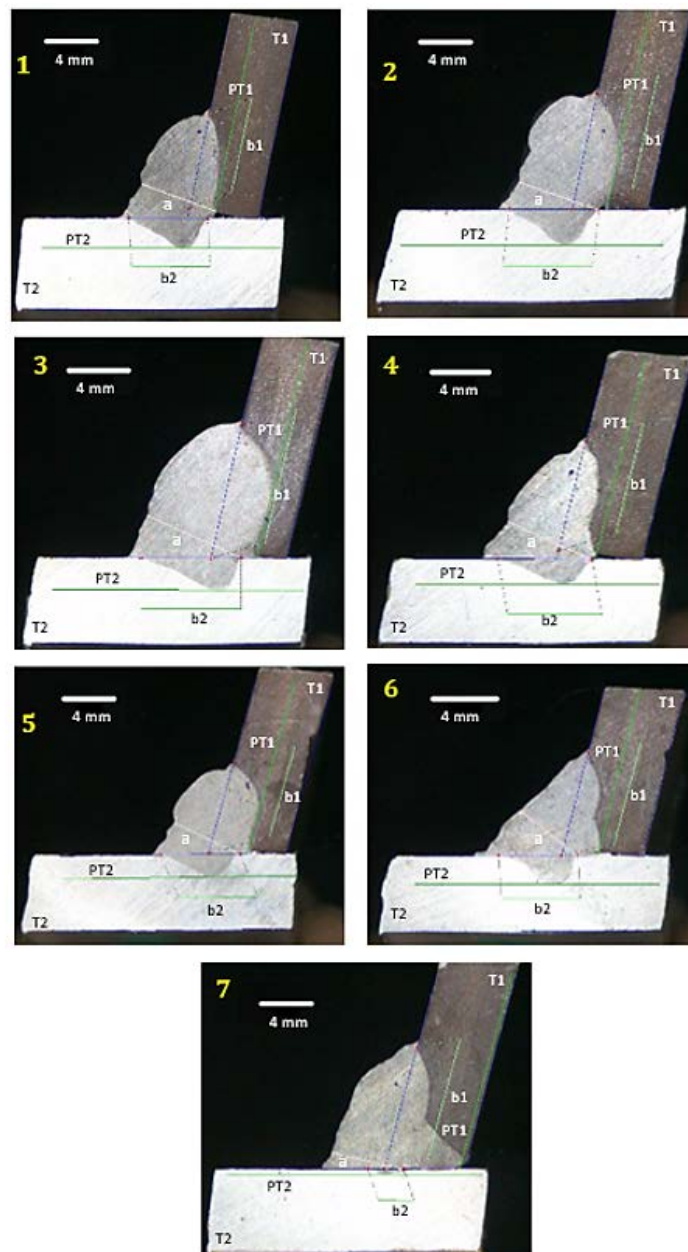


Figura 4- Macrográficas de los 7 cordones de las pruebas preliminares, donde: espesor de material 1 = T1, espesor de material 2 = T2, garganta = a, longitud de pierna = b1, longitud de pierna = b2, penetración en T1 = PT1, penetración en T2 = PT2

El análisis macroestructural de las uniones preliminares está enfocado en la disminución de la porosidad, sin embargo, se deben considerar adicionalmente otras variables de salida para garantizar que se cumplan las especificaciones requeridas por la industria automotriz. Dentro de estas especificaciones se encuentra la longitud de garganta de la unión (a), la cual debe tener un mínimo de 2.80 mm; profundidad de penetración en material base (T1 y T2), ambas con una especificación mínima de 0.50 mm y la más importante y en la cual está enfocado este estudio, el diámetro del poro debe tener como máximo 0.84 mm de diámetro. De acuerdo con las especificaciones mencionadas anteriormente, en las 7 uniones de las pruebas preliminares se hicieron mediciones en diferentes áreas, las cuales se enlistan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de mediciones en los 7 experimentos preliminares.

Expe.	Variable de salida (mm)								
	Espesor de material 1 / T1	Espesor de material 2 / T2	Garganta / a	Longitud de pierna / b1	Longitud de pierna / b2	Penetración en T1	Penetración en T2	Diámetro de Poro	
1	5.04	5.44	5.79	5.78	5.83	1.84	1.77	0.24	
2	5.08	5.53	5.75	7.16	6.18	2.31	2.15	0.15	
3	4.83	5.36	6.65	8.46	6.56	2.93	2.00	0.25	
4	4.97	5.21	5.51	6.95	5.57	2.22	1.57	0.37	
5	5.08	5.47	5.00	6.76	5.41	2.55	1.65	0.26	
6	5.03	5.32	4.71	7.41	5.06	2.25	2.03	0.00	
7	5.11	5.38	4.89	8.04	2.38	4.82	0.38	0.22	

De las macrográficas y mediciones anteriores, el cordón que presentó mejores resultados fue el experimento 3, el cual se muestra en la Figura 5. Mientras que la que no cumplió favorablemente fue el experimento 7, el cual se muestra en la Figura 6.

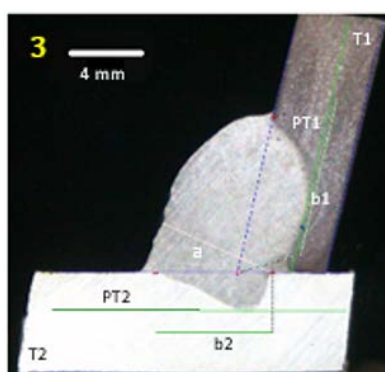


Figura 5. Macrografía de cordón de experimento 3, garganta/a de 6.65, profundidad de penetración en material base T1 de 2.93, profundidad de penetración en material base T2 de 2.00 y la especificación de poro de 0.25 mm

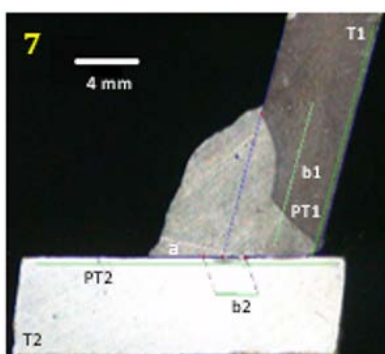


Figura 6. Macrografía de cordón de experimento 7, garganta/a de 4.89, profundidad de penetración en material base T1 de 4.82, profundidad de penetración en material base T2 de 0.38 y la especificación de poro de 0.22 mm

3.2. Pruebas finales

De acuerdo con los resultados preliminares, se tomaron los valores de los parámetros empleados para el experimento número 3 (Tabla 6), esto con la finalidad de reproducir las condiciones y disminuir la porosidad en las uniones (Tabla 7).

Tabla 6. Parámetros de soldadura utilizados en el cordón de experimento 3

Programa de soldadura	Programa 50	Programa 51	Programa 52	Programa 53
Angulo de trabajo	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha	22 grados / Antorcha
Angulo de viaje	Empuje	Empuje	Empuje	Empuje
Stick-out	16 mm.	16 mm.	16 mm.	16 mm.
Corriente	195 A.	195 A.	195 A.	195 A.
Velocidad de alimentación de hilo	5.2 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.	5.2 m/min.
Voltaje	16.7 V	16.7 V	16.7 V	16.7 V
Corrección de arco voltaico	0.0	0.0	0.0	0.0
Corrección Dinámica / Pulsado	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
Tipo de corriente	Corriente directa electrodo positivo			

Tabla 7. Resultados del experimento de repetibilidad basado en el experimento preliminar 3

Expe.	Variable de salida (mm)								
	Espesor de material 1 / T1	Espesor de material 2 / T2	Garganta / x/a	Longitud de pierna / b1	Longitud de pierna / b2	Penetración en T1	Penetración en T2	Diámetro de Poro	
1	5.02	5.59	6.24	7.85	6.97	2.57	2.36	0.00	

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En investigaciones sobre el estudio del comportamiento del charco de soldadura y sus influencias en los efectos en la unión soldada por el proceso GMAW en aleaciones de aluminio 5083 [11], se encontró que la porosidad es fácil de producir cerca de las paredes laterales cuando se aumenta la corriente de soldadura, utilizando un valor de 200 A, el cual se tomó en cuenta para la selección de la corriente aplicada a la experimentación de este trabajo, donde el valor de corriente es de 195 A con una velocidad de alimentación de hilo de 5.2 m/min, con la finalidad de disminuir la presencia de porosidad.

El análisis macroestructural de la unión del experimento de repetibilidad basado en el experimento preliminar 3 es mostrado en la Figura 7, donde se observa la reproducibilidad, repetitividad y mejora en la disminución de presencia de poros. Analizando los resultados de las variables de salida mostrados en la Tabla 7, se observa que al mantener la alimentación de alambre constante durante la aplicación de la soldadura en los 4 programas que conforma la ruta del cordón, las variables de salida como longitud de pierna con valores de 7.85 mm para b1, para b2 de 6.97 mm y penetración similar en T1 de 2.57 mm, para T2 de 2.36 mm, se presenta una mejora en la presencia de poros con diámetros menores a 0.5 mm.

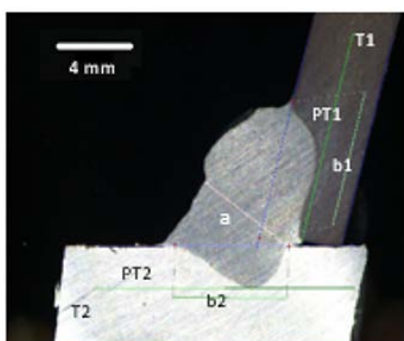


Figura 7. Macrografía de cordón de experimento final utilizando los parámetros del experimento preliminar 3, garganta = a de 6.24, profundidad de penetración en material base 1 = PT1 de 2.57, profundidad de penetración en material base 2 = PT2 de 2.36 y la especificación de diámetro de poro de 0.00 mm

Las velocidades de aplicación de cordones de soldadura en aleaciones disimilares de aluminio son una variable esencial. En otras investigaciones se ha estudiado el efecto de esta variable sobre la tensión residual y distorsión en aleaciones de aluminio Al6061-T6 para una configuración en T [12-14], mostrando que el aumento de la velocidad de aplicación disminuye la deflexión vertical en el material base, contracción transversal, distorsión angular y la deflexión lateral, pero aumenta la tensión de la tracción longitudinal, además, el aumento de la corriente de soldadura incrementa la tensión residual y la deformación del material base. Es por ello que se utilizan los valores de 8 mm/s y 10 mm/s utilizados en estos estudios, obteniendo que la distorsión del material base no presentó un cambio significativo en la distribución de la

tensión residual longitudinal, por lo tanto, la variable de velocidad de aplicación es esencial para la unión de los materiales base, ya que con una correcta aplicación se obtienen cordones sin distorsión y tensiones residuales controladas.

En la Figura 8 se muestra la microestructura final del experimento 3, la cual fue realizada mediante microscopía óptica, donde se observan tres zonas importantes, siendo material base, zona afectada térmicamente y zona de soldadura.

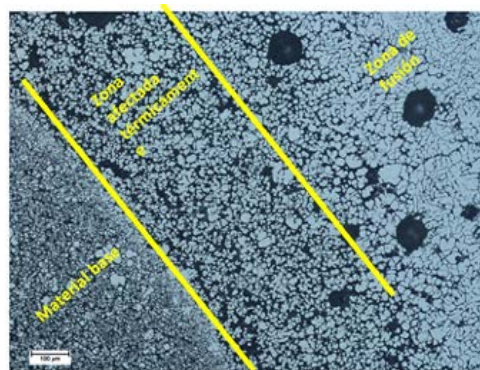


Figura 8. Micrografía de cordón de experimento 3 utilizando los parámetros finales, mostrando las zonas de material base, zona afectada térmicamente y zona de fusión

En la microestructura se observan poros con diámetros menores a 0.1 mm, los cuales son descartados según las normas de la industria automotriz, las medidas en la calificación de longitudes de pierna, profundidad de penetración y garganta, están dentro de especificación.

De igual manera se hicieron análisis mediante microscopía electrónica de barrido, en donde se analizaron 3 áreas diferentes en la zona de fusión y se hicieron análisis mediante la técnica EDS para conocer los elementos presentes (Figura 9). En estos análisis se puede observar un alto porcentaje de presencia de aluminio, magnesio y silicio, ya que ambas aleaciones tienen a estos elementos como base.

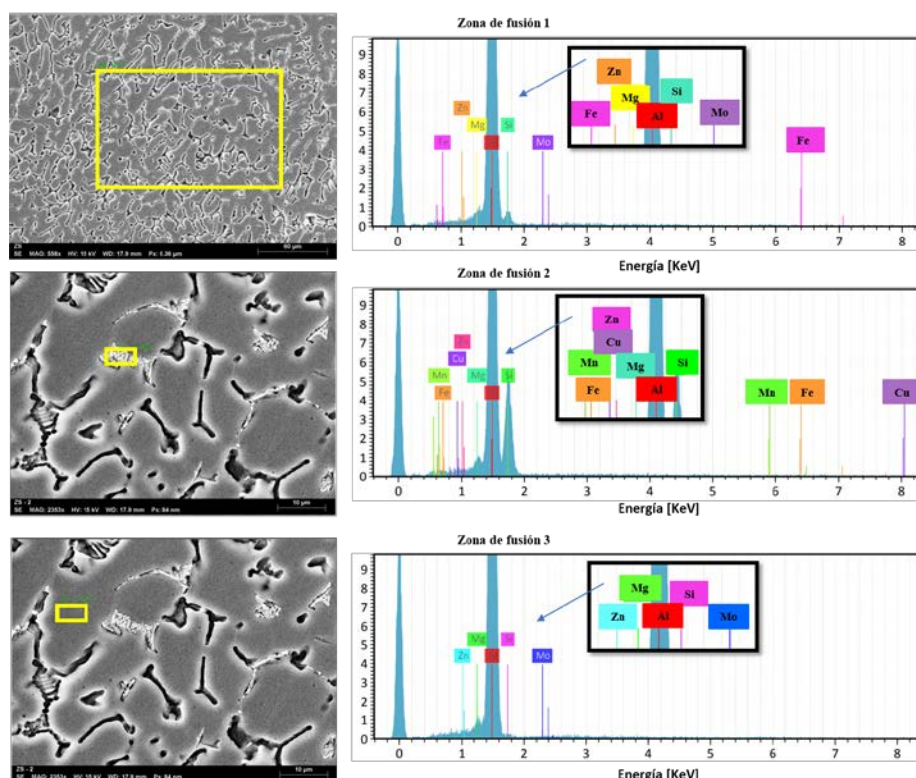


Figura 9. Imágenes obtenidas por microscopio electrónico de barrido mostrando 3 áreas de la zona de fusión y sus análisis por EDS

Se puede observar una morfología eutéctica característica de las aleaciones aluminio-silicio, sin embargo, se tiene poca presencia de la fase CuAl_2 , la cual favorece el incremento de resistencia en la unión. Esto se confirma con la observación en un estudio comparativo de mecánica y metalurgia de las propiedades de aleaciones de aluminio AA2219 en uniones de soldadura preparadas mediante el proceso GTAW y el proceso GMAW [15].

También se llevó a cabo el análisis de microdureza Vickers (HV) en todas las áreas de la soldadura, tal como se muestra en la Figura 10. Se realizó un perfil de 10 indentaciones a 1.0 mm de distancia entre ellas y fue realizado de forma perpendicular.

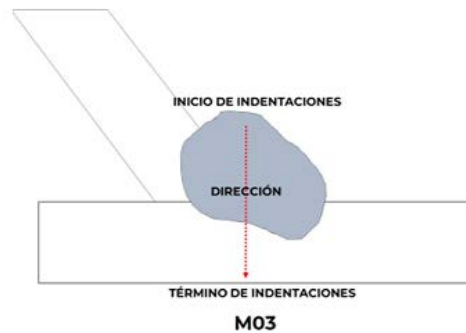


Figura 10. Representación esquemática del perfil de microdureza Vickers HV

En la Figura 11 se muestra la gráfica del perfil de dureza que se realizó en la unión. En ella se puede observar que mantiene una dureza promedio de 92.38 HV, en toma de 10 lecturas.

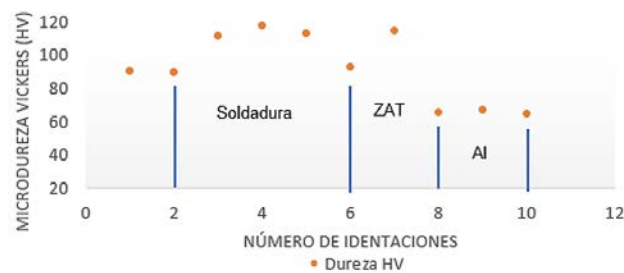


Figura 11. Gráfica de perfil de microdureza Vickers HV de muestra 3

5. CONCLUSIONES

Los mejores valores de salida para las variables esenciales de entrada del proceso GMAW-CMT son los obtenidos del experimento preliminar 3, el cual cumplió con las especificaciones de la industria automotriz, teniendo valores de garganta de 6.65 mm, profundidad de penetración en material base 1 de 2.93 mm, profundidad de penetración en material base 2 de 2.00 mm y la especificación de poro de 0.25 mm.

Del experimento de reproducibilidad y repetibilidad se obtuvieron medidas de garganta de 6.24 mm, profundidad de penetración en material base 1 de 2.57 mm, profundidad de penetración en material base 2 de 2.36 mm y la especificación de diámetro de poro de 0.00 mm, este último no excediendo la especificación de los estándares automotrices.

La dureza obtenida promedio fue de 92.38 HV tomada de 10 lecturas, obteniendo una mayor dureza en la zona de soldadura con un valor de 117 HV, relacionándolo a la presencia de la fase CuAl_2 , la cual ayudó en el incremento de resistencia de la unión.

REFERENCIAS

- [1] Fronius GB, "Aluminium-Welding", 42,0410,0590, 01-2004.
- [2] Anderson T., "Welding Aluminum Questions and Answers", 2da edición, USA, Sociedad Americana de Soldadura (AWS), 2010.

- [3] F. James, "Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros", Pearson Educación, 2005.
- [4] ISTUC, "Modulo 1 procesos de soldadura", 2021.
- [5] S. Selvi, A. Vishvakshnan, E. Rajasekar "Cold metal transfer (CMT) technology", *Defence Technology* vol. 14, pp. 28-44, 2018.
- [6] Fronius GB, "CMT Process", 42,0410,0670, 01-2006.
- [7] DIN EN 1706, "Aluminium and aluminium alloys, Castings, Chemical composition and mechanical properties", German version EN 1706:2010.
- [8] DIN EN 6060, "Aluminium and Chemical composition and mechanical properties", German version EN 6060:2010.
- [9] BMW Group Standard, "Welding technology, Gas-shielded arc welding on aluminum and aluminum alloys, requirements, tests and rework", GS 96015-2: 2019-02
- [10] G. Gou a, M. Zhanga, H. Chena, J. Chena,b, P. Li c, Y.P. Yang d. "Effect of humidity on porosity, microstructure, and fatigue strength of A7N01S-T5 aluminum alloy welded joints in high-speed", *Materials and Design* vol. 85, pp. 309–317, 2015.
- [11] C. Zhu, J. Cheon, X. Tang, Suck-Joo Na, H. Cui. "Molten pool behaviors and their influences on welding defects in narrow gap GMAW of 5083 Al-alloy", *International journal of heat and mass transfer*, vol. 126, pp. 1206-1221, 2018.
- [12] R.R. Ambriz, G. Barrera, R. García, V.H. López. "The microstructure and mechanical strength of Al-6061-T6 GMA welds obtained with the modified indirect electric arc joint", *Materials and Design* vol. 31, pp. 2978-2986, 2010.
- [13] A. Haselhuhn, M. Buhr, B. Wijnen, P. Sanders, J. Pearce. "Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing", *Materials Science & Engineering A*, vol. 673, pp. 511–523, 2016.
- [14] A. Khoshroyan, A. Rahmati. "Effects of welding parameters and welding sequence on residual stress and distortion in Al6061-T6 aluminum alloy for T-shaped welded joint", *Trans. Nonferrous Met. Soc.* vol. 30, pp. 76–89, 2020.
- [15] S. Arunkumar, P. Rangarajan, K. Devakumaran, P. Sathiya. "Comparative study on transverse shrinkage, mechanical and metallurgical properties of AA2219 aluminium weld joints prepared by gas tungsten arc and gas metal arc welding processes", *Defence Technology* vol. 11, pp. 262-268, 2015.

Estudio de la cinemática del gesto deportivo de remate en jugadores de voleibol mediante el uso de videometría digital

Johan Sebastián Becerra Fuentes¹

Yolanda Torres Pérez²

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio biomecánico de la habilidad de los jugadores del equipo de voleibol de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia cuando realizar el gesto del remate. Se seleccionaron ocho jugadores de voleibol (4 hombres y 4 mujeres) como muestra poblacional de estudio. La edad de los sujetos de estudio oscila entre 18-28 años. Se seleccionaron diferentes variables biomecánicas para medir y evaluar, algunas de ellas son: trayectoria, velocidad, aceleración y ángulo de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla y tobillo. El registro de los movimientos de los jugadores se realizó mediante dos cámaras de alta velocidad (Canon-10S R) ubicadas en el plano sagital derecho e izquierdo en la cancha. Cada jugador se registró haciendo movimientos de remate por un periodo de 2 minutos. Posteriormente, los videos fueron analizados mediante el software Kinovea 0.9.3. Después de la recolección de datos se graficaron las curvas con las trayectorias de los puntos anatómicos y los ángulos de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla y tobillo durante el remate. El resultado del estudio evidencia diferencias desde el punto de vista cinemático en la ejecución del remate por parte de los jugadores. Asimismo, se puede observar la diferencia en los gestos de los deportistas asociados a sexo, medidas antropométricas, tiempo acumulado de entrenamiento, entre otras. Con estas curvas cinemáticas del remate los entrenadores pueden evaluar el desempeño de cada jugador y diseñar rutinas para mejorar la técnica de cada uno.

¹ Contacto: johan.becerra@uptc.edu.co

² Contacto: yolanda.torres01@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El gesto deportivo es la base de cualquier disciplina deportiva y que los deportistas deben intentar dominarlo para conseguir los mejores resultados, sea cual sea su práctica deportiva. [1] Por lo cual es importante tener en cuenta la biomecánica, la cual estudia los modelos, fenómenos y leyes que sean relevantes para la explicación del movimiento (incluyendo situaciones de equilibrio estático de los cuerpos). Es una disciplina científica que tiene por objeto el estudio de las estructuras de carácter mecánico que existen en los seres vivos, fundamentalmente del cuerpo humano [2]. Específicamente, la biomecánica deportiva es una ciencia enfocada en métodos para análisis de sistema locomotor de las personas, estudiando las fuerzas internas y externas que actúan sobre el cuerpo humano, que junto con las reacciones que producen, generándose así la necesidad de usar equipos tecnológicos y biomédicos especializados para su entendimiento.

El objeto de estudio en esta disciplina de la biomecánica son las técnicas deportivas, las cuales se agrupan por deportes según sus enfoques: deportes de fuerza rápida, deportes de resistencia, deportes de exactitud y expresión, juegos deportivos y deportes de combate, estos últimos se caracterizan por la interacción activa entre los participantes y la aplicación combinada de elementos técnicos, por ejemplo: fútbol, voleibol, boxeo y tenis [3].

En este estudio se trabajó con el voleibol, el cual se juega por dos equipos en una cancha de 18x9 metros, dividida por una red (de 2.43 metros de alto para los hombres y 2.24 metros para las mujeres). Cada selección tiene permitido que seis jueguen en la cancha. El partido se pone en marcha cuando se realiza el saque, que manda la bola a la otra mitad contraria de la pista. Los equipos tienen permitido tocar el balón tres veces antes de que este deba cruzar la red hacia la parte de la pista rival. Las selecciones intentan mandar el balón a la red con la intención de que toque el suelo del oponente contrario, mientras buscan evitar que el rival lo consiga. Los jugadores requieren tener una gran energía durante los partidos, y también enorme capacidad de reacción, ya que el balón puede llegar a velocidades de 130km/h. [4] Por ello se decidió trabajar la biocinemática del remate en voleibol. La biocinemática es la rama de la biodinámica que analiza los movimientos de los cuerpos teniendo en cuenta las causas que lo generan y de las fuerzas que lo producen [5].

Una de las herramientas más utilizadas en la biocinemática es la videometría digital que se fundamenta en el análisis cinemático de vídeos del gesto deportivo de interés, que, con respecto a la percepción de movimientos en tiempo real, suministra parámetros como velocidades lineales y angulares, ángulos, desplazamientos, trayectorias, entre otras, con lo cual se puede analizar y estudiar el movimiento de los individuos (deportistas, pacientes, niños, etc.) [6, 7].

El objeto central de este estudio es el "gesto de remate", es cuando la pelota es golpeada o aplastada contra la red. El remate es el movimiento más poderoso del voleibol y la forma más efectiva de ganar un juego [8], el cual consta de cinco fases: 1) Corrida de aproximación, 2) impulso, 3) preparación para el golpe, 4) golpe de la bola, y 5) caída [9].

En comparación con otros deportes como el fútbol, se tiene una desventaja en cuanto a la capacidad de análisis de los gestos a través de los entrenadores, dado que en el fútbol se cuenta con hasta 4 personas (entrenador principal, entrenador secundario, preparador físico y entrenador de porteros) que realizan observaciones de los gestos deportivos durante los entrenamientos y los partidos oficiales, todo ello en relación a datos de desempeño (performance) de los jugadores, mientras que en equipos élite de voleibol sólo se tienen dos observadores por equipo (primer y segundo entrenador) y peor aún, en la mayoría de casos, los equipos convencionales sólo cuentan con el entrenador principal, que sólo cuenta con sus dos ojos para tratar de captar y almacenar en su memoria los hechos sucedidos [10, 11].

Por la anterior situación, en los equipos convencionales de voleibol, así como en otros deportes, se evidencia la falta de herramientas y equipos para realizar procesos de evaluación, estudio y análisis cualitativo y cuantitativo de su trabajo de entrenamiento, formación, diagnóstico y evaluación del gesto deportivo de los jugadores. En la actualidad, para esta labor la mayoría de los entrenadores utilizan su experiencia y el

sentido de la vista para poder hacer las evaluaciones de la técnica y de los movimientos de los jugadores que dirigen, pero estas valoraciones visuales se limitan a una técnica meramente cualitativa, subjetiva y no reproducible, ni cotejable en el tiempo.

El análisis biomecánico en el deporte ha ido evolucionando en los últimos años, debido al avance tecnológico de software y hardware para tal fin. El estudio de [12] tuvo como propósito caracterizar cinemáticamente el gesto técnico del remate en jugadoras de voleibol, para lograr esto se analizaron 38 parámetros cinemáticos, entre ellos: tiempos entre eventos, posición del centro de masas, velocidades y altura del remate. Se describieron parámetros como tiempo de vuelo, velocidad de impulsión vertical, salida del balón y rango de movimientos en brazo ejecutor, entre otros, con valores cercanos a los publicados por otros autores. Dicho estudio, permitió definir un protocolo y modelo de informe como herramienta para el entrenamiento personalizado en función de las deficiencias observadas y para prevenir posibles lesiones a medio/largo plazo.

En Brasil [8] se hizo una revisión bibliográfica en la que se presentaron los aspectos cinemáticos y cinéticos de las fases del saque en suspensión y del ataque, cuya conclusión fue que la biomecánica merece ser utilizada durante las sesiones del entrenamiento con el propósito de proporcionar un incremento en la ejecución del saque en suspensión y del ataque. En la investigación de [13] se demuestra que la altura de salto depende de la velocidad del centro de masa y que la velocidad de la pelota está relacionada con las variables de velocidad del brazo y el tronco del jugador, además que el rendimiento de remates cruzados desde la posición 4 está asociado con la rotación del tronco del jugador.

El estudio de la biomecánica de las habilidades del voleibol es importante para que el entrenador entienda las respuestas cinemáticas y cinéticas de esas técnicas deportivas. En el ámbito deportivo mundial, la labor observacional de los entrenadores no debe limitarse a juicios subjetivos y cualitativos basados en su experiencia, por ello en el presente estudio se les ofrece una herramienta que a través de un proceso de análisis biocinemático objetivo y cuantitativo les permita diseñar planes de entrenamientos más efectivos basados en datos que provienen de videos, números y gráficas obtenidas a través de la videometría.

En este sentido, los entrenadores y técnicos deportivos deben conocer las características del movimiento bajo análisis, al igual que los factores que contribuyen para una ejecución fluida y hábil del movimiento. Teniendo presente que una técnica defectuosa impide al atleta usar sus capacidades físicas (fuerza, flexibilidad, resistencia, etc.) máximas impidiendo la mejora de su desempeño [14].

El objetivo de esta investigación es generar curvas cinemáticas del remate de jugadores de voleibol de la UPTC, mediante la implementación de un protocolo de videometría, con el fin de ayudar al entrenador en el mejoramiento de la técnica, eficiencia y rendimiento de los deportistas.

2. MÉTODO

La investigación que se realiza en este proyecto es una combinación de tipo experimental, descriptiva, analítica, pues la misma, como su nombre lo indica comprende la descripción, así como el, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición de los fenómenos bajo estudio; en ella, el enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo un individuo, grupo o cosa funciona en el presente [15]. En relación a esto, esta investigación se enfoca en el análisis de tiempos, trayectorias, velocidades, aceleraciones, y ángulos articulares de articulaciones como: muñeca, codo, hombro, cadera, rodilla y tobillo durante la ejecución del saque con salto de los jugadores de voleibol del equipo profesional de la UPTC. Igualmente, el enfoque metodológico utilizado es mixto puesto utiliza datos cuantitativos (ángulos, tiempo) y cualitativos (técnica durante la ejecución de los gestos deportivos de los jugadores de voleibol).

2.1 Selección de la muestra poblacional

Se cuenta con la participación de ocho deportistas (4 hombres y 4 mujeres) y el entrenador del equipo de voleibol de la UPTC. Los deportistas se seleccionaron de acuerdo al nivel de experiencia y destreza (elite, amateur, en formación), según su edad y disponibilidad de tiempo.

2.2 Grabaciones

Se hizo el montaje de la cámara de video (lateral derecho) en el coliseo y se procedió a realizar pruebas de calibración y grabación previas a las grabaciones con deportistas como se evidencia en la Figura 1, se realizaron entrenamientos y prácticas de prueba y finales en el coliseo mayor de Duitama, con deportistas en donde se utilizaron cámaras de media-alta velocidad, entre ellas la Canon EOS R, marcadores anatómicos, cintas métricas, goniómetros, entre otros, a fin de recopilar información para generar el protocolo teórico experimental para registrar, medir y evaluar el gesto deportivo de cada uno de los jugadores seleccionados para el estudio.

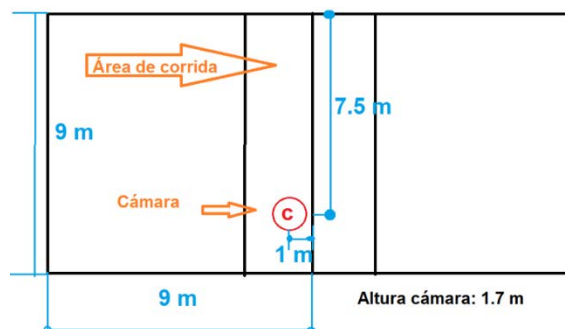


Figura 1. Montaje de cámara para el estudio de videometría

Se continuó con la realización de los remates de cada deportista. Estos movimientos se grabaron varias veces para tener varios videos del mismo gesto (10 remates), con el fin de tener mayor cantidad de información y poder procesar los videos a través del Software Kinovea, generar curvas cinemáticas de velocidades angulares y lineales de puntos anatómicos, así como las curvas cinemáticas angulares de las articulaciones de interés.

2.3 Procesamiento de vídeos

Los videos se cortaron y se organizaron de tal forma que se delimitaron los fotogramas que correspondían al gesto deportivo, para luego ser importados al software Kinovea 0.9.3 en donde se hizo el respectivo análisis

2.4 Generación de las curvas gráficas

Se generaron las curvas de velocidades angulares y lineales de cada uno de los marcadores anatómicos (Figura 2) a lo largo del 100% del remate, así como las curvas de los movimientos angulares de articulaciones de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo que son de interés para la investigación.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Selección de la muestra poblacional

Inicialmente, los deportistas previamente seleccionados se capacitaron sobre el protocolo de evaluación del gesto deportivo que van a realizar, firmaron un consentimiento informado para la realización de mediciones como peso corporal y longitudes-perímetros de segmentos corporales (Tablas 1, 2 y 3), la grabación de las prácticas de entrenamiento y el uso ético-responsable de la información, así como de los resultados obtenidos en este proyecto, se tomó como muestra poblacional a 4 jugadores hombres y 4 mujeres.

Tabla 1. Medidas antropométricas, altura de las articulaciones en cm de algunos jugadores

Jugador	Tobillo	Rodilla	Cadera	Hombro	Codo	Muñeca	Total
Jesús	10.3	53.5	101	148	115	91.5	179
Camilo	13	56	100	149.5	115	86.5	183
Laura	11	49.5	96	139	109	85	168
Majo	10.5	45.5	94	138	106	83	164

También se tomaron las longitudes de los segmentos corporales como brazo, antebrazo, pierna, entre otros (Tabla 2).

Tabla 2. Medidas antropométricas, longitud de los miembros corporales de algunos jugadores

Jugador	Pie con calzado	Pierna	Muslo	Brazo	Antebraz	Mano	Ancho hombro
Jesús	42	43.5	48.2	34	28.5	18	56
Camilo	43,5	44	50	37	30.5	20.2	57.5
Laura	36	39.3	48.5	39.5	25	17.5	45
Majo	36.5	35.5	49.5	31	27.5	16.5	43

En la Tabla 3 se evidencian los perímetros de diversas partes del cuerpo de los jugadores.

Tabla 3. Medidas antropométricas, perímetro de las partes del cuerpo de algunos jugadores

Jugador	Antebrazo	Brazo	Cadera	Cintura	Metacarpo	Metatarso con calzado	Muslo	Pecho	Pierna
Jesús	28.2	34.8	105.5	93.3	23.1	33,4	63	107.4	38.8
Camilo	29	33.2	102.6	92.3	21.9	35.1	59.4	101.6	41
Laura	22	24.6	92.5	70	19	27	56.5	90	32
Majo	21.8	24	92.8	68.2	18.8	28	54.4	86	31.1

Posteriormente, se realizó una valoración biomecánica de los deportistas seleccionados. Se realizaron mediciones antropométricas de deportistas en cuanto a peso, altura, longitud y pesos de segmentos corporales, ángulos articulares máximos y mínimos, entre otras. Se determinaron los movimientos, ángulos, trayectorias, medidas, gestos, entre otros, que son de interés y que se deben estudiar y evaluar mediante la técnica de videometría, con el fin de mejorar la calidad de los gestos deportivos de los jugadores en competencia. Para la colocación de los marcadores anatómicos corporales, se tomó como referencia el protocolo de Davis [16-18] (Figura 2).



Figura 2. Posición de marcadores anatómicos corporales: a) frontal, b) sagital

3.2 Procesamiento de vídeos

Los videos del gesto deportivo de los jugadores se cortaron y se seleccionaron de tal forma que quedaran rotulados y debidamente organizados (Figura 3), posteriormente se importaron en el software Kinovea 0.9.3 en donde se realizó un pre-procesamiento por cada deportista con el fin de delimitar los fotogramas correspondientes a las fases del saque con salto (Figura 4), para el posterior procesamiento de las variables cinemáticas (Figura 5) [19].



Figura 3. Videos rotulados y organizados de un jugador

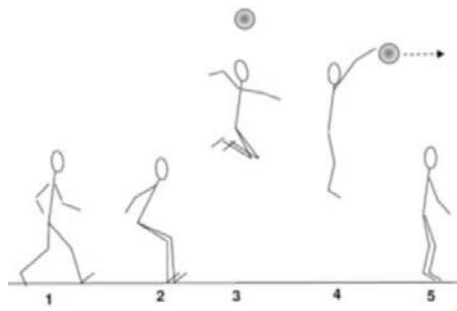


Figura 4. Fases del remate en voleibol: 1) Corrida de aproximación, 2) impulso, 3) preparación para el golpe, 4) golpe de la bola, 5) caída [7]

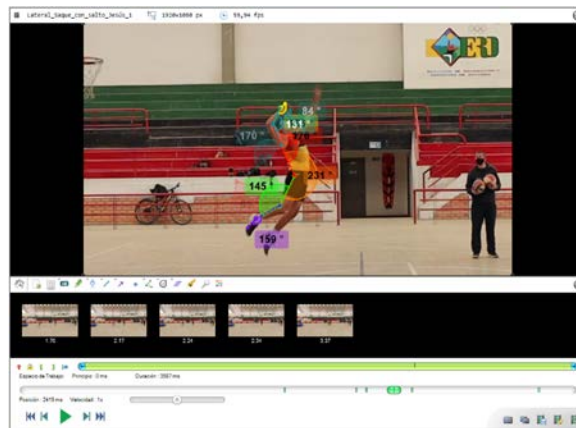


Figura 5. Interfaz gráfica del software Kinovea al procesar video

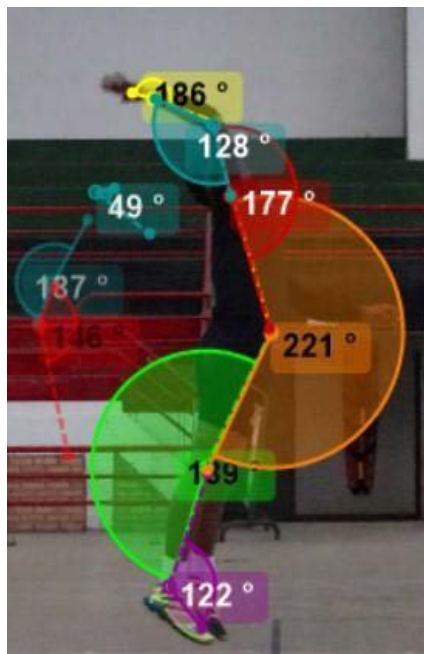


Figura 6. Ángulos medidos en el software Kinovea 0.9.3 a través de los marcadores corporales colocados en los jugadores de voleibol

Para analizar el remate es preciso tener en cuenta las fases en la ejecución del gesto deportivo, pues cuando el deportista realiza el movimiento y si hay alguna falla o ineficiencia, se podría verificar en qué fase debería trabajar para ejecutar el movimiento de una mejor manera, por ejemplo si no está saltando a una altura recomendable, puede ser porque su velocidad lineal en la corrida de aproximación no es la suficiente, entonces la aplicación de la videometría juega un papel importante para el entrenamiento.

En la Tabla 4, se observa la configuración del registro y medición de los ángulos articulares para procesar los videos de saque con salto, en la primera columna se tiene el tipo de articulación a trabajar, en la segunda columna se especifica el número de ángulos que se requieren medir durante la ejecución del gesto

deportivo, la tercera, cuarta y quinta columna, hacen referencia a la configuración de tipo que requiere cada ángulo por variable.

Tabla 4. Configuración de ángulos para el procesamiento de videos de remate

Saque con salto					
Ángulo	Ángulos	1	2	3	Tipo
Muñeca	1				Ángulo con signo
		X			Antihorario
Codo	3				Ángulo con signo
			X		Antihorario
Hombro	2	X			Ángulo con signo
		X	X		Antihorario
Cadera	1				Ángulo con signo
					Antihorario
Rodilla	1				Ángulo con signo
		X			Antihorario
Tobillo	1				Ángulo con signo
					Antihorario

El denominado *ángulo con signo* es la configuración del ángulo que mide ángulos positivos y negativos con un rango de 180°, mientras que el *antihorario* es la configuración angular que permite medir un ángulo en sentido horario o antihorario, para acceder a la configuración de cada uno de ellos se utilizan las opciones de un menú secundario del software Kinovea.

En el movimiento del codo, que es fundamental su estudio para analizar el remate, requiere de la medición de tres ángulos en un mismo gesto (Figura 7) debido a que, en el momento de la preparación para el golpe de la bola, se genera rotación en las extremidades superiores, debido a la naturaleza del movimiento del tren superior, comprendido por hombro, codo y muñeca, si se analiza desde el plano lateral cambia la perspectiva visual del ángulo y en cierto punto, el software mediría el ángulo conjugado, lo que cambia la perspectiva visual del ángulo y el software mediría el ángulo complementario, de manera que se continúa el procesamiento a partir de ese punto con otro ángulo con una configuración diferente, ya sea sentido antihorario o ángulo con signo, de no hacer este ajuste, se tendría una lectura equivocada y discontinua de este movimiento.



Figura 7. Configuraciones usadas para procesar el ángulo del codo

3.3 Generación de las curvas cinemáticas

Luego de realizar el ordenamiento, clasificación y procesamiento de los vídeos en el software Kinovea 0.9.3 a través de los marcadores corporales colocados en los jugadores de voleibol, de cada vídeo de cada jugador, se generaron las curvas de velocidades angulares y lineales de cada uno de los marcadores anatómicos (Figura 8) a lo largo del 100% del remate, así como las curvas de los movimientos angulares de articulaciones de hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo que son de interés para la investigación. Luego se procedió a hacer una extracción de datos estructurados y multimedia (videos), para realizar una limpieza de datos (validación de fuentes), con el propósito de evaluar su calidad y confiabilidad para formar parte del análisis biomecánico del gesto deportivo.

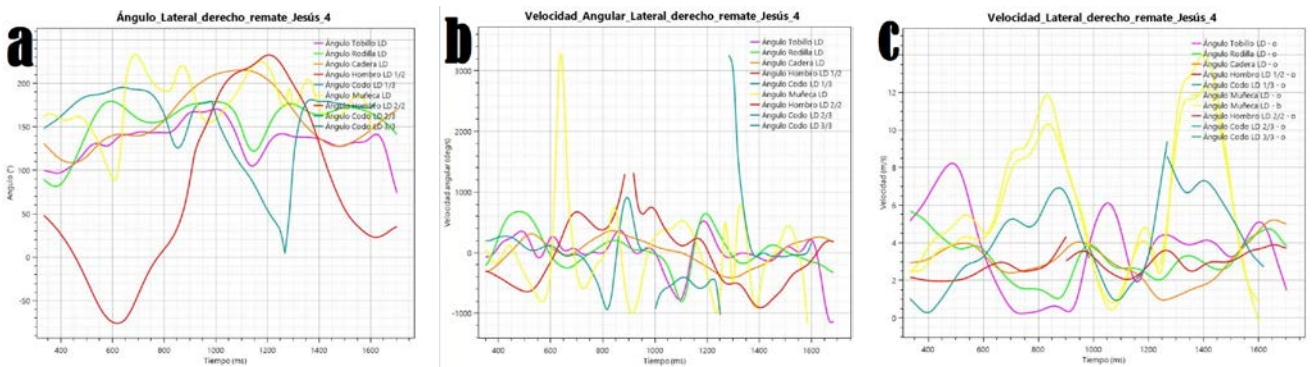


Figura 8. Curvas cinemáticas del remate visto desde el plano lateral de jugador masculino, arrojados por el software Kinovea: a) Ángulos, b) Velocidad angular, c) Velocidad lineal

Para las velocidades lineales es importante tener una referencia de medida real para parametrizar todas las medidas en el software de Kinovea, por lo que se usó la medida de las baldosas del piso, las cuales tienen una medida de 33,30 cm de longitud (Figura 9) y así éste tiene una referencia para generar datos de velocidad en unidades reales que, junto con los videos son los insumos cualitativos y cuantitativos del entrenador y los deportistas para el diseño de estrategias de mejoramiento de la técnica del gesto deportivo de remate estudiado

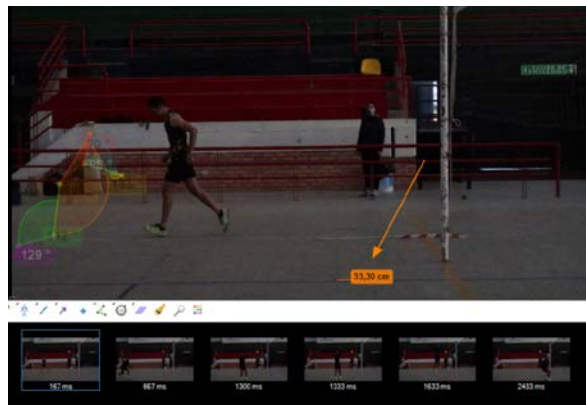


Figura 9. Calibración de medida en el software

A continuación, se presentan algunas de las curvas cinemáticas de los jugadores de voleibol sujetos de estudio, en donde se pueden observar algunos movimientos angulares articulares, velocidades lineales y angulares de puntos anatómicos de interés dentro de la biomecánica del gesto de remate en voleibol (Figura 10 a 17). En la sección a) se ven los ángulos, se caracterizan por que la curva del hombro, que es la roja tiende a ser sinusoidal, en la sección b) se ven las velocidades angulares, algunas presentan picos exagerados, pero es error del dibujo que arroja el software, debido a que en esos puntos hubo que utilizar un ángulo nuevo, para poder captar la totalidad del movimiento de la articulación, eso mismo ocurre en la sección c) que presenta las velocidades lineales, que se caracteriza principalmente por la velocidad de corrida, que se puede ver en la curva naranja, correspondiente a la cadera, que es en donde aproximadamente se ubica el centro de masa.

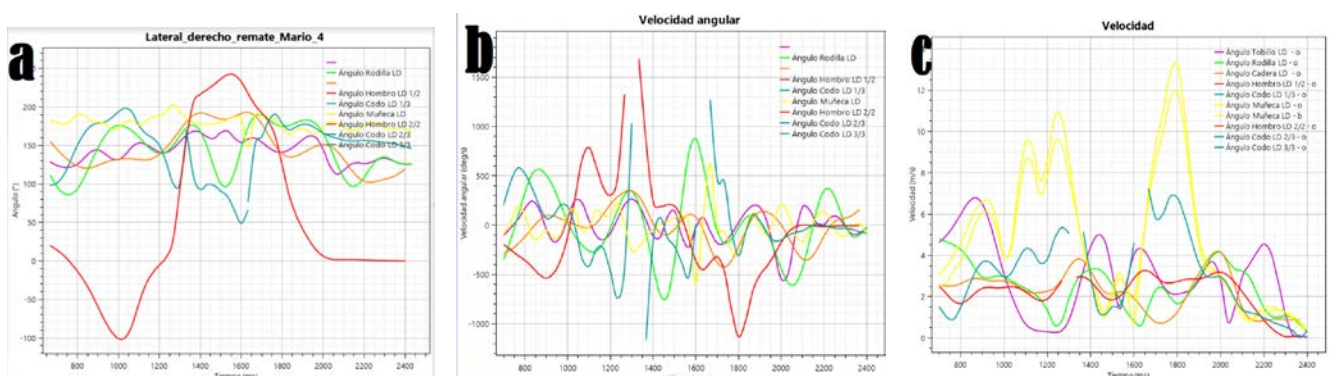


Figura 10. Curvas cinemáticas del jugador Mario: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

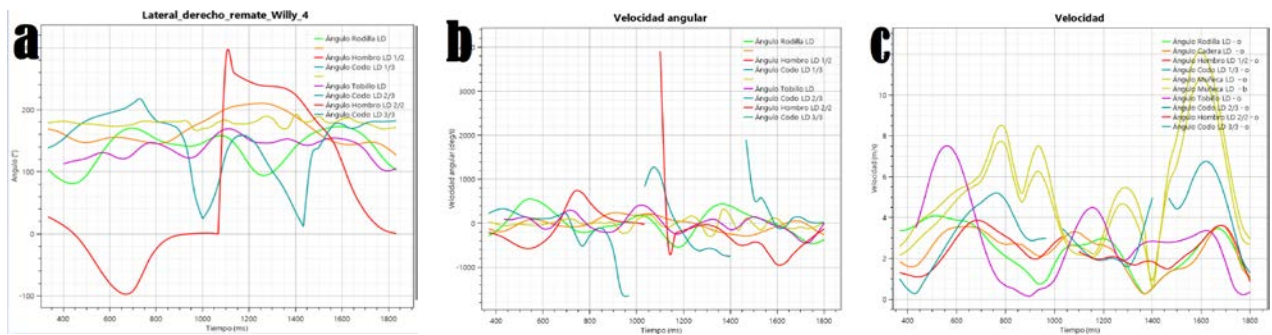


Figura 11. Curvas cinemáticas del jugador Willy: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

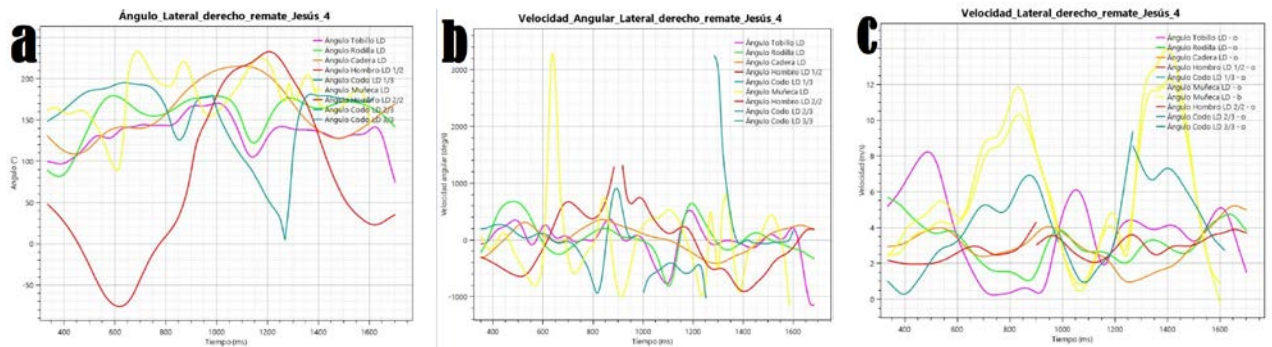


Figura 12. Curvas cinemáticas del jugador Jesús: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

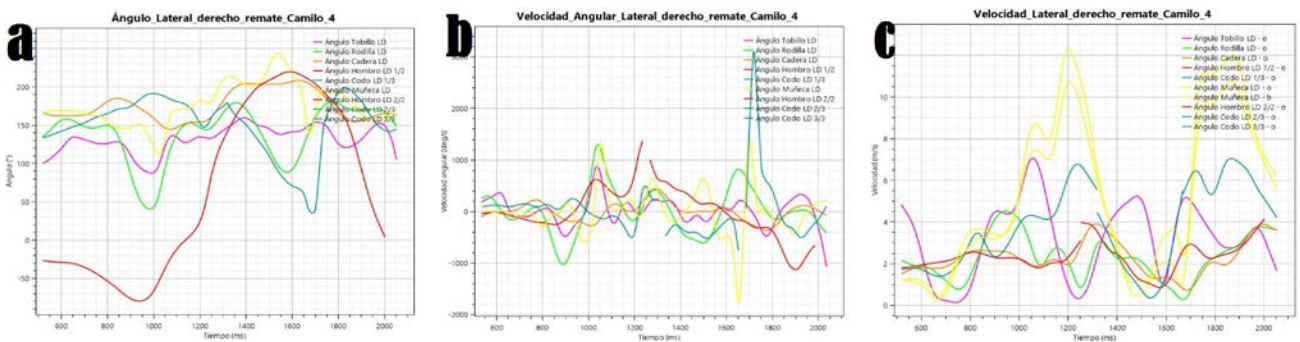


Figura 13. Curvas cinemáticas del jugador Camilo: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

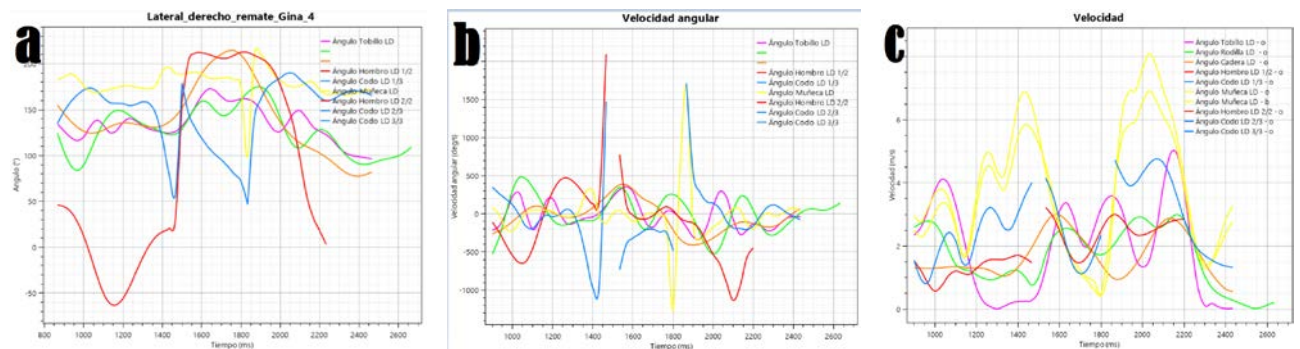


Figura 14. Curvas cinemáticas de la jugadora Gina: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

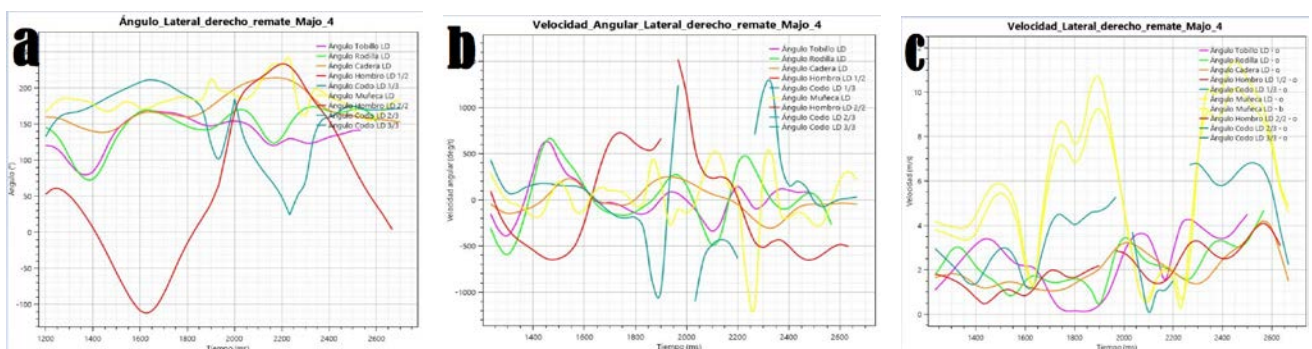


Figura 15. Curvas cinemáticas de la jugadora María José: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

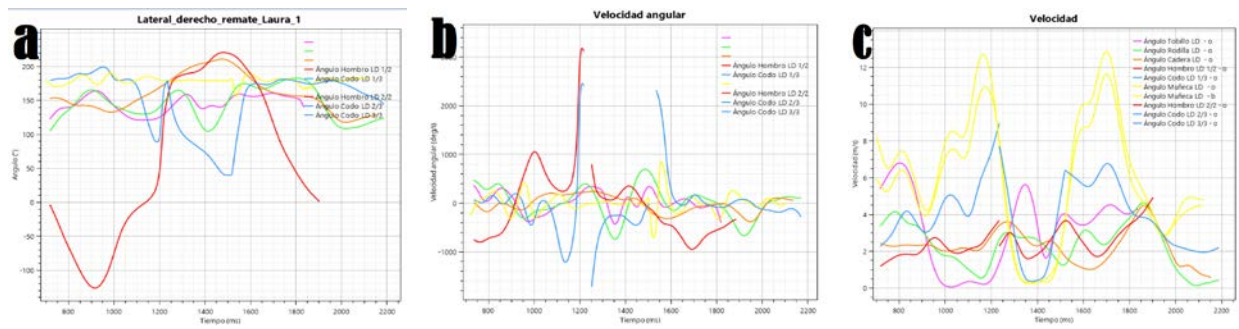


Figura 16. Curvas cinemáticas de la jugadora Laura: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

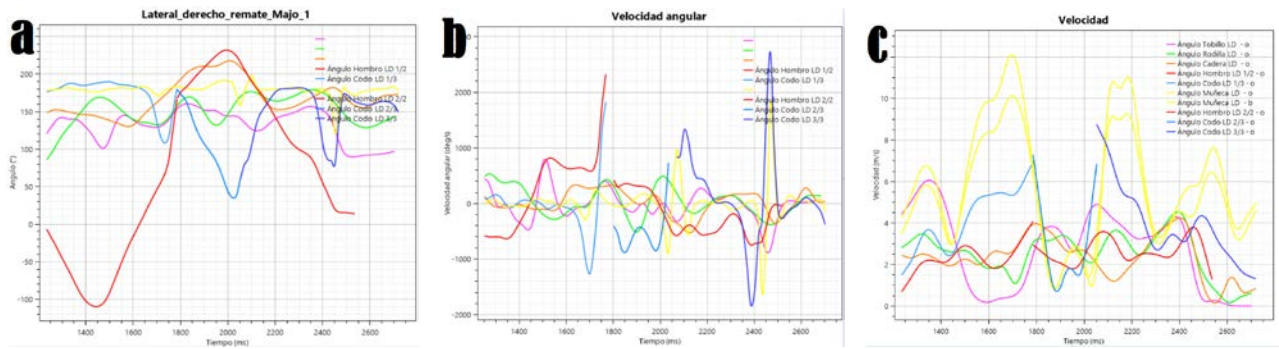


Figura 17. Curvas cinemáticas de la jugadora Majo: a) Ángulos, b) Velocidades angulares, c) Velocidades lineales

Un hallazgo importante a tener en cuenta es la diferencia de la velocidad del balón durante el remate entre un jugador elite y un amateur. Por ejemplo, el jugador Mario(elite) remata el balón con una velocidad de 27 m/s, mientras que el jugador Wily (amateur) lo hace a 20 m/s, evidenciándose así la eficiencia de la técnica empleada por el jugador más experimentado.

Hay diversos factores que influyen en la potencia del golpe de la bola, uno de ellos es la altura alcanzada por el jugador en el momento de realizar el remate, se observa cuando el jugador Mario golpea la bola en una altura mayor que Wily, como se evidencia en la Figura 18, además si se verifican las curvas angulares (Figuras 10 y 11) se puede observar que en la curva del hombro, la roja, que tiende a tener forma sinusoidal, el jugador Wily presenta un movimiento que no es uniforme en la mitad del gesto, esto debido a que no hace la rotación con la misma fluidez que el jugador Mario.



Figura 18. Instante de remate de balón de los jugadores: a) Wily, b) Mario

Otro parámetro es la altura del jugador, Mario es más alto que Wily, por lo que se le facilita más el salto a la hora de golpear la bola, si Wily desea tener una altura de salto adecuada, debería trabajar en la fuerza de las piernas, pero la altura de salto no solo depende de la fuerza de las piernas, sino también de la velocidad de corrida previa al salto de remate, como se evidencia en las Figuras 10 y 11. En la sección c se ve que la velocidad de la cadera, la curva naranja, que es en donde se ubica aproximadamente el centro de masa, para ambos jugadores es distinta, ubicándose en la mitad de la curva, que es cuando aproximadamente empieza el salto para golpear la bola, se ve que para Mario está de casi 4 m/s, en cambio la velocidad de Wily es de aproximadamente 3 m/s. También, se observa que Mario, jugador con mayor experiencia, golpea el balón a mayor altura y la trayectoria de la bola es más inclinada, lo que hace que el equipo opuesto tenga menos posibilidades de contrarrestar el remate y el remate sea más efectivo.

4. CONCLUSIONES

En la investigación realizada se demostró que existe una serie de variables y eventos biocinemáticos dentro del gesto de remate, que al tenerse en cuenta en los entrenamientos mejorarán considerablemente la ejecución del gesto deportivo como lo son los ángulos de las articulaciones de rodilla, codo y muñeca, las velocidades angulares de hombro, codo y muñeca, las velocidades lineales de tobillo, rodilla, codo y muñeca principalmente, los cuales se obtienen de forma cualitativa y cuantitativa a través de la técnica de videometría, para así identificar posibles fallas en la ejecución del gesto deportivo de los jugadores de voleibol.

Se observó que para un remate potente intervienen diferentes variables, entre las cuales están la velocidad de corrida, la altura de salto, los ángulos de las articulaciones, variables que tienen un desempeño mayor en jugadores más experimentados.

A través de un proceso de indexación de datos y multimedia (imágenes de video), y procesamiento de videos se pudo identificar las variables más significativas en relación al remate en voleibol, fueron los ángulos de: muñeca, codo, hombro, cadera, rodilla y tobillo, pues en ellos es donde se presentan los puntos de inflexión que influyen en la ejecución y potencia del gesto de remate.

Se encontró que el movimiento del codo, que es fundamental en la ejecución del remate, requiere de la medición de tres ángulos en un mismo gesto debido a que, en el momento de la preparación para el golpe de la pelota, se genera rotación en las extremidades superiores, debido a la naturaleza del movimiento del tren superior, comprendido por hombro, codo y muñeca, si se analiza desde el plano lateral cambia la perspectiva visual del ángulo y en cierto punto, el software mediría el ángulo conjugado, de manera que se continúa el procesamiento a partir de ese punto con otro ángulo con una configuración diferente, ya sea sentido antihorario o ángulo con signo, de no hacer este ajuste, se tendría una lectura equivocada y discontinua de este movimiento.

La información cualitativa y cuantitativa obtenida en este estudio es un insumo importante para la comprensión del gesto de remate, la determinación de la eficiencia de los deportistas en su ejecución y en el diagnóstico de posibles fallas en la ejecución, así como de posibles estrategias de mejora, que logren mejorar la eficiencia de los jugadores en competencia.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los jugadores y al entrenador, profesor Luis Eduardo Silva Varcancel, del equipo de voleibol de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por su participación en este estudio, que se enmarca dentro del proyecto de investigación con código SGI 2854 *Determinación cualitativa y cuantitativa de la biocinématica articular durante el servicio y el remate de jugadores del equipo de voleibol de la UPTC mediante la técnica de fotogrametría digital*. Se agradece al Instituto para la Educación Física, la Recreación y el Deporte de la ciudad de Duitama, por prestar el Coliseo para la realización de las grabaciones, a la diseñadora industrial Angélica María Ruiz Pinto por su apoyo y asesoría en las grabaciones, y a los demás miembros del proyecto por su empeño y dedicación en la ejecución de esta investigación, desde la toma de datos, la generación de curvas cinemáticas y el procesamiento de datos.

REFERENCIAS

- [1] Sportlife, «Sportlife,» 5 Febrero 2013. Recuperado: https://www.sportlife.es/deportes/repasa-lo-mejor-del-gesto-deportivo_194927_102.html.
- [2] Y. Estrada, Biomecánica: de la física mecánica al análisis de gestos deportivos, Universidad Santo Tomás, 2018.
- [3] A. Garrido, E. Muñoz, A. Bustamante y A. Francisco, «Conceptualización de la Biomecánica Deportiva y Biomecánica de la Educación Física,» *El Físico de Chile Artículos de Investigación UMCE*, pp. 63-68, 2016.
- [4] Tokyo 2020, «Voleibol, sobre este deporte,» 2020. Recuperado: <https://tokyo2020.org/es/deportes/voleibol>
- [5] L. J. Corredor Montenegro, Caracterización anatomofisiológica y estudio comportamental, Universidad de La Salle, 2009.

- [6] N. Morales, Metodología y desarrollo de un sistema para analizar el ciclo de marcha humana, Ciudad de México: Universidad Autónoma de México, 2011.
- [7] Y. Torres Pérez, J. A. Parra Borda y R. Coronado García, «Análisis biomecánico de la técnica de ejecución en el arranque de ciclismo de pista entre deportista semiprofesional y amateur,» *Ingenio Magno*, vol. 9, nº 2, pp. 94-104, 2019.
- [8] N. K. Marqués, «Biomecânica dos fundamentos do voleibol: saque e ataque,» *Revista Universitaria de la Educación Física y el Deporte*, nº 12, p. 30, 2019.
- [9] FIVB, «The game, glossary,» 2020. Recuperado: https://www.fivb.com/en/volleyball/thegame_glossary
- [10] M. Conde, «Cómo se toman los datos en el deporte y por qué es necesario el valor agregado de un especialista para procesarlos, analizarlos y presentarlos,» Recuperado: <https://www.analiticaspports.com/como-se-toman-los-datos-en-el-deporte-y-por-que-es-necesario-el-valor-agregado-de-un-especialista-para-procesarlos-analizarlos-y-presentarlos/>
- [11] Buscoequip, «Quiénes forman el cuerpo técnico de un equipo,» Recuperado: <https://buscoequip.com/quienes-conforman-el-cuerpo-tecnico-de-un-equipo/>
- [12] J. L. Garrido Castro, «Caracterización cinemática 3D del gesto técnico del remate en jugadoras de voleibol,» *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, vol. 10, nº 2, pp. 69-73, 2017.
- [13] L. d. S. Oliveira, «A systematic review of volleyball spike kinematics: Implications for practice and research,» *International Journal of Sports Science & Coaching*, vol. 15, nº 2, pp. 239-255, 2020.
- [14] W. Stuart, «Biomecánica aplicada al deporte: contribuciones, perspectivas y desafíos,» *Educación Física y Deportes, Revista Digital*, vol. 17, nº 170, 2012.
- [15] M. Tamayo, "El proceso de la investigación científica", Limusa, 2006.
- [16] J. I. Quintana Salas, «Técnica y efectividad biomecánica del remate en el voleibol. Revisión bibliográfica,» *Journal of Movement & Health*, vol. 16, nº 1, 2015.
- [17] Y. Torres Pérez, «Evaluación cuantitativa de una prótesis de miembro inferior unilateral,» *Tecnura*, vol. 9, nº 17, pp. 77-86, 2005.
- [18] Y. Torres Pérez y H. R. Ortega Mogollón, «Identificación del patrón cinemático del gesto deportivo de percusión en jugadores de rugby,» *Visión Electrónica*, vol. 11, nº 1, pp. 63-68, 2017.
- [19] Kinovea, «Descripción de la interfaz gráfica,» Recuperado: <https://www.kinovea.org/help/es/401.html>

Estudio de la influencia de las condiciones climáticas en la integridad de los materiales utilizados para la construcción de colmenas de abejas *Apis mellifera*

Andrés Felipe Rubiano Navarrete¹

Camilo Lesmes Fabián²

Yolanda Torres Pérez³

Edwin Yesid Gómez-Pachón⁴

^{1,3,4}*Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*

²*Universidad Santo Tomás*

Colombia

La apicultura es una actividad agroindustrial que mejora las condiciones de vida de muchas comunidades rurales, además de crear beneficios en los ecosistemas por la polinización de especies vegetales, en especial en zonas de cultivos frutales y áreas naturales protegidas. Sin embargo, existen factores que afectan el nivel de producción de productos derivados de la miel, como el tipo e integridad de los materiales, la estructura y el diseño de las colmenas, lo cual repercute en los procesos biológicos, la eficiencia en la producción y el manejo en general por parte de los apicultores. Desde la perspectiva del costo de la inversión en las colmenas, los materiales juegan un papel importante, por lo que es necesario hacer una caracterización del tipo de colmenas más usadas, identificar los materiales más usados y determinar tanto la dinámica como las causas de deterioro de los materiales. Este capítulo presenta hallazgos sobre los materiales usados en las colmenas de abejas, los datos sobre la apicultura a nivel global y en Colombia, la historia de las colmenas, las estrategias en diseño ampliamente usadas y las principales causas del deterioro de las mismas. Los hallazgos sirven de referencia para el desarrollo de nuevos materiales para las colmenas, elaboración de nuevos diseños pensando en los procesos biológicos de las abejas y la facilidad en el manejo, incluyendo el peso, la ergonomía y la prevención de enfermedades o vectores entomopatógenos. Este trabajo presenta resultados sobre observaciones directas sobre patologías que se presentan en los materiales con los que se fabrican las colmenas.

¹ Contacto: andres.rubiano01@uptc.edu.co

² Contacto: camilo.lesmes@usantoto.edu.co

³ Contacto: yolanda.torres01@uptc.edu.co

⁴ Contacto: edwin.gomez02@uptc.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos milenarios, la apicultura ha sido una actividad comercial con la habilidad de proveer rápidos retornos de inversión e incrementos en la producción de cultivos, en pequeñas áreas de territorio y con ventajas en el acoplamiento con otras actividades agrícolas [1]. Estas características han estimulado su explotación en países en vía de desarrollo con el objetivo principal de crear una alternativa de ingresos para las comunidades de bajos recursos en zonas rurales [2].

Sin embargo, a pesar de estos atributos positivos, los beneficios potenciales no siempre se han logrado y la ampliación de las unidades productivas ha sido lenta con una limitada extensión, escasos servicios de capacitación y entrenamiento, sumado a poco interés desde las autoridades gubernamentales [3]. A nivel global, esta situación se puede ejemplificar en países asiáticos como indonesia, en donde la especie *Apis mellifera* fue introducida en 1975, en donde el equipo de colmenas para esta especie fue importado para la industria artesanal, sin embargo, estudios revelaron que la pequeña abeja asiática *Apis cerana* fue usada en estas colmenas, lo que ocasionó que los proyectos trabajaran dos especies diferentes con sus propios aspectos biológicos.

Las abejas se fugaron de los centros de producción y las colmenas fueron abandonadas, por lo que se generó una percepción negativa entre los apicultores [4]. A mediados de la década de los 70, un acuerdo bilateral se estableció entre Nueva Zelanda y el gobierno de Papua Nueva Guinea, las Islas Salomón, y el gobierno de Fiji, con el fin de impulsar la industria apícola [5]. Una exitosa producción se alcanzó en la década de los 80, alcanzando las 120 toneladas para consumo interno y de exportación a Alemania y Austria. Sin embargo, para la década de los años 90s, la industria apícola colapsó debido a una inadecuada administración, bajos precios de la miel, el cambio en las fuentes de néctar debido a sequías prolongadas que cambiaron el ecosistema circundante y a la introducción de la especie *Apis cerana*.

En el caso de Fiji, el proyecto de apicultura fue exitoso, expandiendo la producción de 22 toneladas de miel con 1000 colmenas en el año 1986 a 239 toneladas de miel con 10.000 colmenas, en el año 2013. Estos datos se registraron a pesar de la baja producción de miel de 25 kg por colmena y a las continuas pérdidas de abejas. La producción apícola de Turquía y Etiopía, son ejemplos interesantes de desarrollo del sector cuando las políticas públicas van de la mano con el apoyo al gremio. Ya que este gremio ha logrado elevar el nivel de vida de muchos ciudadanos [6]. En Etiopía, las inversiones estatales y la ayuda internacional condujeron al sector apícola a ser exportadores de productos apícolas. De igual manera, en Turquía, en 1985 exportó 4 toneladas de miel, lo cual se incrementó a 5.306 toneladas en 1999. En 2010, Turquía se convirtió en el segundo exportador de miel con 81.115 toneladas.

Actualmente, Turquía cuenta con 40.000 profesionales apícolas y es la fuente de ingresos más importante para cerca de 200.000 familias [7]. Los anteriores referentes internacionales ponen en manifiesto que la apicultura puede ser una interesante fuente de ingresos para las comunidades y el desarrollo rural y regional de nuestro país, por lo cual se requieren ítems como las capacitaciones, los proyectos productos, las cooperativas y la ayuda estatal para promover el crecimiento del gremio.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 La apicultura en Colombia

En Colombia, para el año 2017 se contaba con una producción de 3.500 toneladas, la cual se espera que se incremente a 4.000 toneladas y 150.000 colmenas [8]. Contrario a lo que se publica a nivel mundial, en Colombia la población de abejas se está incrementando, debido a que fuentes de información como la Cadena Productiva de las Abejas y la Apicultura CPAA, del Ministerio de Agricultura, el número de colmenas se incrementó de 88.111 en 2012, subió a 114.500 en el año 2019.

La Federación Colombiana de Apicultores y Criadores de Abejas FEDEABEJAS, espera que no solo la producción aumente, sino también el consumo per cápita, el cual es de tan solo 70 gr al año. La demanda de miel en el país está insatisfecha en un 70-80%. Entre los departamentos líderes en apicultura están

Córdoba y Antioquia, los cuales representan el 20% de la producción nacional. De igual manera, los Llanos Orientales se están consolidando como altos productores, gracias a la especie *Acacia mangium*, el cual es un árbol que produce néctar extrafloral más de la mitad del año. En el caso del Altiplano Cundiboyacense, se produce el mejor polen producto de la biodiversidad que permite obtener una materia prima rica en proteínas y vitaminas. Es de resaltar que el 90% de la apicultura en Colombia está representada por apicultores que no poseen más de 20 colmenas, por lo que FEDEABEJAS insiste en proteger la apicultura artesanal. En el país se registran aproximadamente 3.500 apicultores, los cuales generan 7.000 empleos directos y unos 20.000 indirectos. Sin embargo, una de las problemáticas en el sector es que el 78% no lleva registros de las actividades y existe una falta de profesionalización, lo cual afecta la productividad [9].

En Colombia se cuentan con especiales condiciones ambientales de luz, temperatura y humedad, creando ambientes propicios para las abejas que pueden adaptarse desde el nivel del mar hasta los 3.500 m.s.n.m. Las abejas generan múltiples alimentos y productos de cuidado personal, debido a que además de obtener productos como la miel, polen, propóleo, cera, apitoxina, jalea real, entre otros, se obtienen otros productos como bálsamos labiales, jabones y cosméticos [10].

Las abejas tienen un importante aporte en la polinización de aproximadamente 70 cultivos vegetales de manera natural o artificial. Las investigaciones en Colombia se han centrado en el estudio de ectoparásitos, infecciones y virus; el efecto letal de los pesticidas, la recombinación genética de las poblaciones, la resistencia genética a parásitos y enfermedades; la fisiología reproductiva; y la polinización dirigida a cultivos de potencial exportador y conservación ambiental [10]. En Colombia, existen un total de 37 grupos de investigación asociados a la cadena productiva apícola y se han registrado, en los últimos años, 17 proyectos de investigación [11].

2.2 Las colmenas de abejas

El ser humano comenzó a construir colmenas de manera que las abejas se encontraran en un estado de confort para poder obtener el beneficio de la miel y sus productos derivados, tratando de imitar así un *panal ideal*, esto luego de observar que las abejas silvestres se situaban en cavidades naturales, como lo son más comúnmente árboles huecos y adoptaron las técnicas apropiadas para ahuecar troncos de árboles con el fin de criar sus colonias de abejas [12]. Los estudios históricos han documentado la diversidad mundial de materiales utilizados para las colmenas a lo largo del tiempo (Figura 1) [13].

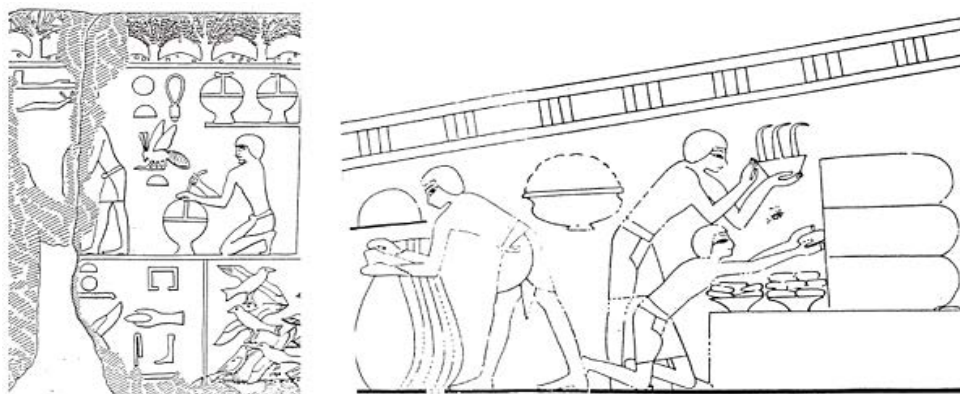


Figura 1. a) Una representación temprana de una abeja melífera: un bajorrelieve de piedra del templo solar de Ne-user-re, Abu Ghorab, Bajo Egipto, c. 2400; b) Parte de la pintura mural de la tumba de Rekhmire (núm. 100), Cisjordania, Luxor, Alto Egipto, c. 1450

Sin embargo, esta diversidad se redujo paulatinamente a partir del siglo XIX y más especialmente después de la Segunda Guerra Mundial que condujo al período real marcado por la homogeneización de las prácticas apícolas [14]. La invención de los marcos móviles del Padre Langstroth en 1852 (Figura 2) se convirtió rápidamente en el modelo de colmena más utilizado en todo el mundo [15]. Este elemento clave permitió a los apicultores criar, controlar y aumentar profundamente el rendimiento de su producción generando así al menos diez veces más producto que antes. A partir de entonces, la colmena debe tener forma rectangular con dimensiones estándar. Hoy en día se utilizan todo tipo de materiales de construcción para

colmenas como lo son aceros, polímeros, piedras, arena y la madera siendo este el principal material de construcción (como cuando el hombre buscaba imitar la naturaleza). Sin embargo, no existe una medición específica de propiedades mecánicas, térmicas y biodegradables.

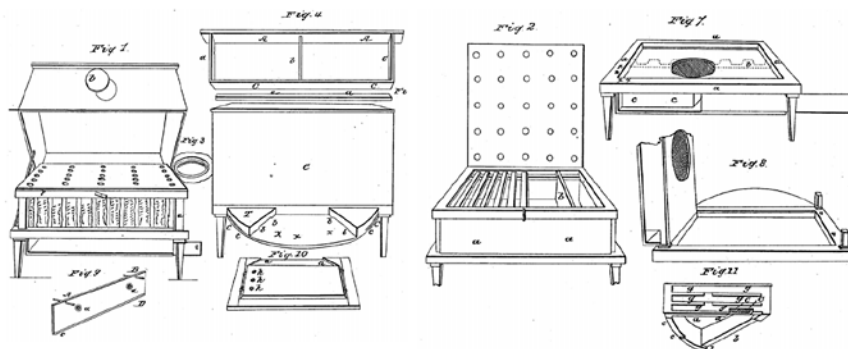


Figura 2. Planos originales de la Patente No. 9300 de 1852: Beehives de Lorenzo L. Langstroth.

2.3 Los materiales de las colmenas de abejas

Las colmenas en el mundo se construyen utilizando diferentes materiales dependiendo de la disponibilidad de recursos y de la capacidad de adaptación en los diferentes territorios [16]. Estos materiales incluyen:

- **Madera.** Este es el principal material de construcción de la colmena utilizado (Figura 3). La madera para hacer colmenas debe estar bien curada para que no se produzcan deformaciones en la madera después de la construcción de la colmena. El apicultor debe elegir especies maderables que estén fácilmente disponibles para evitar costos adicionales de transporte. La madera no debe ser repelente de abejas y ser resistente a las termitas y al efecto de putrefacción. En los trópicos, algunas especies de madera con buenas cualidades para la construcción de colmenas incluyen: *Cordia spp.*, *Terminalia ivorensis*, *Chorophora excelsa*, *Piptadeniastrum africanum* y *Markhamia lutea*, *Ilex dipyrena*, *Juglans regia* y *Pinus wallichii*.

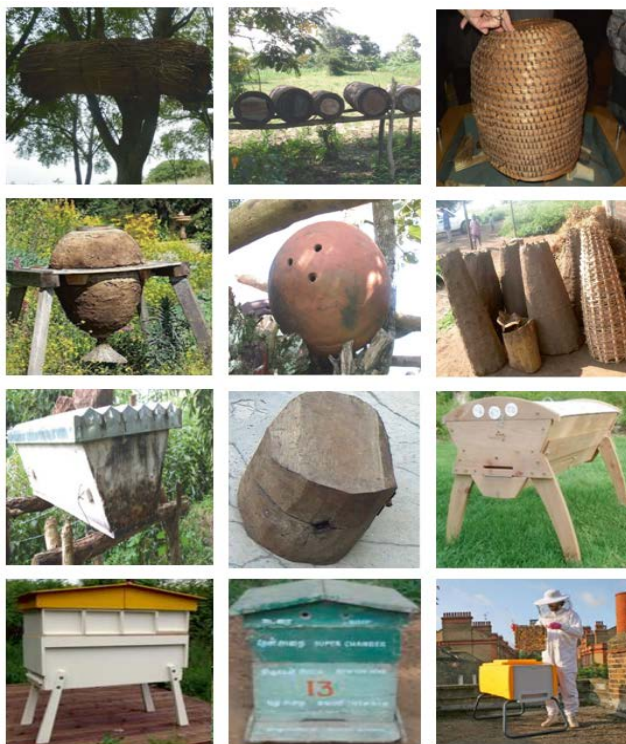


Figura 3. Diferentes tipos de colmenas y materiales utilizados en el mundo: a) Colmenas en ramas sujetas a árboles; b) Colmenas en troncos excavados; c) Colmenas tejidas de fibras; d) Sun Hive inventada en Alemania para zonas rurales; e) Colmenas de arcilla; f) Colmenas de fibras tejidas y barro; g) Colmenas de Kenya; h) Colmenas excavadas en troncos; i) Beepods; j) Colmena Darlington; k) Colmena Newton; l) Colmena para terrazas

- *Arcilla y ladrillos*: El uso de arcilla para la fabricación de colmenas no es nuevo; es anterior a la época de la antigua Grecia. Actualmente, el uso de arcilla para la fabricación de colmenas se limita a las zonas rurales de los países en desarrollo, especialmente en África. La arcilla, que es barata, se puede trabajar fácilmente con herramientas simples en cualquier forma y tamaño. Una vez seco y horneado, es relativamente resistente a la humedad. Tiene una resistencia al impacto muy alta, por lo que es poco probable que se rompa por caídas cortas. Tiene la característica única de proporcionar aislamiento de altas temperaturas y volver a irradiar cuando las temperaturas exteriores son frías, lo que lo hace ideal para entornos desérticos de altas temperaturas diurnas y noches frías. Su mayor inconveniente es su peso, lo que dificulta mucho su desplazamiento. Si la arcilla se usa correctamente y las colmenas se manejan bien, se pueden acumular buenos rendimientos.
- *Concreto*: El concreto comparte la mayoría de las características de la arcilla, con los beneficios de no requerir horneado y se puede verter en moldes para una rápida construcción de la colmena.
- *Troncos y tallos de árboles*: se utilizan para la fabricación de colmenas tradicionales (Figura 3). El uso de colmenas de corteza debe regularse debido al daño que inflige a los árboles.
- *Hierba y ramas*: Se utilizan para hacer colmenas de hierba tradicionales y colmenas de ramas pequeñas cilíndricas. Están disponibles en las zonas rurales de África. Sin embargo, no son duraderos. La colmena de paja es desagradable debido a su susceptibilidad al ataque de plagas (especialmente hormigas) y su tendencia a retener la humedad; también las técnicas tradicionales de trilla rompen la paja en pequeños trozos y las prensan para hacer las colmenas. Esta técnica es cara y no se puede implementar a nivel artesanal. Por lo tanto, se deben hacer esfuerzos para promover las colmenas modernas o las colmenas de transición para que se pueda conservar el medio ambiente, evitando el uso de fibras vegetales.
- *Plásticos*: Las innovaciones recientes han intentado explotar materiales fácilmente disponibles y respetuosos con el medio ambiente (Figura 3). El uso de plásticos para la fabricación de colmenas es una idea bienvenida y debe adoptarse ya que evita la destrucción de bosques. Existen investigaciones en desarrollo sobre el uso de plástico reciclado, lo cual es prometedor para materiales de colmenas. Además, las colmenas de plástico son ligeras para el transporte.
- *Vidrio*: El uso del vidrio como material de construcción de la colmena se limita a experimentos y pocos apicultores son entusiastas porque son costosos y no duraderos cuando no se manejan adecuadamente. Es pesado, difícil de cortar y unir y es propenso a romperse incluso con impactos menores y proporciona poco valor aislante. Su superficie lisa es difícil para que las abejas se sujeten el panal. Esto puede ser una ventaja para los lados de una colmena, pero es una clara desventaja si se considera su uso para la parte superior de una colmena de panal fijo. Cuando se colonizan, las colmenas de vidrio proporcionan muy buen material práctico para enseñar y explicar el comportamiento de las abejas y los problemas relacionados. Sin embargo, esta misma transparencia amplifica los efectos de calentamiento del sol, por lo que la colmena debe cubrirse o mantenerse en sombra constante excepto por breves períodos.

Siguiendo el modelo de colmena de Lorenzo Langstroth, se han implementado diversos materiales para su construcción [17]:

- *Cedro*: es la mejor madera, pesa poco, es buen aislante, no presenta condensación y necesita poco tratamiento para su conservación, no necesita pintura porque tiene buena impermeabilidad. Es un resistente natural a insectos, a la putrefacción y a climas templados. Su principal problema es su elevado precio.
- *Pino*: principalmente se usa por su precio bajo, pero necesita tratamientos con aceites para protegerse de las inclemencias climáticas. Aun así, no durará más una colmena de pino que una de cedro.
- *Tornillo*: El Tornillo es una madera medianamente pesada, con resistencia media y moderadamente fácil de aserrar. Presenta buena trabajabilidad y acabado apropiado para la producción de piezas estructurales. Seca en forma rápida. Posee una alta durabilidad natural, pero es susceptible al ataque biológico.

- *Laurel*: Tiene una alta durabilidad natural. Es una madera fácil de trabajar, la velocidad de secado es de rápida a moderada. La madera se asierra y trabaja fácilmente. El torneado y taladrado son excelentes, el cepillado y el escopleado buenos, el lijado de bueno a excelente, el moldeado de regular a bueno, y las rajaduras por tornillo deficiente.
- *Contrachapada*: es una buena solución para el techo, pero no para los componentes internos, se astilla fácilmente, no tolera los conservantes y se trata de una madera pesada. Se puede pintar, con la precaución que se debe tener para no mezclar las toxinas de la pintura con los productos de la colmena.

Con respecto a los materiales que se acaban de mencionar, existe una problemática que afecta la apicultura mundial, en especial en los apiarios que están ubicados en apiarios con climas subtropicales, y es la sanidad de las colmenas ya que el rápido deterioro de los materiales externos e internos de las colmenas y la aparición de colonias con presencia de agentes patógenos como bacterias, hongos, ácaros, virus, predadores, malnutrición y residuos tóxicos que reducen la producción de miel y de sus derivados. En casos críticos pueden ocasionar la pérdida de la colonia, si no se controla adecuadamente.

Varias sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente afectan negativamente las colmenas, particularmente los plaguicidas sintéticos, cuyos residuos intoxican a las abejas. Sin embargo, las abejas también son susceptibles al daño ocasionado por varias plagas y enfermedades que las afectan y que pueden hacer que migren a otros lugares o en el peor de los casos mueren.

Existen varios factores que afectan el buen estado de las colmenas y la sanidad de las colmenas, algunos de estos son la mala nutrición, la escasez de recursos en el ambiente, la climatología adversa en algunos apiarios y durante algunas épocas del año, el cambio climático, la exposición a pesticidas neonicotinoides, la presencia de depredadores naturales, la llegada de especies invasoras, la acción dañina de los patógenos presentes en las colmenas.

Lo anterior hace que los apicultores deban invertir en el cambio de sus colmenas con cierta periodicidad. Además, es importante un buen manejo y mantenimiento preventivo de los elementos de las colmenas, por lo que anualmente se deben pintar las cajas, limpiar los cuadros, limpiar el fondo de la colmena, limpiar la tapa de propóleos y reparar asas y alimentadores, entre otras cosas. El tener una colmena sana estructuralmente, ayuda también para controlar o prevenir la aparición de enfermedades producidas por diferentes agentes como virus, bacterias, protozoos, hongos, etc., que en algunos casos si no se toman las medidas adecuadas puede llegar a producir la muerte de la colmena. Los patógenos que afectan a las colmenas de abejas se discutirán más adelante.

Además, dependiendo del estado de las partes de la colmena, se debe pasar de un mantenimiento preventivo a uno correctivo, con el retiro de cuadros inservibles, panales viejos con capullos, panales negros y mal construidos y bastidores con cera que no fueron aceptados por las abejas por la falta de calidad y poner una cera nueva con menos de 30% de parafina.

El mantenimiento de las colmenas se puede realizar principalmente por dos motivos: 1) De forma correctiva, por roturas, deterioro estructural o deformaciones en componentes de la colmena en donde según el nivel del daño, se puede en algunas ocasiones hacer la reposición parcial o total de las piezas buscando siempre que no se altere la forma o las dimensiones externas e internas generales que tenía inicialmente, y 2) De forma preventiva, ya que las cajas para colmenas requieren que máximo cada 2 años que se reparen, se pinten con pintura de aceite o aceite de linaza, a brocha o a pistola. Es importante tener en cuenta que, si no se hace el adecuado mantenimiento de las colmenas, puede ocasionar enfermedades y las pérdidas económicas pueden ser cuantiosas.





2.4 Condiciones ambientales esenciales para las abejas

Una sola familia de abejas se llama *colonia*. La ubicación física de la colonia es llamada *colmena*. Una colmena es cualquier recipiente provisto para que las abejas anidan. Las abejas obreras constituyen la mayor parte de una colonia y realizan todo el trabajo por lo que es necesario comprender sus

contribuciones colectivas es donde se puede aprender sobre la construcción de la ciencia de la sociedad de las abejas melíferas. En la naturaleza, la colonia está equipada con mecanismos específicos de diseño de espacios, termorregulación y función de los panales, lo cual se realiza de manera colectiva. Por lo tanto, el diseño básico de las colmenas debe cumplir con los parámetros esenciales como la conversión de energía, la calidad del aire interior, la gestión del agua, el aislamiento térmico y la ventilación.

La supervivencia de una colonia depende en gran medida de la limpieza y el comportamiento higiénico. La idea es animar a las abejas a construir sus panales de tal forma que sea fácil para que el apicultor los maneje y explote. El diseño básico de las colmenas Langstroth también puede contribuir al aumento del tamaño de las poblaciones gestionadas (Tabla 1). Por ejemplo, los espacios creados por el desarrollo del marco móvil alteran en gran medida los patrones de flujo de aire dentro de la colmena. Este aumento en el potencial de movimiento del aire se ve reforzado por los esfuerzos del apicultor para ventilar las colmenas y proporcionar una entrada muy amplia ubicada en la parte inferior de la cavidad. Por el contrario, la cavidad natural que eligen las abejas tiene paneles que se adhieren al techo y las paredes. El intercambio de aire está restringido entre los peines colgantes, ondulados y grandes. La ventilación se reduce en gran medida por una entrada superior, generalmente un pequeño agujero de nudo, grieta o hendidura [16].

Tabla 1. Modelos de colmenas Langstroth en el mercado

	Madera	Poliestireno	Polipropileno	Concreto
				
Características	Esta colmena Langstroth fija está compuesta por base de madera, cuerpo o cámara de cría con 10 cuadros alambrados tipo Hoffmann, entretapa con marco de madera incluida, alza de 10 cuadros alambrados tipo Hoffmann, tapa de madera forrada de chapa metálica y piquera metálica	Los inviernos árticos con temperaturas inferiores a -35 °C y los calurosos veranos que superan los 30 °C, requieren de este tipo de colmenas que se adapta a los diferentes ambientes y condiciones meteorológicas. Consta de 2 alzas langstroth con accesorios de montaje, tapa de la colmena Beebox, piso sanitario anti-varroa (sin bandeja), reductor de piquera y alimentador de techo de 10L.	Los cuerpos pueden ser marcados a fuego y para la conexión de todas las partes se pueden utilizar enganches desplegables en la parte frontal y trasera o bien otro tipo de conector, ya que no hay problema en atornillar y perforarlas. Incluye tpa de plástico aislante con 4 válvulas para la ventilación, 2 cuerpos de plástico Langstroth con capacidad para 10 cuadros, base de plástico estándar y base ventilada.	El hormigón duradero no necesita mantenimiento y aísla el espacio interior, lo que ayuda a regular la temperatura interna, reduce el consumo de energía y aumenta la producción de miel. Consta de una tapa, cámaras de miel, marcos y cámaras de cría.
Dimensiones	Medidas interiores: 464x380mm. Exteriores: 508x424mm. Grueso: 22mm. Espesor: 25mm	Dimensiones estándar del modelo Langstroth.	Dimensiones exteriores: 420x510x245mm	Tapa: 680x570x100mm. Cámaras de miel: 35/32x137x482mm. Cámaras de cría: 35/32x232x482mm
Valor en pesos	276.638	368.928	335.011	315.111
Valor en Dólares	75.73	101.01	91.71	86.26

2.4.1 Condición espacial dentro de la colmena

Normalmente, el espacio de una abeja es de entre 4.5 y 8 mm y entre 6 y 9 mm. Un espacio de menos de 4 mm es demasiado pequeño y los espacios, grietas o hendiduras de esta o menor dimensión, se rellenan con propóleos o, a veces, con una mezcla de cera y propóleo. Un espacio de 6 mm es el espacio más pequeño que las abejas dejarán entre las superficies adyacentes del panal (fuera del área de agrupamiento

habitual) y las abejas pueden defender esto más fácilmente ya que pueden trabajar individualmente dentro de esta dimensión. El espacio más pequeño alrededor de la periferia del panal también hace que este sea menos susceptible a las corrientes de aire y puede ayudar a mantener la humedad.

Si este espacio se produce entre las caras laterales de las barras superiores del marco, es menos probable que sufran acumulaciones de cera. Un espacio de 9 mm es el espacio habitual que las abejas dejarán entre las áreas adyacentes de cría cubierta, ya que esto permite que dos capas de abejas trabajen espalda con espalda, generalmente en un patrón ovalado aproximadamente en el centro de un marco. Un espacio de 4,3 mm es un espacio europeo estándar para cables en un Queen Excluder.

Si se usa un espacio de 5 mm entre los alambres de una malla cuadrada, será un excelente eliminador de polen ya que los trabajadores pueden atravesarlo, pero una porción significativa de polen se les quitará de las patas. Un espacio de 5,2 a 5,4 mm es un espacio que se puede utilizar para excluir o diferenciar a los zánganos, ya que los trabajadores y las reinas pasarán libremente, pero los zánganos no [16].

2.4.2 Tráfico interno dentro de la colmena

En la naturaleza, es raro encontrar una hoja intacta de panal tan grande como el marco de cría de una colmena, por lo que no se necesitan agujeros ya que las abejas pueden viajar fácilmente a través de la colonia cuando hay muchos orificios, algunos de estos huecos son ocasionados por irregularidades en la construcción del peine y algunas se deben a razones de flujo de aire y ventilación. Los apicultores introducen todo tipo de artilugios en las colmenas, algunos de los cuales pueden interrumpir el funcionamiento normal del tráfico normal de abejas en una región localizada. La congestión puede provocar un enjambre debido a la congestión del nido. La provisión de rutas más cortas o alternativas puede reducir este agravamiento y, por lo tanto, reducir el enjambre.

Es cierto que las abejas son capaces de provocar con sus alas una corriente de aire, o movimiento de aire, para enfriar la colmena o evaporar la humedad del néctar. Pero debe recordarse que una colmena con sus filas de marcos espaciados regularmente puede parecer conveniente para el apicultor, pero puede no ser tan adecuada para las necesidades de las abejas en cuanto a facilidad de ventilación. Si se presta más atención a los requisitos de las abejas, entonces se reduce la necesidad de algunas de las abejas en abanico, liberándose así para otras tareas y mejorando la productividad general. El drenaje del agua de las colmenas también es esencial [16].

2.4.3 Ventilación

La integridad de la colonia se mantiene gracias a las feromonas, esas sustancias químicas producidas externamente por las abejas. Los productos gaseosos del metabolismo de la colmena, como el agua, el etileno y el dióxido de carbono, también pueden regular la actividad y el comportamiento de las abejas. La circulación de aire excesiva dentro de la colmena y la ventilación en la entrada, alteran significativamente las concentraciones de estos biorreguladores. En climas fríos, las colonias deben estar ventiladas para evitar la acumulación de humedad y hielo en la colonia. Pero este exceso de agua es producto de la condensación en las paredes no aisladas de las colmenas de caja. Por lo tanto, tanto la condensación como la ventilación extraen humedad del racimo, estresando a las abejas al hacer que aceleren el metabolismo de la miel para mantener la temperatura y la humedad en su "zona de confort"[16].

2.4.4 Termorregulación

Apis cerana, al igual que otras especies de *Apis*, se termorregula para mantener su temperatura torácica entre 30 y 36°C. Para que la cría se desarrolle adecuadamente, las abejas mantienen altas temperaturas (30–36°C) en el centro del grupo donde se encuentra el nido de cría. La termorregulación por las colonias de abejas tiene un alto costo energético, por lo que el aislamiento proporcionado por las colmenas puede tener una fuerte influencia en la tasa de consumo de alimentos, la asignación de trabajo de las obreras y, en última instancia, la supervivencia de la colonia. Por lo tanto, la idoneidad microclimática de las colmenas para las abejas locales es importante a la hora de diseñar colmenas adecuadas.

Las colmenas con volúmenes más grandes muestran temperaturas generalmente más bajas que aquellas con volúmenes más pequeños. Es cuestionable si demasiado calor en invierno puede tener un efecto negativo al causar un mayor consumo de miel por parte de las abejas que de otra manera permanecen vivas pero inactivas. Las reservas de miel de invierno pueden terminarse demasiado rápido y las abejas mueren de hambre más tarde. La selección de una colmena para su uso en programas de extensión apícola debe depender más de las preferencias de los apicultores locales y de la disponibilidad de materiales y herramientas para hacer colmenas que de este factor. Esto demuestra claramente que la tecnología apropiada debe crecer a partir de los recursos y tecnologías que ya están en uso, utilizando la participación de la población local para tener éxito [16].

2.5 Condiciones de los materiales de las colmenas

Algunas de las características óptimas que deben tener los materiales para la fabricación de colmenas se relacionan directamente a condiciones ambientales a los que se somete estos materiales, tanto al interior como en el exterior, es por esto que el material debe tener los siguientes parámetros [17]:

- *Durabilidad:* Este es el requerimiento principal de una colmena en cuanto a la larga vida útil de los materiales. Las colmenas están expuestas cotidianamente a las fuerzas que deterioran el material, lo que lleva a que, por un lado, el apicultor debe dedicar tiempo, recursos y dinero en el mantenimiento o sustitución de la colmena; y por otro lado, la estructura de la colmena se convierte en peligro y puede causar daño a la colonia alojada dentro. Las principales fuerzas que deterioran el material son el fuego; clima (lluvia, inundación, sol, viento, etc.); plagas (diversos insectos, principalmente polillas, escarabajos, hormigas y termitas); los seres humanos (vándalos, ladrones); desgaste (de uso regular por apicultor y abejas). La durabilidad de una colmena afecta directamente el precio de los materiales empleados para su construcción, cuanto más tiempo dure la colmena, más barato se vuelve para el apicultor. Por lo tanto, una colmena más costosa solo puede justificarse si va a durar mucho más que una más económica.
- *Aislamiento:* Las abejas necesitan mantener una temperatura de alrededor de 30 y 36°C dentro de la colmena. Cuando la temperatura externa es demasiado caliente o fría, controlan la temperatura interna de la colmena por medio de un movimiento de sus alas para que el aire circule y así enfriar la colmena en el caso de que la temperatura sea elevada. Cuando la temperatura es baja, las abejas crean fricción y calientan el aire interno de la colmena. Las abejas consumen miel para generar la energía necesaria para ventilar sus alas enérgicamente. Es bien sabido que en los climas tropicales las colmenas producen más miel. También está bien documentado que la producción de miel se puede aumentar en climas con temperaturas variables mediante el aislamiento de la colmena. Es por esto que el material de las colmenas debe tener altas propiedades aislantes y de esta manera, generar menores pérdidas de calor en el interior de la colmena haciendo que las abejas no desgasten energía para regular la temperatura.
- *Resistencia mecánica:* En cuanto a la resistencia mecánica, los materiales de la colmena requieren valores de un promedio de resistencia a la compresión de 400 kg/cm², resistencia a flexión estática de 700 kg/cm², esto debido a la constante manipulación de las colmenas por parte de los operarios y el hecho de ser sometidas a distintas condiciones climáticas que aumentan el nivel de pérdida de las características mecánicas.
- *Toxicidad:* La toxicidad, desde la perspectiva de la fabricación de la madera, tiene que ver con los tratamientos del material antes, durante y después de su vida útil, el proceso de fabricación y el impacto del material hacia el operario de la colmena. Desde la perspectiva del proceso biológico de las colmenas, la toxicidad se refiere también al bienestar tanto de las abejas, como de los apicultores, además que el material a utilizar no contamina el producto alimenticio que son consumidos por las mismas abejas y por el ser humano, después de su procesamiento. Por lo tanto, al seleccionar materiales para colmenas es necesario realizar una clasificación de todos los materiales que pueden ser aptos para una colmena y que no sean perjudiciales ni tóxicos.
- *Costo:* El costo se calcula en función del precio de las materias primas, la mano de obra, la amortización del equipo (recuperación del desembolso de capital para herramientas, etc.), los gastos de transporte y

comerciales (marketing, administración, diseño, ventas, etc.) que se utilizan para producir y entregar un producto al mercado. El precio de un producto generalmente se establece en el 200% del costo para producir una ganancia que una empresa puede usar para expandirse, o un precio que se puede negociar y descontar. Entonces, el precio y el costo son directamente proporcionales. Una sola colmena puede no costar mucho, pero los apicultores necesitan cientos de ellas para generar ingresos. Tan pronto como el precio de la colmena individual se vuelve demasiado caro, el negocio del apicultor se vuelve insostenible. Cuanto mayor sea el costo / precio, peor se desempeñará el material en esta categoría.

La anterior contextualización de las características de la apicultura a nivel global y a nivel regional en Colombia, genera un interrogante en cuanto a la adaptabilidad de esta actividad económica en el contexto del cambio climático. La apicultura requiere buscar nuevos materiales que tanto en la explotación en las materias primas (originales), como en la transformación y su uso en la construcción de colmenas, esta contextualizada en las condiciones de volatilidad climática, que, de no tenerse en cuenta, podrían poner en riesgo la sostenibilidad del sector, desde la perspectiva social, económica y ambiental. De esta manera, este documento busca el estudio de la influencia de las condiciones climáticas en las características de los materiales utilizados en colmenas de abejas en la región de Boyacá, Colombia.

3. MÉTODO

3.1 Tipos de Investigación

La investigación que se desarrolló se realizó a través de la combinación de diferentes metodologías, dado que la investigación tiene un componente práctico y otro teórico. Se realizó un diseño cualitativo, descriptivo e interpretativo para la valoración de las colmenas, lo que conllevó a actividades en campo con el fin de determinar la influencia que tienen las variables climáticas en las características y propiedades físicas de los materiales de las colmenas de estudio.

Para la realización de las actividades de campo, se hizo la selección de una muestra representativa de apiarios con diferentes condiciones climáticas (Pachavita, Duitama y Paipa), se hizo la inspección visual y el registro fotográfico y escrito de los hallazgos encontrados a simple vista del estado físico y biológico superficial de cada una de las colmenas de estudio en los 3 apiarios de muestra. Posteriormente, mediante se realizó el diagnóstico de la afectación sufrida por las colmenas y las posibles intervenciones que se deben hacer a corto, mediano y largo plazo. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los apiarios de estudio y el desarrollo metodológico que se llevó a cabo en esta investigación.

3.2 Descripción de los estudios de caso

Esta investigación se desarrolló en tres estudios de caso en los municipios de Duitama, Paipa y Pachavita. En estos tres puntos se realizó una caracterización en cuanto a la altitud, topografía, recursos biológicos, hidrografía y condiciones climáticas.

3.2.1 Duitama

El estudio de caso en Duitama corresponde a los apiarios llamados Elixir del Páramo en la vereda La Quinta, Reserva los Agüeros, en las coordenadas 5°54'15,85"N, 73°03'46,99"O, ubicados a una altura de 3305 m.s.n.m. En el lugar se encuentran instaladas 40 colmenas. Los recursos biológicos de los dos páramos albergan en su territorio los tres géneros existentes de Frailejón a saber: *Espeletia*, *Espeletiopsis*, *Paramiflos*, con un total de 11 especies referenciadas, alguna de ellas endémicas, entre las 38 identificadas para la cordillera oriental. Se reportan elementos arborescentes como palma (palmitos) y helechos que son muy abundantes.

Se incluye una gran diversidad de bromeliáceas, orquídeas, líquenes y musgos. Los recursos hídricos de los ríos y quebradas: En una abrupta y quebrada topografía se representan valles profundos disectados por un gran número de drenajes donde tienen origen los ríos chontales, la Rusia, Surba, Chiticuy y numerosas quebradas que alimentan la vertiente seca del río Chicamocha. Se encuentran varias lagunas, de las cuales

se destaca Cachalu, Agua Clara, Pan de Azúcar y Las Cruces. Se complementan con laguna Corralitos, el Juncal, Aracoba, Peña Negra, Chochal, los Cuadros, Pozo Negro y numerosos humedales. Estos humedales funcionan en el páramo como sistemas ecológicos menores y se constituyen en el ecosistema ecológico más amenazado de la zona por actividades ovinas y ganaderas. Algunos peces y patos de páramo propios de este hábitat han perdido su espacio, por la competencia de alimento generada a partir de la introducción de la trucha a esto se suma la actividad antrópica (caza, mal uso de agua y suelo) ejercida sobre estos ecosistemas. En cuanto al clima, este varía dependiendo de la altura.

En el municipio de Duitama la altura barométrica es de 2.550 m.s.n.m. y la temperatura promedio es de 15°C. El promedio anual de la distribución de la precipitación está calculado en 1.128 mm. Los períodos de lluvias corresponden estadísticamente a los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre. La temporada seca principalmente corresponde a los meses de junio a agosto y de diciembre a febrero. La humedad relativa es del 81.4 % en promedio. Los vientos predominantes proceden del sureste y del sur, la velocidad media es de 2.86 y 3.29 m/s, los vientos son más fuertes en julio y agosto. Finalmente, la insolación o brillo solar corresponde a 5 horas promedio por día y de 1820 horas anuales de sol. Según el diagnóstico biofísico del municipio de Duitama, existen tres grandes zonas climáticas:

- *Clima frío húmedo:* Se ubica entre los 2.500 y 3.000 m.s.n.m, con una temperatura media de 14.2°C. Corresponde a las veredas de Tocogua, San Lorenzo de Abajo, San Lorenzo, Higuera, Quebrada de Becerras, San Antonio Sur y Norte, parte de Surba y Bonza.
- *Clima muy frío subpáramo seco:* Esta unidad se distribuye entre los 3.000 m.s.n.m. y los 3.600 m.s.n.m. con curvas de isoyetas entre los 1.100 y los 1.500 m.s.n.m y con una temperatura promedio de 8°C. Corresponde a las veredas de Avendaños, el Carmen, Santa Ana, Siratá, parte del Norte de la vereda Surba y Bonza.
- *Clima de páramo seco:* Esta unidad se distribuye entre los 3.600 y 3.800 m.s.n.m. que hace parte de las alturas más representativas del municipio, correspondiente a las veredas de Avendaños y parte norte de Santa Ana, vereda Santa Bárbara. La precipitación que se presenta en la zona es la correspondiente a la curva de isoyeta 1.200 m.s.n.m. y 1.560 m.s.n.m. Según la clasificación de Köppen, Duitama posee un clima de tipo Cfb: oceánico de alta montaña. Al igual que todas las regiones de la Zona Intertropical, el clima está influenciado solamente por la altitud y las corrientes oceánicas que causan leves variaciones de temperatura, las más significativas entre el día y la noche.

3.2.2 Paipa

El estudio de caso de Paipa se encuentra ubicado en la vereda Marcura en las coordenadas 5°48'23,18"N, 73°08'0,44"O, a una altitud de 2.961 msnm. Se encuentran instaladas 16 colmenas. La topografía en un radio de 3 kilómetros de Paipa tiene variaciones muy grandes de altitud, con un cambio máximo de altitud de 477 metros y una altitud promedio sobre el nivel del mar de 2.563 metros. En un radio de 16 kilómetros contiene variaciones muy grandes de altitud (1.599 metros). En un radio de 80 kilómetros también contiene variaciones extremas de altitud (3.802 metros). El área en un radio de 3 kilómetros de Paipa está cubierta de árboles (29 %), tierra de cultivo (28 %), pradera (27 %) y arbustos (10 %), en un radio de 16 kilómetros, de árboles (45 %) y pradera (26 %) y en un radio de 80 kilómetros de árboles (53 %) y pradera (27 %). Las cuencas hidrográficas que componen el municipio son: Cuenca del río Chicamocha y Cuenca del río Palermo. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 7 °C a 20 °C y rara vez baja a menos de 4 °C o sube a más de 22 °C.

La temporada templada dura 3,5 meses, del 28 de diciembre al 12 de abril, y la temperatura máxima promedio diaria es de más de 19 °C. El día más caluroso del año es el 24 de febrero, con una temperatura máxima promedio de 20 °C y una temperatura mínima promedio de 9 °C. La temporada fresca dura 2,5 meses, del 20 de junio al 4 de septiembre, y la temperatura máxima promedio diaria es de menos 18 °C. El día más frío del año es el 16 de enero, con una temperatura mínima promedio de 7 °C y máxima promedio de 19 °C. La temporada más mojada dura 8,7 meses, del 15 de marzo al 6 de diciembre, con una probabilidad de más del 49 % de precipitaciones. La temporada más seca dura 3,3 meses, del 6 de diciembre al 15 de marzo. La probabilidad mínima de un día mojado es del 22 %. Esta sección trata sobre el vector de

viento promedio por hora del área ancha (velocidad y dirección) a 10 metros sobre el suelo. El viento de cierta ubicación depende en gran medida de la topografía local y de otros factores; y la velocidad instantánea y dirección del viento varían más ampliamente que los promedios por hora. La velocidad promedio del viento por hora en Paipa tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 4,3 meses, del 17 de mayo al 27 de septiembre, con velocidades promedio del viento de más de 7,3 kilómetros por hora. El día más ventoso del año es el 10 de julio, con una velocidad promedio del viento de 9,4 kilómetros por hora.

El tiempo más calmado del año dura 7,7 meses, del 27 de septiembre al 17 de mayo. El día más calmado del año es el 16 de noviembre, con una velocidad promedio del viento de 5,1 kilómetros por hora. La radiación solar en paipa está distribuida en el período más resplandeciente del año que dura 1,9 meses, del 24 de julio al 22 de septiembre, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado superior a 5,6 kWh. El día más resplandeciente del año es el 24 de agosto, con un promedio de 5,9 kWh. El periodo más oscuro del año dura 1,7 meses, del 19 de octubre al 9 de diciembre, con una energía de onda corta incidente diario promedio por metro cuadrado de menos de 4,8 kWh. El día más oscuro del año es el 11 de noviembre, con un promedio de 4,5 kWh.

3.2.3 Pachavita

El estudio de caso de Pachavita se encuentra en la vereda Sacaneca, ubicado en las coordenadas 5°10'18,01"N, 73°24'05,13"O, a una altura de 2.115. Se encuentran instaladas 10 colmenas. 5°10'18,01"N 73°24'05,13"O. El municipio de Pachavita se encuentra localizado al sur occidente del departamento de Boyacá, en la provincia de Neira, sobre la cordillera Oriental, su cabecera municipal se encuentra a una altura de 1985 msnm. La extensión aproximada es de 68 km². En el sector aflora el flanco derecho del Sinclinal de Pachavita en el cual se observan escarpes formados por bancos de areniscas cuarzosas con pequeños paquetes de lutitas y limolitas pertenecientes a la formación Une.

En la parte central de la zona en dirección Noreste-suroeste pasa el eje del anticlinal de Pachavita, el cual tiene una topografía suave, representados por los cuaternarios recientes y una topografía semiondulada conformada por gruesos paquetes de lutitas negras, intercaladas con areniscas cuarzosas pertenecientes a la formación Chipaque; en la parte más noreste de la zona de estudio, donde aflora la formación Guaduas es característica la topografía suavemente ondulada, moldeada por las arcillolitas de esta formación. En el sector nor-oeste después de encontrar la topografía suave de la formación Chipaque, se hacen presentes abruptos escarpes casi verticales formados por las rocas de las formaciones Plaeners y Areniscas de Labor y Tierna. En esta región, el relieve inclinado y accidentado determina diferentes altitudes y temperaturas, parámetros que, asociados con la precipitación pluvial y diversas características de humedad, conllevan a que en el municipio de estudio se presentan los siguientes climas:

- *Clima Premontano Tropical Húmedo a Sub-húmedo:* Cuyos límites climáticos oscilan dentro de un rango de precipitación entre 1500 y los 1000 mm en el sub-húmedo y de 1000 a 2000 mm en el húmedo, y una temperatura media aproximada entre 18 y 24°C. Este clima abarca casi la mitad del municipio de sur a norte por la parte oriental.
- *Clima Montano Tropical Húmedo y muy Húmedo:* Estos suelos tienen como límites climáticos una temperatura media entre 12 y 18°C y promedios anuales de lluvias de 1.000 a 4.000 mm y que abarca una gran zona del municipio de norte a sur por la parte occidental de Pachavita.
- *Clima Montano Tropical y Sub-andino Húmedos:* Las características climáticas para el sub-andino húmedo son temperaturas de 3 a 6°C y una precipitación promedio anual de 500 a 2000mm y para el montano tropical húmedo una temperatura de 6 a 12°C y una precipitación promedio anual de 500 a 1000 nm, esta zona está ubicada en la parte central del municipio.

3.3 Determinación de la influencia de las condiciones climáticas en las colmenas

En los tres estudios de caso se realizaron diferentes visitas con el fin de estudiar las unidades de producción, los procesos biológicos en las colmenas, realizar entrevistas a los apicultores y observar posibles patologías

en las colmenas. Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica que permitiera establecer las causas del deterioro de las colmenas. Estos resultados son relevantes en el momento de decidir sobre la implementación de un nuevo material o realizar ajustes para la prevención del deterioro del material en las colmenas convencionales existentes.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan algunos de los hallazgos relacionados con los efectos que tienen las condiciones climáticas del entorno estudiado en la integridad de los materiales utilizados para la construcción de colmenas de abejas.

Las colmenas de abejas en los estudios de caso corresponden a estructuras del tipo Langstroth, las cuales son construidas en madera de pino. Las estructuras de colmenas en los municipios de Paipa y Pachavita están ubicadas en ambientes exteriores por lo que sufren un deterioro debido a las condiciones climáticas y los procesos biológicos propios de las colmenas, mientras que las colmenas ubicadas en Duitama se encuentran debajo de techo plástico y tejas de zinc, las cuales las protegen de la radiación solar directa y de lluvias, pero aun así se observa un deterioro notorio en las colmenas, como se presenta más adelante. Dentro de las condiciones climáticas que aceleran la degradación de las colmenas, se encuentran la radiación solar, la humedad, la temperatura y las precipitaciones. En cuanto a los procesos biológicos, estos corresponden a patologías causadas por hongos e insectos [18]. Las causas del deterioro identificadas en este estudio son:

4.1 Radiación solar

La luz solar que llega a la superficie terrestre está constituida de un amplio espectro de radiaciones que pueden dividirse en tres clases: Las radiaciones ultravioletas (de 295 a 400 nm), correspondiente al 5% de la luz solar, las cuales tienen una elevada energía que le permite penetrar en profundidad en la madera, sin importar el recubrimiento. Su acción es destructiva tanto en la madera como en los recubrimientos. Radiaciones Visibles (de 400 a 700 nm), correspondientes al 45% de la luz solar y que no tiene energía suficiente para romper las uniones de los grupos químicos, las cuales causan variaciones del color de la madera. Radiaciones Infrarrojas (de 700 a 2500 nm), correspondiente al 50% restante de la luz solar, la cual es la parte de la luz que transporta el calor y a través del que se aceleran todos los fenómenos de degradación.

La luz ultravioleta y la visible son las causantes de problemas como la fulminante reacción de los radicales, provocando fuertes tensiones permanentes que provocan rigidez y amarillamiento de la película de recubrimiento; activa reacción foto demolidora de la lignina que provoca el agrisamiento de la madera [19]. Este fenómeno se desarrolla a través de una variación inicial del color dependiendo del tipo de madera. En el caso de madera clara se produce un amarillamiento-oscurecimiento debido a la degradación de la lignina, importante componente que contribuye a la buena adhesión de recubrimientos sobre la madera. En esta fase es muy importante la acción del oxígeno de la atmósfera. En el caso de maderas oscuras se produce en cambio una decoloración de la madera debido a la degradación de las materias extractivas que son la base de la coloración de la madera.

Esta decoloración esconde en realidad el amarillamiento dado por la desaparición de la lignina. A continuación, de la decoloración se produce un agrisamiento debido a la acción de lavado del agua, la cual disuelve todos los subproductos de la degradación de la lignina y de los otros componentes extractivos de la madera. Se cree también que la acción de los hongos cromógenos contribuye con el agrisamiento de las colmenas. La luz Infrarroja de la radiación solar tiene dos efectos negativos, acelerando el proceso químico foto-demolidor activado por la luz Ultravioleta y Visible de la radiación solar y en la interface madera-barniz: el coeficiente de dilatación térmica de la madera es mucho más baja que la del barniz y de todas formas diferente en dirección axial, radial y tangencial. Después del calentamiento se genera una fuerte tensión en la interfase madera-barniz que finalmente provoca el levantamiento y separación del barniz de la superficie. Los daños causados por la acción del sol son más visibles en la madera barnizada con procesos transparentes incoloros.

4.2 Hongos

De acuerdo con su naturaleza se dividen en hongos perfectos (Ascomicetos y Basidiomicetos) y hongos imperfectos, y según el daño provocado a la madera en hongos cromógenos y hongos xilófagos. Los factores que regulan el desarrollo y el crecimiento de los hongos son la humedad de la madera, temperatura, oxígeno, luz y tipo o especie de madera:

- *Hongos Cromógenos:* Son los micelios que causan alteraciones del color de la madera, pero no alteran las características de su resistencia mecánica. Estos hongos se nutren de las sustancias de reserva (azúcares y almidones contenidos en la albura) que se encuentran en el interior de las células sin atacar las paredes celulares, esto es la estructura que sustenta la madera. Los hongos cromógenos pueden ser distintos, en función de su capacidad de difusión en la madera. Con desarrollo exclusivo en superficie son más conocidos como mohos. Tienen el aspecto pulverulento o lanuginoso con un color que varía del verde-negro al amarillo-pardo. Pueden ser eliminados fácilmente de la superficie.

A esta clase pertenecen varios hongos imperfectos como son los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*. Con desarrollo en profundidad estos hongos se difunden por toda la albura sin atacar el duramen. Tienen una coloración que varía del azul al negro. En este grupo se encuentra el hongo del azulado que muy frecuentemente se puede observar en la madera de pino (y muy pocas veces en otras coníferas) y que es atribuido al ataque de algún hongo Ascomiceto (*Ceratocystis pilifera*). Los factores que regulan el crecimiento y el desarrollo de los hongos cromógenos son la humedad, por lo que la madera muy seca o muy húmeda no es atacable por los hongos; las condiciones óptimas se encuentran entre el 20% y el 40% de humedad; la temperatura debe ser siempre superior a los 0° C y las condiciones óptimas se encuentran alrededor de los 22° C; el oxígeno, por cuanto, a más oxígeno presente, mayor desarrollo del hongo cromógeno.

Las condiciones desfavorables de humedad y de temperatura no matan a los hongos, los dejan en un estado de vida latente, prestos a manifestarse incluso después de largos períodos de tiempo tan pronto como las condiciones sean favorables. La madera verde del árbol recién cortado puede ser fácilmente atacada por hongos cromógenos.

- *Hongos Xilófagos:* Los hongos lignívoros definidos también como marcescentes, a diferencia de los hongos cromógenos, se nutren de las sustancias de las que están constituidas las paredes celulares (celulosa y lignina) provocando la destrucción completa de la madera; el resultado final de este ataque recibe el nombre de ataque de pudrición. Los hongos xilófagos (especialmente los Basidiomicetos, y también los Hongos Imperfectos y los Ascomicetos) son muy peligrosos ya que causan una rápida pérdida de la resistencia mecánica de la madera, factor fundamental en el caso de estructuras de sostén en la construcción en madera.

Los hongos de la pudrición son también el origen de las alteraciones cromáticas de la madera, que acompañan la fase inicial del ataque incluso antes que la resistencia mecánica y el peso específico sean sustancialmente modificados. Las alteraciones cromáticas más notables son las siguientes: Rosado, típico de las coníferas. Primer paso antes de la pudrición blanca. Agrisado: típica de las frondosas. Primer paso antes de la pudrición blanca. Pudrición Parda: causada por el hongo Basidiomiceto (ej. *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Poria vaporaria*, *Lentinus epideus*) los cuales secrecionan enzimas que destruyen la celulosa blanca, dejando intacta la lignina oscura. La madera se agrieta en forma de prisma o de cubo (pudrición cúbica) perdiendo su consistencia (es posible aplastar con la punta de los dedos) en color amarronado.

Pudrición Blanca es causada por el hongo Basidiomiceto (*Polystictus versicolor*) el cual segrega enzimas hasta de destruir no solo la celulosa sino también la lignina. La madera queda reducida a una masa fibrosa blancuzca (pudrición blanca fibrosa) con muchas cavidades unidas entre sí con un residuo blanco (pudrición blanca alveolar). Es muy común en las maderas frondosas en donde ataca incluso al duramen. Pudrición Blanda: es causada por algunos hongos Ascomiceto (*Gen. Chaetomium*) y de varios *Hongos Imperfectos*. La madera se presenta en estado húmedo esponjosa, blanda y con color más oscuro. En

estado seco presenta agrietamiento superficial. El daño generalmente se manifiesta sobre la superficie a medida que los hongos van penetrando en la madera atacando especialmente la albura y a menor velocidad también el duramen.

Los factores que regulan el crecimiento o desarrollo de los hongos lignívoros son: Humedad, la cual debe ser superior al 20%; en el caso de la carcoma blanda se precisan condiciones de humedad más elevada (superior al 30%) para que el hongo se desarrolle, cosa que sucede cuando la madera está sumergida en agua. Por encima del 45% de humedad el crecimiento del hongo queda inhibido. Temperatura, la cual debe estar entre los 3 a 40° C. Luz: no es necesaria. Oxígeno: es necesario. Tipo de madera: (más o menos específica) Coníferas y Frondosas.

4.3 Insectos

Los principales insectos que atacan la madera (los llamados perforadores de la madera, ya que excavan y construyen galerías en el interior de la madera) pueden dividirse en dos clases. *Xilófagos*: son devoradores de madera, forman galerías con paredes de color blanco. *Xilomicófagos*: son devoradores de los hongos presentes en la madera, formando galerías con paredes de color oscuro tan pronto aparecen los hongos. No son especialmente dañinos en cuanto que la larva no excava sus largas galerías hasta después del secado de la madera (*Xiloterus lineatus*, *Xiloterus domesticus*). En general el ciclo de un insecto que ataca a la madera (con excepción de las Termitas) es como sigue.

El insecto perfecto depone los huevos en el interior de la madera a través del oviscapto. Después de algunos días nace la larva (un gusano de color blanco), dotado de mandíbula de color oscuro y queratinoso para poder cebarse bien de madera. El periodo de crecimiento de la larva puede variar de meses a años (en función de la especie y de varios factores ambientales). Durante este periodo la larva cava largas galerías en el interior ingiriendo la madera y pasando de la fase de pupa o ninfa a la de insecto perfecto. Este sale finalmente de la madera perforando el diafragma que lo separa del exterior para reproducirse. Los insectos más comunes en nuestro país son:

- *Anóbidos*: Pertenecen a esta familia muy variados tipos de xilófagos corrientes, entre los que destacan el *Anobium punctatum* o carcoma de mueble y el *Xestobium rufivillosum* o carcoma grande. Atacan a la madera ya curada (en algunos casos también a los árboles secos en pie o recién abatido): tanto en albura como en duramen de coníferas y frondosas. La galería abierta por la larva no es coloreada y sigue líneas no uniformes groseras y con restos de excrementos. La madera, aunque esté muy atacada, no pierde completamente sus propiedades mecánicas. Con el curado y la puesta en obra de la madera la infestación continúa. Dimensión de la larva: 6-7 mm. Ciclo evolutivo: cerca de 3 años o más en relación a las condiciones ambientales. Diámetro del agujero de revoloteo: 1,5 a 3 mm. Dimensión del insecto adulto: 4 a 7 mm.
- *Líctidos*: Es la especie más difundida en Europa por la entrada masiva de maderas tropicales. Los más importantes son el *Lyctus brunneus* y el *Lyctus pubescens*. Además, existe la especie indígena *Lyctus linearis*. Atacan la albura de la madera curada de las frondosas siempre que se den las condiciones de tener vasos de gran diámetro y almidones celulares. Las coníferas no son atacadas debido a que no tienen vasos y su contenido de almidones es insuficiente. Las galerías abiertas por las larvas no son coloreadas y se encuentran llenas de finísima harina (característica de este insecto). La madera es atacada fuertemente por estos insectos y pierde su estructura y resistencia mecánica. El ataque continúa después del curado y en la puesta en obra. Dimensión de la larva: 5 mm. Ciclo evolutivo casi 1 año. Diámetro del hueco de revoloteo: 1,5 a 3 mm. Dimensión del insecto adulto: 2 a 5 mm hasta 7 mm.
- *Cerámbricidos*: También estos insectos causan graves y peligrosos daños a la madera puesta en obra. La larva en efecto no es apreciable desde el exterior, pero excava amplias galerías en el interior de la madera reduciendo de modo irreparable su resistencia mecánica. Tan solo en el primer revoloteo, que se produce generalmente después de un periodo muy largo del ataque inicial, es posible darse cuenta de la infestación. Las especies principales son: *Hylotrupes bajulus* (Carcoma grande): ataca madera curada de coníferas ya puesta en obra. La larva tiene un largo de 1,5 a 3 cm., con un diámetro de 7-8 mm y un

ciclo evolutivo de 2 a 10 años. *Hesperophanes cinereus* (Carcoma de las frondosas): ataca madera curada y puesta en obra. La larva tiene un ciclo evolutivo de 2-3 años.

- *Termitas*: La especie más difundida en nuestro país son las siguientes: *Reticulitermes lucifugus* y *Calotermes flavicollis*. Las termitas atacan la madera de forma devastadora y sin que, desde el exterior, pueda percibirse. Solo cuando el daño es muy grande es apreciable. Las termitas generalmente establecen sus colonias en raíces viejas o en trozos de madera sepultadas en el suelo. Desde aquí y a través de galerías pueden alejarse en busca de comida y atacando las estructuras en madera y todo tipo de elementos de la construcción

4.4 Diagnóstico cualitativo del deterioro de las colmenas

En los tres estudios de caso se realizó un diagnóstico de las patologías que se presentan en las diferentes partes de la colmena. Estas patologías consistieron en deterioros causados por hongos xilófagos, los cuales fueron cultivados en cámaras húmedas, aislados y sometidos a un proceso de crecimiento en medios de cultivo en cajas de Petri. En la Figura 4 se pueden observar las patologías en las colmenas y los resultados de las siguientes fases serán presentadas durante la sustentación, debido a que la presente investigación se encuentra en proceso de desarrollo.

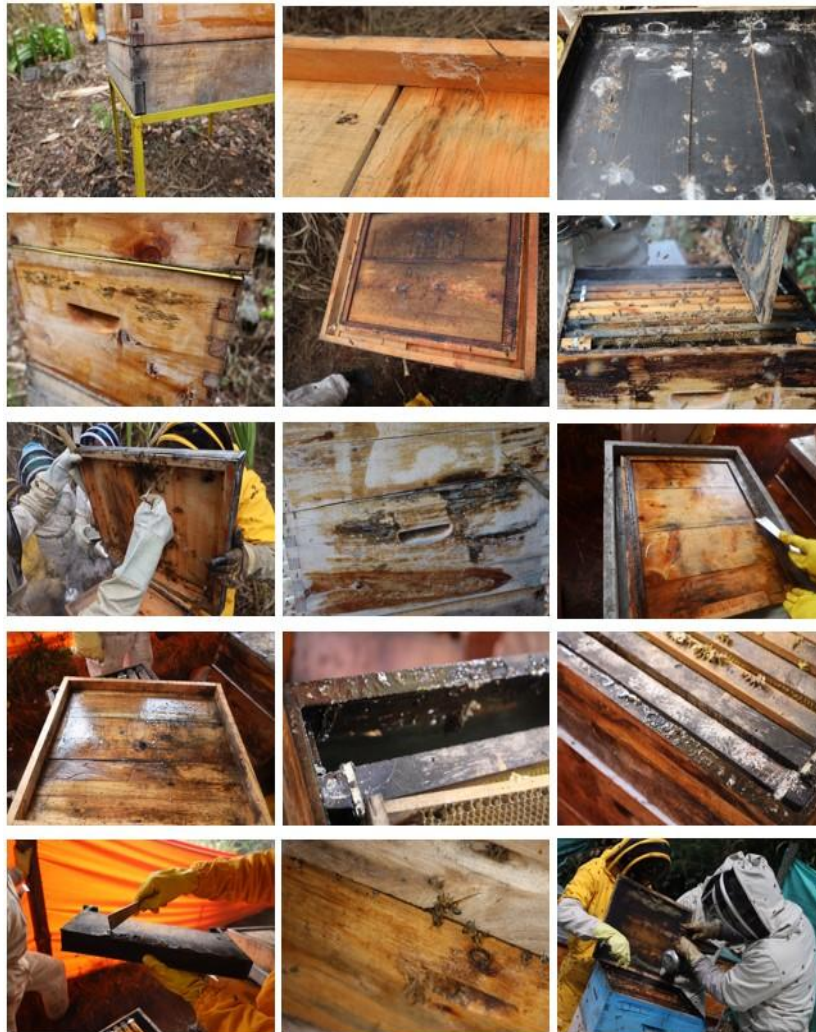


Figura 4. Patologías presentes en las colmenas de los estudios de caso. Las patologías son causadas principalmente por hongos xilófagos, los cuales están en proceso de aislamiento y cultivo en el laboratorio de microbiología

5. CONCLUSIONES

Las colmenas tienen una función específica en el acondicionamiento de las condiciones climáticas proporcionando el ambiente propicio para las funciones vitales de las abejas. Sin embargo, dependiendo

del estudio de caso, estas colmenas son hechas a base de diferentes materiales cuyas características repercuten en el periodo de vida útil y por consiguiente condiciona el rubro de gastos y de inversión inicial en las unidades de producción.

En Colombia, se utilizan en gran parte del territorio nacional las colmenas del tipo Langstroth a base de madera de pino y se ha encontrado que, este tipo de madera es susceptible de la proliferación de hongos xilófagos e insectos que son los principales responsables de la degradación de la madera, sumado a las condiciones climáticas de humedad relativa, altas temperaturas, efecto invernadero, entre otras., que aceleran este proceso de degradación del material estructural de las colmenas.

Una vez, identificados los tipos de colmenas, sus características y las principales fuentes de degradación de sus materiales estructurales, se pudieron identificar alternativas de materiales estructurales para las colmenas y sus ventajas, desventajas y costos de manufactura, las cuales pueden servir de referencia para desarrollar nuevos tipos de colmena o nuevos materiales para su construcción.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento a la UPTC por su apoyo en la realización de este proyecto de investigación sobre Colmenas, en el marco del proyecto de investigación con código SGI 3006 *Desarrollo de un prototipo de colmena eco ambiental mediante la utilización de materiales industriales y agroindustriales residuales, para el confort productivo de las abejas y el fortalecimiento de la cadena apícola de Boyacá*, en el marco del contrato de financiamiento de recuperación contingente No. 80740-732-2020 entre Colciencias y la UPTC.

REFERENCIAS

- [1] C. N. Schouten y D. J. Lloyd, «Considerations and Factors Influencing the Success of Beekeeping Programs in Developing Countries», *Bee World*, vol. 96, n.º 3, pp. 75-80, jul. 2019.
- [2] C. Schouten, D. Lloyd, y H. Lloyd, «Beekeeping With the Asian Honey Bee (*Apis cerana javana* Fabr) in the Indonesian Islands of Java, Bali, Nusa Penida, and Sumbawa», *Bee World*, vol. 96, n.º 2, pp. 45-49, abr. 2019.
- [3] K. Gratzner, F. Susilo, D. Purnomo, S. Fiedler, y R. Brodschneider, «Challenges for Beekeeping in Indonesia with Autochthonous and Introduced Bees», *Bee World*, vol. 96, n.º 2, pp. 40-44, abr. 2019.
- [4] C. Schouten, D. Lloyd, y D. Somerville, *Using Apis mellifera and Apis cerana in Landless and Subsistence Communities in Timor-Leste and Indonesia*. 2016.
- [5] T. Harwood y R. M. Bourke, *Food and Agriculture in Papua New Guinea*. ANU Press.
- [6] D. Lee, «Factors of Success in Beekeeping Development Projects and Their Application to South Africa's Beekeeping Industry», *Pomona Sr. Theses*, ene. 2014, Recuperado: https://scholarship.claremont.edu/pomona_theses/103
- [7] G. Saner, S. Engindeniz, B. Tolon, y F. Çukur, «The Economic Analysis of Beekeeping Enterprise in Sustainable Development: A Case Study of Turkey», *undefined*, 2003, Accedido: jun. 13, 2021. Recuperado: /paper/THE-ECONOMIC-ANALYSIS-OF-BEEKEEPING-ENTERPRISE-IN-A-Saner-Engindeniz/dc85996bb759ade5087b0b9733bb41f7dbdf41a2
- [8] UPLA, «La apicultura crece en Colombia», *#Unidosporlasabejas*, sep. 22, 2020. Recuperado: <https://abejasenagricultura.org/la-apicultura-crece-en-colombia/>
- [9] Semana, «Cría de abejas: la apuesta económica pospandemia», *Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo*, ago. 06, 2020. Recuperado: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/apicultura-sector-clave-para-reactivacion-economica-en-colombia--coronavirus/53533/>
- [10] SanMartín, «La apicultura como motor de la seguridad alimentaria del país: propuesta de la San Martín», *Fundación Universitaria San Martín*. Recuperado: <https://www.sanmartin.edu.co/1/noticias/apicultura-como-motor-de-la-seguridad-alimentaria-del-pais-propuesta-san-martin/>
- [11] «Minciencias», *Minciencias*. Recuperado: <https://minciencias.gov.co/>
- [12] Eva Crane, «A short history of knowledge about honey bees (*Apis*) up to 1800" *Bee World*: Vol 85, No 1.
- [13] Eric Tourneret, *Les routes du miel*, Hozhoni Editions. Lagorce, France: Hozhoni Editions, 2015. Recuperado: <https://www.editions-hozhoni.com/boutique/beaux-livres/les-routes-du-miel/>
- [14] «Pollination: threats and opportunities in European beekeeping- fdi:010068503- Horizon». Recuperado: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010068503>
- [15] Lorenzo L. Langstroth, «Beehive», Letters Patent No. 9300, Recuperado: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US9300.pdf>
- [16] P. Kasangaki, M. Chemurot, D. Sharma, y R. Gupta, «Bee Hives in the World», 2014.

- [17] Joedi Besora Magem, «Informe Técnico para la Construcción de una Colmena y Portanúcleo Tipo Langstroth», 2019.
- [18] I. L. Brown, «Beegin Beehive Materials Research Summary», p. 23, 2018.
- [19] Sabietimber, «Sabie Poles Intentional Quality», A guide to timber and its preservative treatment against biological degradation, 2021. Recuperado: <https://www.sabiepoles.co.za/>

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
Vol. I, sexta edición

El contenido de este libro trata sobre una ingeniería global y sostenible que guie a la sociedad en su tránsito por el Nuevo Orden Mundial. Los autores de cada capítulo plasman sus pensamientos acerca de muchas de estas cuestiones, tan necesarias en la actual situación del Planeta, ofreciendo una perspectiva global de la ingeniería para el mundo, y no para atender al neoliberalismo imperial. Las investigaciones desde las que se generan los capítulos aquí incluidos son de carácter transdisciplinar, ya que esta deberá la manera en que se desarrolle la ingeniería en la Nueva Era que estamos viviendo.

