



INVESTIGACIÓN FORMATIVA EN INGENIERÍA

Tercera Edición

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)



Editorial IAI
Medellín - Antioquia
2019



Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

Investigación Formativa en Ingeniería

Tercera Edición

ISBN: 978-958-52333-1-7

© 2019 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



Investigación formativa en ingeniería [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 3a. ed. --
Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2019.
p. 277 -- (Ingeniería y ciencia)

Archivo en formato pdf (15 Mb). -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-52333-1-7

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

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1047664

Investigación Científica ISBN: 978-958-52333-1-7
DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3387691>

Investigación Formativa en Ingeniería
Serie: Ingeniería y Ciencia
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Tercera Edición: agosto 2019
ISBN: 978-958-52333-1-7
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2019 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/).

Global Publisher: Instituto Antioqueño de Investigación IAI
Cover Designer: IAI, Medellín, Antioquia.
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas 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, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación IAI
Instituto Antioqueño de Investigación
<http://fundacioniai.org>
[contacto\(AT\)fundacioniai.org](mailto:contacto(AT)fundacioniai.org)

Presentación

Uno de los principios orientadores que rigen el trasegar de la investigación en cualquier escenario, es poder darle la oportunidad y orientar el trabajo de los estudiantes para que se interesen e ingresen en este apasionante mundo. Las universidades, los centros de investigación y el Estado necesitan apoyar a los jóvenes investigadores, los trabajos de grado y los procesos en semilleros para que los estudiantes convivan con investigadores y se enteren de primera mano de las ventajas de adelantar proyectos y programas de investigación.

Este libro es el resultado de ese trabajo y demuestra que, si los jóvenes se encuentran bien asesorados y cuentan con el apoyo necesario, pueden realizar trabajos excepcionales como los que se describen en cada uno de sus capítulos. Esta tercera edición de Investigación Formativa en Ingeniería recoge los resultados del trabajo investigativo de jóvenes entusiastas y dedicados por su futura profesión. Aquí el lector podrá encontrar aportes desde disciplinas como las Ciencias Computacionales e Ingenierías como la Aeronáutica, Civil, Electrónica e Industrial.

La calidad de su contenido es el reflejo de procesos serios y estructurados que llevan las instituciones en pro de que los estudiantes se motiven a investigar y son la esperanza del esperado y necesitado relevo generacional para el país. Para la Editorial IAI es un orgullo poder editar cada año este libro y brindarle a la comunidad un trabajo de excelentes características. De la misma manera agradecemos a todos los autores que confiaron en nosotros para presentar su trabajo y aportar al cuerpo de conocimiento de la Ingeniería.

Contenido

	Pág.
Diseño y desarrollo del prototipo de una plataforma de comercio electrónico para la comunidad académica del Politécnico Grancolombiano Edwar A. Arévalo N., Manuel F. Avendaño M., Edwin A. Niño V., Javier F. Niño V.	4
Aplicación móvil adaptativa a entornos web para la gestión del tiempo y el desarrollo de la autoeficacia en estudiantes de programas en educación a distancia y virtual Jeffrey A. Cortés C., Alexandra M. Silva M., Marcos A. Sandoval S.	13
Aplicación móvil con Realidad Aumentada para practicar las <i>preposiciones de lugar</i> en inglés: Estudio de usabilidad y aceptación Brenda L. Cano V., Jaime E. Hernández R., Jorge Bacca	22
Evolución de la tecnología <i>blockchain</i> como pilar para la Cuarta Revolución Industrial Nelson F. Barco B., Francisco J. Moreno A., Jaime A. Guzmán L.	32
Solución Internet de las cosas para personas con movilidad reducida Albenis Cortés R., William A. Villalobos V., Jhonston J. Lemus C., Diego F. Rodríguez R., Alaira J. Vargas B.	40
Estudio térmico y de dinámica de gases de la implementación del motor PT6A-65B en la aeronave CESTOL Skyron Germán Reyes R., Luis A. Hernández C., Federico Riveros G., Rafael M. Cerpa B.	52
Análisis numérico mediante CFD de la influencia del fuselaje en la aerodinámica interna del módulo de carga de la aeronave Aquila en la medición de gases Paula V. Barrera H., Sebastián Díaz L., Rafael M. Cerpa B.	69
Modelamiento y diseño de estrategias para la mitigación del ruido en el centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero teniendo en cuenta la caracterización de la flora en el sector Hernán D. García S., María C. Mendoza G., Tatiana Pérez G.	77
Educación ambiental en Colombia y en el mundo Pedro L. Blanco J., Adriana L. Torres S., Jorge L. Rodríguez M., Angie de M. Castillo M., Ricardo de la Hoz L.	85
De la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración Olga L. Vanegas A., John S. Martínez M., Jessica A. Poveda J.	96
Evaluación del esfuerzo último de dos uniones con acoples de diferentes diámetros, adheridos con una mezcla de mortero, para determinar su posible aplicación a construcciones en guadua <i>Angustifolia Kunth</i> Olga L. Vanegas A., Flor N. Díaz P., Leidy K. Cubides A., Henry Y. Gamba G.	106
Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua <i>Angustifolia Kunth</i> Olga L. Vanegas A., Flor N. Díaz P., Martha L. Cendales P., Javier R. Moreno M.	115
Mortero sostenible con cáscara de huevo Laura D. Ochoa T., Giulia Forestieri	128
Evaluación de la respuesta inelástica de las columnas de un puente segmental de cinco carriles localizado en una zona de amenaza sísmica alta Gerardo A. Zapata G., Álvaro Viviescas J., Carlos A. Riveros J.	137
Estudio del comportamiento del amortiguador de masa sintonizada de la torre Taipei 101 en la reducción de vibraciones producidas por terremotos y tifones en 2014 Ramiro E. Franco B., Juan S. Correa A.	148
Sistema de monitoreo del consumo eléctrico de la iluminación o carga en un edificio Alben Melo V., Bairon F. Peña C., Manuel F. Acosta V., Luis M. Pulido O.	163
Diseño de un dispositivo mecánico como apoyo a la rehabilitación física del canal carpiano y/o lesiones de muñeca Brossnan F. Vargas G., Daniel H. Albarracín, Harol S. Ricaurte C.	173
Dosificación de nutrientes en un cultivo hidropónico de <i>Lactuca Sativa</i> Dionel Castro S., Emilsen Yazmin A., Daniel E. Cufiño G., Juan D. Gil R.	190
Sistema de alimentación eléctrica para celulares a partir de energía renovable y accionado por botellas Pets Emilsen Y. Arias C., Laudy V. Fernández R., Brayan S. Pérez M.	198
Algoritmo de secuenciación de trabajos para sistemas <i>job shop</i> flexible y <i>flow shop</i> flexible mediante solución heurística Daniel C. Rodríguez G., Juan S. Navas G., Diego A. Cadena Q., Ana M. Pérez O., Sergio M. Garavito C.	203
Procesamiento de Imágenes Diagnósticas con Matlab Dassy K. Sánchez J., Wilmar Prada, Ricardo Ceballos G.	216
Modelo de asignación y ruteo aplicado a la distribución de productos de una empresa de derivados lácteos en la ciudad de Bogotá Oscar J. Herrera O., Astrid V. Naranjo A., Julio A. López P.	225

Integración de la gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en el negocio y su aporte a la medición de la madurez de la gestión organizacional: Una revisión sistemática	240
Sara J. Cárdenas B., Yuber L. Rodríguez R., Magda V. Monroy S., Harold W. Hernández C.	
Protocolo para la medición de la fuerza máxima de agarre: Una revisión sistemática	254
Cinthia A. Reales A., Magda V. Monroy S., Christian R. Zea F.	
Diseño de un brazo robótico con propósitos educativos: Una experiencia formativa	266
Juan D. Rivera T., Carlos W. Sánchez, John E. Ordoñez Ñ.	

Diseño y desarrollo del prototipo de una plataforma de comercio electrónico para la comunidad académica del Politécnico Grancolombiano

Edwar A. Arévalo N.¹

Manuel F. Avendaño M.²

Edwin A. Niño V.³

Javier F. Niño V.⁴

Politécnico Grancolombiano – Colombia

E-commerce es una de las principales herramientas de comercio por internet de la nueva era, basado en el principio de ofertar servicios y/o productos a un mercado más amplio, haciendo que millones de personas en el mundo interesadas estén a sólo un clic de distancia de encontrar lo que buscan. Bajo este concepto en los últimos años los usuarios han podido encontrar diferentes formas de adquirir tanto productos físicos como ropa, accesorios, tecnología y demás, como productos intangibles tal es el caso de membresías y suscripciones; sin mencionar que también se puede contar una gran variedad de productos que se encuentran tanto en formato digital como físico y un ejemplo de ello son libros, música, películas, videojuegos, etc. El desarrollo de software es un proceso encaminado a la construcción de sistemas informáticos que buscan resolver una necesidad por medio de la correcta organización y construcción de componentes ayudados por arquitecturas de software y metodologías. Considerando lo anterior y con una innovadora idea en mente a beneficio del Politécnico Grancolombiano, una institución universitaria con más de 50.000 estudiantes activos en todo el país, se presenta un proyecto cuyo objetivo principal es integrar más a la comunidad de estudiantes de la universidad, por medio de una plataforma web que cuente con todos los productos y servicios que ofrece la institución a toda su comunidad, favoreciendo así, que dichos productos y servicios, estén al alcance de aproximadamente el 70% de los estudiantes de la institución que se encuentran alrededor de toda Colombia, además de la posibilidad de que los mismos estudiantes puedan ofertar sus productos y así incentivar su crecimiento laboral, profesional y personal.

1. INTRODUCCIÓN

En el Politécnico Grancolombiano el sistema de ventas, ya sea físico (para el caso de la tienda PoliShop) o virtual (para el caso de la tienda editorial de la universidad para textos educativos), se ve afectado en la divulgación de los artículos que oferta y el suministro de los mismos; debido en gran parte a que la comunidad de la institución no conoce que la Universidad cuenta con un muy limitado pero útil catálogo de libros y artículos, lo cual conlleva a que el sistema de ventas virtual que se maneja en el momento llegue a una pequeña parte de la población a la que va dirigida.

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta una idea para integrar a la comunidad de la institución y poder potenciar las ventas de los diferentes y variados productos que ofrece el Politécnico Grancolombiano, en una sola plataforma al alcance de la comunidad de la institución.

Además de esto y contando con que la mayor cantidad de estudiantes inscritos en la institución son de modalidad virtual (22315) -lo que representa cerca del 70,75% de comunidad estudiantil- y de diferentes zonas del país, no se debería dejar pasar la oportunidad de ofertar tales productos a un grupo tan grande de personas que bien podrían estar interesadas, lo que a su vez y de ser bien implementado y divulgado, elevaría las ganancias de la universidad considerando la gran cantidad de posibles clientes.

Aunque existen herramientas para la venta virtual de productos de la institución, se limita únicamente a textos publicados por la editorial del Politécnico Grancolombiano, por lo que muchos productos tales como ropa, cuadernos o accesorios marcados con el logo de la institución no tendrán acceso a aquellas personas que no se acerquen a la tienda física.

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un sitio web dedicado a la venta y divulgación de productos y servicios de la institución y su comunidad, en la cual de manera sencilla y accesible y desde cualquier lugar del país, se cuente con una interfaz amigable en la que se presenten cada uno de los productos a ofrecer. Con esto se piensa que, al ofertar productos de las pequeñas microempresas creadas por los estudiantes de la institución, la integración entre estudiantes aumentará y se genere un estímulo de crecimiento en todas las personas involucradas. Buscamos que este proyecto tenga un gran impacto en la comunidad de la institución ya que todo aquel que haga parte podrá tener acceso de forma gratuita a la plataforma, comprar y vender productos relacionados o no con la institución lo cual ayudará a aumentar la publicidad e ingresos en la universidad.

Para lograr este objetivo es necesario realizar la plataforma de comercio de la institución lo más completa que se pueda, lo que incluye realizar el desarrollo de manera ágil, con las funciones básicas de compra y venta de producto, un perfil único por usuario con el registro de su actividad, y visualmente agradable e intuitiva.

¹ edarevalo1@poligran.edu.co

² mfavendano@poligran.edu.co

³ eaninove@poligran.edu.co

⁴ jninoval@poligran.edu.co

2. MÉTODO

2.1 Estudio de e-commerce

Para tener una mejor idea de elaboración del proyecto, se realizó una investigación acerca del e-commerce, en la cual se buscaba obtener información relevante para el éxito del proyecto como las principales ventajas y desventajas. Los resultados fueron muy satisfactorios debido al éxito que ha tenido comercialmente hablando. Shopify, una importante empresa canadiense que se encarga de procesar y analizar pagos en línea, en su artículo *Global Ecommerce Statistics and Trends to Launch Your Business Beyond Borders* [1], concluye que debido al gran impacto que ha tenido el ecommerce en diferentes países y en especial a las microempresas, por su gran cantidad de dinero generado por las compras online en los últimos años y sus tendencias al alza en el comercio digital (Figura 1). Las predicciones para una tienda virtual en la institución serían favorables como una fuente alterna de ingresos.

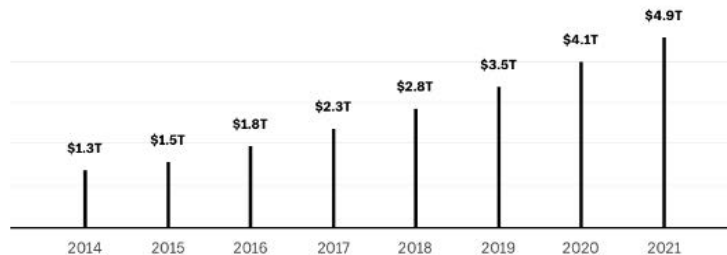


Figura 1. Ventas minoristas e-commerce y proyección

Además de ello se encontró que según Latamclick, la mejor agencia de marketing digital de Paraguay, en su artículo *Comercio electrónico: estadísticas del 2017 y tendencias para el 2018* [2], las plataformas web son la principal forma de comercio electrónico por la que los usuarios prefieren hacer sus compras en línea (Figura 2) por encima de aplicaciones móviles. Por lo cual entendemos que la opción de desarrollar una plataforma web, como se menciona, es una excelente manera de entrar en contacto con el concepto de e-commerce, además de una posible potenciación en las ventas para el Politécnico Grancolombiano y sus estudiantes.

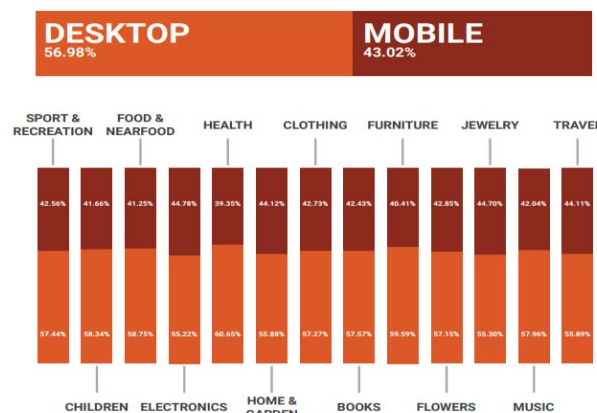


Figura 2. Estadísticas del 2017 y tendencias para el 2018

2.2 Caracterización de la población

Con el objetivo en mente y el posible potencial de la idea, se procedió a realizar una encuesta a una pequeña muestra de la población estudiantil del Politécnico Grancolombiano, en la cual, se tenía como meta deducir el impacto que tendría realizar una tienda virtual que contará con los diferentes productos que ofrece la institución y los diferentes vendedores independientes (estudiantes). En esta encuesta se tenía contemplado observar y analizar las respuestas de los estudiantes tanto de modalidad virtual como presencial y ver sus diferentes opiniones sobre las compras por internet y el nivel actual de conocimiento de los productos y servicios que ofrece la universidad.

La encuesta se puso a disposición de los estudiantes el 15 de marzo del presente año, y se cerró el 15 de abril, contaba con 12 preguntas que le brindarían al equipo, la información necesaria para el para la construcción de las pautas iniciales del proyecto. La encuesta fue asesorada por algunos estudiantes de último semestre de la carrera de comunicación social de la universidad que hicieron del formulario, un documento fácil y cómodo para el lector; esto con el fin de llegar a la mayor cantidad de personas posibles. El formulario contaba con preguntas específicas para la tienda del Politécnico Grancolombiano como "¿Sabía que existe una editorial del Politécnico Grancolombiano?, ¿Conocía de la existencia de la página web de la editorial?", "Siendo 5 la calificación más alta, ¿Qué tanto le afectó el cierre de la tienda del Politécnico Grancolombiano?", y otras más informales sobre una hipotética plataforma virtual

en la cual ofertar productos como “¿Le interesaría que la universidad le ofreciera una plataforma para comercializar sus productos?”, “¿Cómo mejoraría la oferta de productos, si hubiera una tienda virtual del Politécnico Grancolombiano?”, “Si existiera una plataforma web de comercio de la comunidad del Politécnico Grancolombiano, usted: - ¿Utilizaría dicha plataforma para ofertar sus productos y/o servicios?> - ¿Supondría que la plataforma ayudaría a la integración de la comunidad del Politécnico Grancolombiano?>”, todo esto con el fin de ayudar a identificar las necesidades que requería el proyecto.

2.3 Desarrollo de software

Para que el proyecto tuviera un mayor control en tiempos de desarrollo y despliegue, el equipo de codificación decidió implementar una variación de los conceptos y componentes más significativos de una metodología ágil ya existente llamada Scrum [3], la cual consiste en un método iterativo e incremental que realiza, por medio de historias de usuario, un product backlog que contiene todas las tareas que se llevarán a cabo durante el proyecto asignándolas a tiempos de ejecución llamados *sprints*.

Estas historias de usuario hacen referencia a las tareas y funciones que debe cumplir el proyecto. Para la debida elaboración de una de estas historias, se deben tener en cuenta que las historias de usuario atacan en concreto una problemática, para esto se especifican ciertos criterios una vez identificada la problemática. El primero es considerar quién será la persona que actuará con la función, para esto, debe definirse un rol. Luego de tener el rol, se debe definir el tipo de problema que se quiere solucionar, en este caso se identifica una necesidad. El siguiente paso, es definir el porqué de la necesidad es relevante para considerarla una historia. El paso final es realizar unos criterios de aceptación, en la cual, se proponen las soluciones técnicas para resolver el problema.

Parte del proceso de desarrollo y primera etapa del ciclo de vida del software [4], consistía en identificar las historias de usuario que son piezas clave para el proceso de asignación de tareas de cada sprint. Para esto, se tuvo en cuenta los requerimientos hallados en la encuesta realizada y como medida complementaria, se realizaron los debidos mockups para identificar posibles historias omitidas. Una vez obtenidas las historias de usuario, se procedió a asignarles un valor de importancia y dificultad según el proyecto, con el fin de agregarlas a la pila de tareas del proyecto. Por lo anterior, es importante aclarar que se realizó un levantamiento de requerimientos tanto funcionales como no funcionales los cuales aterrizaron más la idea de las historias de usuario, las cuales cabe aclarar, se componen de tres factores importantes (actor, requerimiento, solución) para su elaboración.

Una vez asignadas las tareas en el product backlog, el siguiente paso fue asignar cada una de estas tareas al primer sprint, iniciando por las actividades con mayor valor para el proyecto. De este proceso, se realizó una revisión al final del sprint para verificar que las tareas asignadas estuvieran completadas; de no ser así se asignaban al siguiente sprint y así sucesivamente hasta concluir con todas las tareas del product backlog.

En el campo del desarrollo, siempre es recomendable tener una estabilidad entre la parte visual, que aprecia el usuario, y la parte lógica, que permite la funcionalidad del software; para que los usuarios sientan que el sistema con el cual interactúan es completo y visualmente satisfactorio. En la parte visual es importante contar con componentes de agrado hacia los usuarios, así como los colores, estilos, animaciones y de más. Por ello, esta parte del desarrollo es importante a considerar, y existen varios entornos de trabajo de *frontend* que permiten el acoplamiento de secciones visuales dentro del software y así mismo, una conexión con la parte lógica y funcional del backend que también cuenta con un gran número de entornos para trabajar y es igual de importante para el desarrollo de cualquier aplicación.

3. RESULTADOS

3.1 Análisis caracterización

En total se llegó a 212 estudiantes del Politécnico Grancolombiano, de todas las modalidades, contando con la opinión de la mayoría de las carreras que ofrece la institución y sin discriminar el semestre. A partir de los datos obtenidos, ya se contaba con una buena cantidad de estudiantes para realizar algún plan de acción, por lo tanto y basándonos en el objetivo principal del proyecto, empezamos filtrando los resultados de la encuesta en los estudiantes de modalidad virtual para confirmar que efectivamente la mayoría de los estudiantes de esta modalidad no conocían la existencia de la tienda física, la tienda virtual y menos de una editorial de la institución. Por lo cual, la plataforma será de gran ayuda para llegar a estas personas.

Según la anterior premisa, se encontró en la muestra, que del 90.1% (Figura 3) de los estudiantes de modalidad virtual que presentaron la encuesta no conocían la tienda virtual de la institución, lo que, según la cantidad de estudiantes en el año actual y de los datos obtenidos, el Politécnico Grancolombiano podría estar dejando pasar la oportunidad de ofertar sus productos a tan alto número de personas. También se encontró que el 88.6% (Figura 4) de los estudiantes que están en modalidad presencial ya sea diurna o nocturna, desconocen la editorial, lo que a su vez creemos, incrementa el número de personas desatendidas al mencionado público.

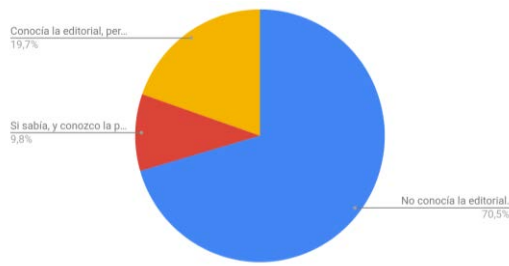


Figura 3. Porcentaje conocimiento editorial y tienda virtual de los estudiantes de modalidad virtual.

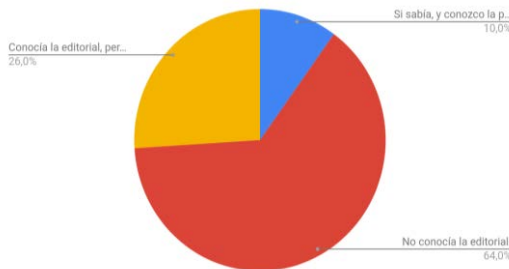


Figura 4. Porcentaje conocimiento editorial y tienda virtual de los estudiantes de modalidad presencial

Además de lo anterior, también se realizó una consulta sobre la posibilidad de ofertar productos propios dentro de la plataforma web, con el ánimo de prever que tan útil sería para los estudiantes que trabajan como vendedores independientes dentro de la institución. Los resultados de la encuesta fueron bastante favorables y mostraron un 96.4% (Figura 5) de los estudiantes que generan y/o venden productos, utilizarían la plataforma como una forma de oferta más a sus negocios.

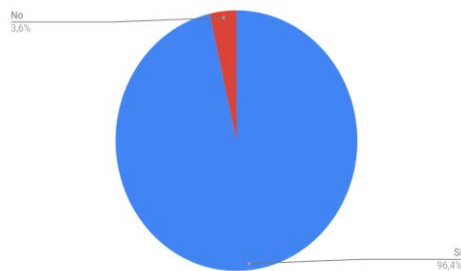


Figura 5. Interés de ofertar productos propios en una plataforma

Con todos los datos obtenidos y los requerimientos bien identificados, el equipo de desarrollo se tomó la tarea de generar un prototipo (mockups) de lo que sería esta plataforma. En este proceso, se definió que la plataforma debía contar con las funcionalidades básicas de una página de comercio como lo son comprar y vender, integrar la posibilidad de calificar los diferentes productos ofertados y la posibilidad de comentarlos. Todo esto, complementado además por un modelo de datos que le brindaría al equipo de desarrollo una visión más amplia de la parte lógica del proyecto y el manejo adecuado de los productos a ofertar.

Para darle solución al objetivo del proyecto, se pensó realizar una plataforma con el estilo de la página web de la institución que la mayoría de su comunidad ya conoce y maneja; esto con el fin de ayudar a los posibles nuevos clientes a sentirse más cómodos la navegar por un entorno amigable y conocido. Además de esto, y para facilidad de navegación de los usuarios dentro de las funciones de la plataforma mencionando que dos tercios de los estudiantes tienen experiencia en compras por internet (Figura 6), se basó el desarrollo de la interfaz, en la página web de e-commerce más conocida del mundo, Amazon.

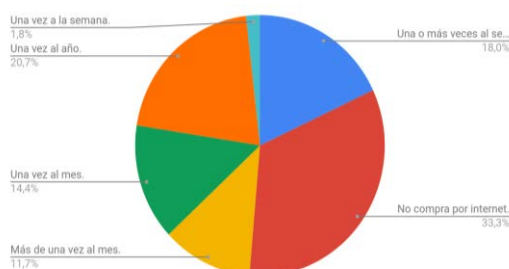


Figura 6. Experiencia y frecuencia en compra productos/servicios por internet

3.3 Desarrollo Aplicación

La plataforma está desarrollada utilizando la arquitectura de modelo vista controlador (Figura 8) en la que están definidas diferentes capas como la de presentación, servicios, negocio y lógica o de acceso de datos, con esto logramos garantizar que la integración de la plataforma no se vea afectada al realizar modificaciones sobre un elemento específico como puede ser en la base de datos, ya que si, al realizar modificaciones sobre esta, en el modelo lo único que tendrá que ser alterado sería la capa de acceso de datos y los demás elementos seguiría su funcionamiento de forma normal.

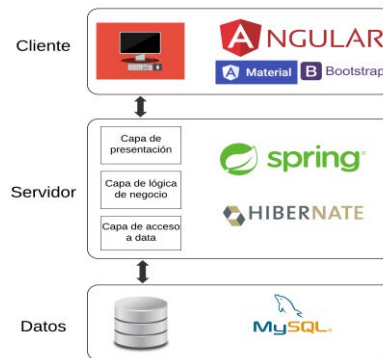


Figura 8. Modelo vista controlador (MVC) de la tienda virtual de Politécnico Gran Colombiano

Para el desarrollo de este modelo utilizamos diferentes tecnologías que se pueden acoplar y complementar entre ellas para obtener una plataforma completa con cada una de sus funcionalidades. Estas tecnologías son: Angular 6 para la capa de presentación y parte de la capa de servicios, el framework Spring para el contenedor de entidades y manejo de la capa de negocio o transacción de información con la capa de presentación, y base de datos relacional MySQL.

En las ventajas de utilizar Angular como framework para desarrollar el frontend está en que a diferencia de otros frameworks esta incluye una gran variedad de librerías incluidas, por lo que no se tendría que importar ninguna librería externa para obtener alguna una funcionalidad requerida, incluso en la primera versión de Angular, Angular JS esto era necesario. Angular además hace uso además de un lenguaje principal llamado TypeScript, un lenguaje multiparadigma desarrollado por Microsoft como un superconjunto de JavaScript, es decir que extiende las funcionalidades y sintaxis de JavaScript como lo conocíamos, agregando, por ejemplo, elementos de programación orientada a objetos como interfaces y modificadores de acceso de los atributos. Además de esto Angular provee generación de componentes web, los cuales se encargan de seleccionar el código para que cada elemento de la capa de presentación se mantenga independiente y pueda reutilizarse en diferentes lugares dentro del sitio web.

Además de esto también hablaremos de la parte de backend y las ventajas de utilizar Spring como gestor de capa de negocio y capa de acceso de datos. Uno de los factores principales para utilizar Spring para desarrollar la aplicación, es el uso de Java como lenguaje principal de programación por su afinidad con la programación orientada a objetos (POO), la cual resultó muy útil al momento de definir las entidades de la base de datos y su posterior mapeo con Hibernate. Spring tiene como principal objetivo tener un código limpio, ordenado y reutilizable, ya que al hacer uso de programación orientada a interfaces implica que el código sea modular y posea un bajo acoplamiento. Spring también integra la programación orientada a aspectos (AOP), es decir que es posible añadir una funcionalidad extra a clases y métodos existentes sin alterar su previa funcionalidad, y un manejo de rutinas transversales. Además de esto la facilidad que tiene para comunicarse y gestionar la base de datos por medio de la capa de acceso de datos en la que utilizando Hibernate se accede por medio de *Data Access Object* (DAO) que suministra una interfaz común entre las entidades de la tabla de datos y los objetos relacionados en el código, mejorando de esta forma la versatilidad para escribir las capas lógicas de la aplicación.

Una vez definidas todas las herramientas que se utilizarían y con el modelo ya integrado en la base de datos, el equipo de desarrollo comenzó con el proceso de codificación del frontend, generando los componentes en Angular más importantes de la plataforma. Estos componentes debían dar una solución a los criterios de aceptación de cada una de las diferentes historias de usuario que se generaron en la etapa del análisis. Componentes como “inicio” (Figura 9) y “detalle de producto” (Figura 10), se generaron respetando los criterios de evaluación de su debida historia de usuario, siendo estos a su vez, los componentes más importantes para los clientes finales, la comunidad de la institución.

En total, salieron 36 historias de usuario, en las que se buscaba cubrir todas las necesidades de una plataforma de comercio electrónico, tanto para el cliente, como para el que la administra. Entre algunas de estas historias se encontraba la elaboración de componentes como pantalla principal (Figura 11) e información de productos (Figura 12), y otras como:

- Carrito de compras
- Comentario
- Login
- Ofertar nuevo producto
- Detalles de producto vendido
- Inventario de productos
- Pantalla inicial administrador

Estos componentes fueron generados por tres partes, la parte lógica en TypeScript, la parte visual en CSS y la parte organizacional de los elementos en HTML, estos últimos basados en lenguaje de marcas. Además de ello y respetando los colores de la institución se le dio el aspecto y estilo de la página oficial del Politécnico Grancolombiano* con el fin crear una ilusión de familiaridad en los usuarios.

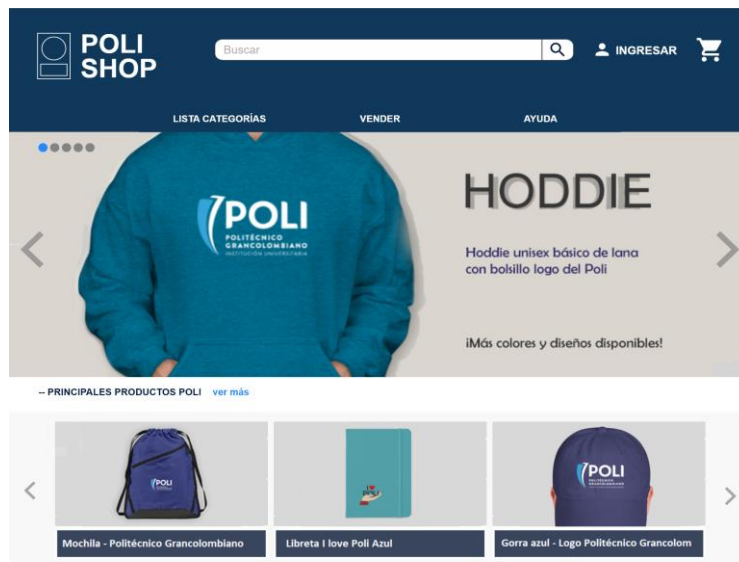


Figura 9. Página inicial tienda virtual del Politécnico Grancolombiano

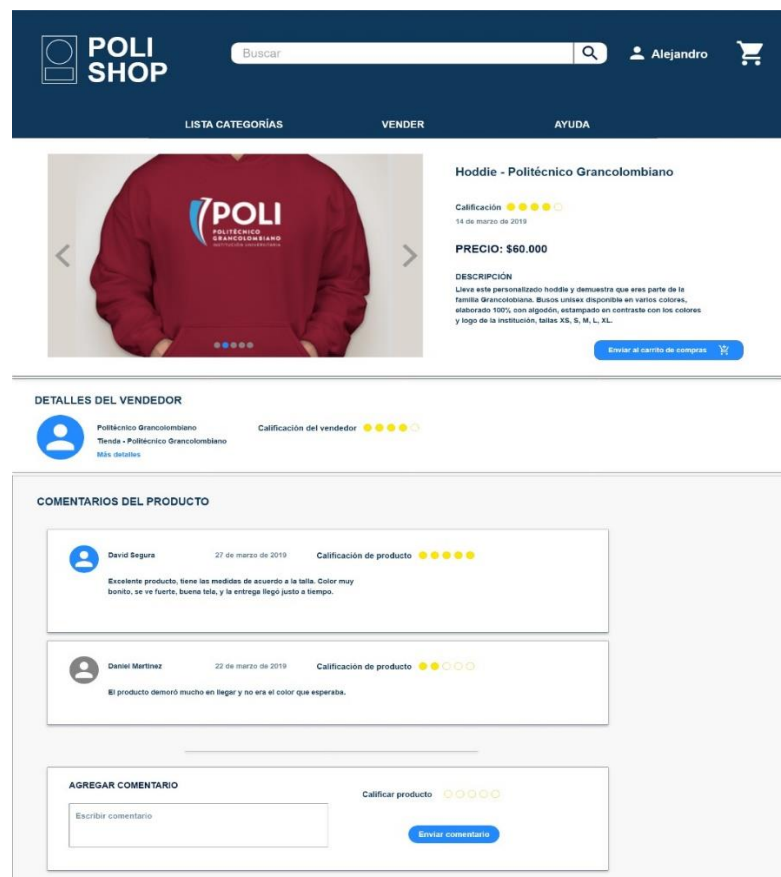


Figura 12. Página descripción de producto

Identificador (ID) de la historia	Enunciado de la historia				Criterios de aceptación (Título)
	Rol	Característica / Funcionalidad	Razón / Resultado	Número (#) de escenario	
0004-2019	Usuario (general)	Tener un muro o pantalla principal	Tener un espacio en la pantalla principal donde se encuentren los accesos a otros	1	Visualizar productos
				2	Visualizar botones como categorías, carrito, etc
				3	Tener información básica de la plataforma

Figura 9. Historia de usuario de la Página inicial tienda virtual del Politécnico Grancolombiano

Identificador (ID) de la historia	Enunciado de la historia				Criterios de aceptación (Título)
	Rol	Característica / Funcionalidad	Razón / Resultado	Número (#) de escenario	
0012-2019	Usuario (general)	Información de los productos	Tener una pantalla con la información detallada de un producto	1	Poder ver la fecha de publicación
				2	Poder ver la puntuación
				3	Poder ver diferentes imágenes del producto
				4	Poder ver el precio del producto
				5	Poder ver la descripción

Figura 11. Historia de usuario descripción de producto

Habiendo completado todos los componentes y la plataforma, se realizó una exhaustiva y minuciosa etapa de pruebas funcionales, en la que se detallaron algunos mínimos errores de posición de componentes en los estilos, que fueron corregidos en brevedad por el equipo de desarrollo. Una vez terminada la plataforma, se solicitó a la institución un espacio en sus servidores para realizar el debido proceso de despliegue. Con la plataforma en línea y accesible a la comunidad, lo siguiente fue compilar las instrucciones de instalación y modificación en un manual técnico en el cual se incluía a detalle todos los elementos del código como clases y métodos. También se realizó un manual de usuario en el cual se especificó detalladamente el uso de la plataforma pantalla por pantalla evidenciando el correcto funcionamiento de la plataforma a razón de satisfacer los criterios de aceptación de las historias de usuario que se plantearon en un inicio.

4. CONCLUSIONES

Este proyecto fue la integración de muchas horas de desarrollo, utilizando la versión más actual de Angular y Spring, combinadas con la ingeniería de software e investigación de ecommerce, para darle al Politécnico Grancolombiano una plataforma con diferentes funciones que le permitirá incrementar sus ganancias y hacer que su comunidad se apropie de la institución por medio de productos. Con el valor agregado de permitir que las personas que están empezando en el ámbito comercial o ya tienen su empresa formada, puedan ofertar sus servicios y/o productos a un amplio grupo de clientes, sin salir de casa y en una organización que quiere y cuida a cada uno de sus participantes, para así lograr un crecimiento personal y profesional.

Además de esto, se pueden generar aplicaciones y estudios de la plataforma susceptible al análisis de información, como estadísticas de probabilidad de nuevos lanzamientos basados en la calificación de los productos y los comentarios de los usuarios, informes de ingresos antes y después de la plataforma, informes de crecimiento individual o empresarial, o cualquier tipo de análisis que se requiera en un futuro, haciendo que la misma tenga un gran valor en el campo de la ciencia de datos.

Trabajo futuro

Cómo trabajo futuro se planea por medio de la agencia de comunicaciones del Politécnico Grancolombiano hacer una campaña publicitaria, con el fin de difundir la plataforma para lograr cumplir el objetivo del proyecto. Después de la campaña publicitaria y con unos meses de uso de la plataforma, se planea realizar una segunda encuesta en la que se quiere observar y analizar, si el impacto de dicha plataforma, es lo que se esperaba cumpliendo su objetivo (además de incrementar las ganancias del poli), o por el contrario, el público al que fue dirigido tienen observaciones o críticas constructivas para el mejoramiento del proyecto; todo esto con el fin, de brindarle un servicio adicional a la Universidad que más que monetario, va dirigido a la integración de su comunidad.

REFERENCIAS

- [1] A. Orendorff. Global Ecommerce Statistics and Trends to Launch Your Business Beyond Borders. 2019. [Online]. Available <https://www.shopify.com/enterprise/global-ecommerce-statistics>.
- [2] Á. Paredes. Comercio electrónico: estadísticas del 2017 y tendencias para el 2018. 2018. [Online]. Available: <https://www.latamclick.com/estadisticas-comercio-electronico-2017-tendencias-2018/>
- [3] G. Verheyen. *Scrum - A Pocket Guide*, 1st. Ed. Van Haren Publishing, 2013.
- [4] F. Amo, J. Feria, L. Martínez. *Introducción a la ingeniería de software Modelos de desarrollo de programas*. 1st, Ed. Delta Publicaciones, 2005.

- [5] Y. Muradas. ¿Qué es Spring Framework y por qué usarlo? 2018. [Online] Available: <https://openwebinars.net/blog/conoce-que-es-spring-framework-y-por-que-usarlo/>
- [6] P. Arizmendi. *AngularJS: Conviértete en el profesional que las compañías de software que necesitan*. 1st, Ed. 2018.
- [7] H. Spona. *Programación de Bases de Datos con MYSQL y PHP*, 1st, Ed. Alfaomega – Marcombo, 2010.
- [8] O. Gierke, T. Darimont, C. Strobl, M. Paluch, J. Bryant. Spring Documentation. 2008. [Online]. Available: <https://docs.spring.io/spring-data/jpa/docs/current/reference/html>
- [9] Google. Angular Documentation. 2010. [Online]. Available <https://angular.io/docs>.
- [10] D. Palomino. *Scrum en ingeniería de software*. 1st, Ed. 2015.
- [11] F. Gutiérrez. *Pro-Spring Boot 2: An Authoritative Guide to Building Microservices, Web and Enterprise Applications, and Best Practices*. 2nd, Ed. Apress, 2018.
- [12] R. Kenneth. *Essential scrum: a practical guide to the most popular agile process*. 1st, Ed. Prentice hall, 2013.
- [13] D. Palomino. *Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process* 1st, Ed. Addison-Wesley Professional, 2012.

Aplicación móvil adaptativa a entornos web para la gestión del tiempo y el desarrollo de la autoeficacia en estudiantes de programas en educación a distancia y virtual

Jeffrey A. Cortés C.¹

Alexandra M. Silva M.²

Marcos A. Sandoval S.³

Universidad Santo Tomás – Colombia

La investigación implementó una aplicación para contextos web adaptativos y móviles, constituyéndose en una herramienta de gestión del tiempo y desarrollo de la auto-eficacia para estudiantes que cursan programas en modalidad virtual y a distancia. El objetivo general apunta a mostrar como una aplicación móvil (Apps) adaptativa a entornos web contribuye a mejorar la gestión del tiempo de los estudiantes adscritos en programas de educación a distancia y virtual. Se han identificado la gestión del tiempo como una dificultad, entendiendo que la mayoría de los estudiantes se encuentran vinculados al sector laboral y no logran distribuir de manera equitativa el tiempo entre las distintas labores que adelantan. Así mismo, se hace necesario la potenciación de la auto-eficacia en los estudiantes. El desarrollo de esta capacidad permite organizar y ejecutar eficazmente las acciones requeridas día a día en su contexto educativo. Metodológicamente se abordó la investigación proyectiva. Desde el enfoque ingenieril se utilizó SCRUM y la implementación de los *framework* de software libre. Los resultados permitieron evidenciar desde el aspecto técnico una herramienta práctica, desde un diseño arquitectónico y ágil para su ejecución y, por otra parte, una herramienta como un aporte innovador para la gestión del tiempo y una estrategia para apoyar la auto-eficacia en los estudiantes.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones móviles (Apps) se han constituido en una estrategia didáctica apoyada por la tecnología en contextos educativos, facilitando al estudiante contenidos favorables y atractivos. De esta manera, se identificaron como una herramienta pertinente para apoyar las dificultades en la gestión del tiempo de los estudiantes en el desarrollo de sus estudios. Cuando un estudiante adelanta un programa en metodologías de educación virtual y a distancia, se requieren de competencias de autoformación [1], precisamente se determinó la autoeficacia como una capacidad fundamental en los estudiantes. Adicionalmente se han encontrado que algunas de las limitaciones para un buen rendimiento académico son sus deficiencias en el perfil cognitivo, además del conocimiento de técnicas de estudio, estas últimas relacionadas con la gestión del tiempo [2]. Por lo anterior, se hace necesario que el estudiante pueda encontrar un punto de convergencia en la identificación de su estilo de aprendizaje, el desarrollo de competencias de autoformación, que conlleven a la gestión eficaz de su aprendizaje. Para la fundamentación del trabajo se presentan bases teóricas desde las Apps en contextos educativos, el software libre como herramienta de trabajo, los *framework* de desarrollo, las metodologías para su implementación y finalmente las habilidades de autoeficacia y autoformación.

1.1 Aplicaciones móviles en educación

La incorporación de herramientas computacionales aporta estrategias que coadyuvan en el rendimiento académico de los estudiantes y facilita el quehacer docente. Algunos intentos de incorporación de las TIC al quehacer docente no poseen una fundamentación teórica establecida, las prácticas realizadas se aproximan al desarrollo de un proceso de aprendizaje constructivista, el desarrollo de aprendizajes del tipo auto dirigido, colaborativo, experiencial y autónomo en entornos virtuales [3]. De igual manera, investigaciones sobre el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), permitieron evidenciar en los estudiantes logros en interpretación, resolución de problemas, argumentación, de pensamiento lógico, tecnológico y comunicativo [4]. También, se debe reflexionar sobre el desempeño docente mediado por entornos virtuales y reestructurar el quehacer docente con apoyo de materiales didácticos innovadores, además analizar a profundidad estrategias y prácticas educativas útiles y eficaces para una nueva generación de estudiantes [5]. Las Apps permiten desarrollar en los estudiantes la ubicuidad y la movilidad [6] como principal ventaja. Realmente se están convirtiendo en elementos y herramientas disponibles por los estudiantes y por las profesiones para estar totalmente conectados y para consultar y acceder a la información desde cualquier lugar y para cualquier tipo de sector.

1.2 *Framework* de software libre

Para la construcción de una aplicación web y móvil, se adaptaron los conceptos de la programación orientada a objetos (POO), siendo el modelo de desarrollo más usado en la actualidad y que está inmerso en la mayoría de los lenguajes de programación de última generación, que además facilita la reutilización de código y un mejor esquema de representación de los objetos del mundo real [7]. Para el problema planteado se determina que la arquitectura que mejor responde a las necesidades y requerimientos del sistema es la arquitectura de aplicaciones híbridas [8], la cual se implementa mediante *Ionic* (Figura 1), un *Framework* para construir Apps basado en otro *Framework Javascript*, *AngularJS*.

¹ jeffreycortes@ustadistancia.edu.co

² alexandrasilva@ustadistancia.edu.co

³ marcosandoval@ustadistancia.edu.co

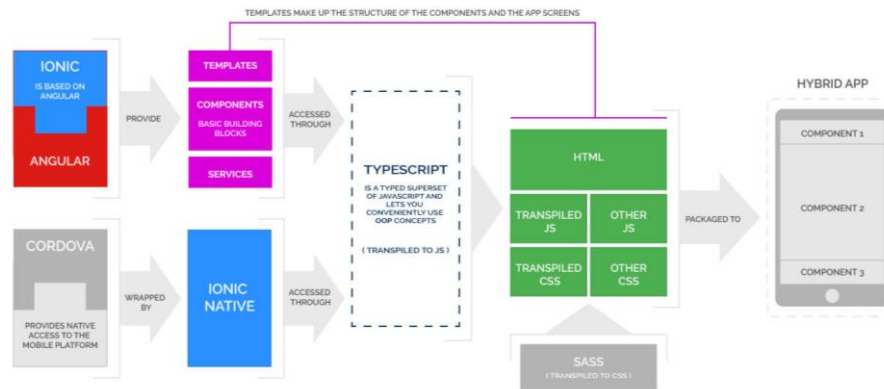


Figura 1. Arquitectura híbrida *framework ionic* [8]

De acuerdo con la arquitectura antes definida, se seleccionaron las tecnologías que se describen a continuación y discriminadas por capas (*back / front*) [8]:

- *Back-End.* Lenguaje de cliente *Typescript*, esta extensión del lenguaje *Javascript* fue creado por *Microsoft* y es hoy en día uno de los lenguajes oficiales de *Angular*, pues permite: el tipado de datos, el uso de interfaces, la detección de errores, entre muchas más mejoras y funcionalidades.
- *Front-End.* *Mobile App Framework Ionic* es un *Software Development Kit - SDK* de código abierto para el desarrollo de aplicaciones móviles híbridas creado por *Max Lynch, Ben Sperry y Adam Bradley de Drifty Co.* en 2013. La versión original se lanzó en 2013 y se construyó sobre *AngularJS y Apache Cordova*. Sin embargo, la última versión se reconstruyó como un conjunto de componentes web, lo que permite al usuario elegir cualquier marco de interfaz de usuario, como *Angular, React o Vue.js*. fundamentadas en tecnologías y prácticas modernas de desarrollo web, utilizando tecnologías web como *CSS, HTML5 y Sass* [9].
- *Framework MVC Angular v6* es un *framework* Modelo, Vista, Controlador – MVC- creado por Google, para el desarrollo de aplicaciones del lado del cliente, especialmente para *web* tipo *SPA y PWA*. Al igual que *Ionic*, este *framework* es una de las tecnologías emergentes más usadas, innovadoras y eficientes al momento de desarrollar aplicaciones seguras, de cualquier tipo, y de gran desempeño, pues a diferencia de las webs tradicionales o aplicaciones híbridas clásicas, los proyectos en angular se compilan y deben respetar ciertas directrices, pues también fue concebido para facilitar: la mantenibilidad, la fiabilidad, la seguridad, entre otros aspectos [10].

1.3 Metodologías de ágiles para el desarrollo de software

El desarrollo de *software* se implementa desde la utilización de una metodología adecuada para su ejecución, en este sentido, se selecciona *SCRUM* como una metodología ágil apropiada para la construcción de aplicación móvil adaptativa a entornos *web* para la gestión del tiempo y el desarrollo. De esta manera *SCRUM* es un marco de trabajo que define un conjunto de prácticas y roles (Tabla 1), y que puede tomarse como punto de partida para definir el proceso de desarrollo que se ejecutará durante un proyecto. Se definen los roles, las interacciones, y las historias de usuario [11].

Tabla 1. Roles de la metodología *SCRUM*

Scrum Master	Procura facilitar la aplicación de <i>Scrum</i> y gestionar cambios
Product Owner	Representa a los <i>stakeholders</i> (interesados externos o internos)
Team	Ejecuta el desarrollo y demás elementos relacionados con él

Los *Sprint Planning* permiten generar el *Product Backlog*, que es un conjunto de requisitos de alto nivel priorizados que definen el trabajo a realizar. Durante esta reunión, el *Product Owner* identifica los elementos del *Product Backlog* que quiere ver completados y los hace del conocimiento del equipo. También se presentan las historias de usuario para la identificación de los requerimientos del negocio.

1.4 Autoeficiencia y autorregulación en la motivación académica

La autorregulación y la motivación académica han abarcado aspectos de la eficacia Hackett [12]. Estos estudios han establecido que la autoeficacia y la autorregulación son correlacionales al rendimiento y desempeño, de esta manera, los estudiantes con alta autoeficacia alcanzaron mejores calificaciones y mostraron mejor desempeño en cursos de Ciencias e Ingeniería, al contrario del caso de estudiantes con inseguridades [13]. Otros autores como Schunk y Zimmerman reportaron que existe relación entre la autoeficacia y la motivación académica; la cual está dada por estudiantes con alta creencia en sus capacidades elegirán tareas complejas a diferencia de sus pares con baja autoeficacia que tenderán a eludir las [13]. Además, la autoeficacia hace que el estudiante se sienta motivado por actividades que son de su agrado, mientras que evita las tareas que no le complacen. También Kohler estudió la

relación entre la autoeficacia académica y el rendimiento académico y el género y concluye que la autoeficacia en ambos, tanto para mujeres como hombres, resultó eficaz el rendimiento académico [13].

La autoeficacia influye en las acciones y el éxito de los individuos dando lugar a fortalecer su personalidad, tener éxito a lo largo de la vida y el rendimiento académico [14]. Los estudiantes con alta autoeficacia académica emplearán más estrategias cognitivas, que les permitan aprender, organizar su tiempo y con la capacidad de regular su propio esfuerzo. El ser auto eficaz académicamente proporcionará más y mejores habilidades cognitivas a los estudiantes. De esta manera, la gestión del tiempo se constituye en una habilidad necesaria para los estudiantes que adelantan metodologías de estudios en Educación abierta, a distancia y virtual. Se parte, desde el supuesto, que los estudiantes trabajan y tienen diferentes actividades, y sobre estas tienen que realizar una distribución del tiempo eficaz y eficiente, para el cumplimiento de sus objetivos académicos, sin necesidad de dejar a un lado sus actividades personales y familiares.

2. MÉTODO

La investigación proyectiva se orienta a la solución a un problema o necesidad de tipo práctico, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades. Para el presente proyecto se identificaron requerimientos funcionales y no funcionales. Los requerimientos no funcionales son los que especifican criterios para evaluar la operación de un servicio de tecnología de información, en contraste con los requerimientos funcionales que especifican los comportamientos específicos. De igual manera, las historias de usuario (detallados en el Product Backlog). Desde la metodología *SCRUM* permitieron identificar los diferentes tipos de requerimientos para la solución presentada. En la Figura 2 se presentan los tipos de requisitos detallados para el desarrollo de la aplicación.

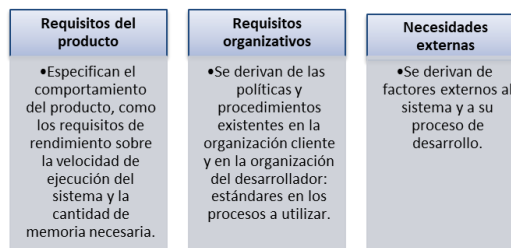


Figura 2. Requisitos funcionales y no funcionales

2.1 Product Backlog

Se requiere diseñar y construir un producto software para toda la comunidad estudiantil de la Universidad Santo Tomás. El producto debe permitir a los estudiantes facilitar la planificación de las actividades de trabajo y/o estudio que requieran para culminar con éxito los trabajos y evaluaciones que deben desarrollar durante el ciclo de cada programa. Se propone desarrollar una aplicación móvil que facilite la administración de actividades para reemplazar la planeación y programación manual de estas, y que a su vez sirva como herramienta de notificaciones automatizadas para generar constante recordación de las actividades programadas por los estudiantes. Adicional, la aplicación debe permitir el registro de una matriz DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) que ayude al estudiante a identificar acciones o cambios en su manejo del tiempo, y que deberán ser consecuentes con la planificación de las actividades para la superación del programa académico.

Por otro lado, se requiere que sea móvil dado que no habrá conectividad con aplicativos o servicios externos, no se almacenará información en la nube, ni se necesita un registro en bases de datos distintas al del propio dispositivo. Se pueden considerar otras características que estime conveniente investigar para desarrollar la propuesta más adecuada para diseñar y adaptar el software a la metodología de educación a distancia. Desde la metodología *SCRUM*, se adelantaron cada uno de los ciclos, desde la etapa inicial de la recolección de la información, la gestión del *backlog* con los insumos obtenidos de las necesidades del cliente, inmediatamente se genera la planificación y la ejecución de cada *sprint* hasta la obtención del producto final, en la Figura 3, se presenta el procedimiento adelantado para la implementación de la aplicación.

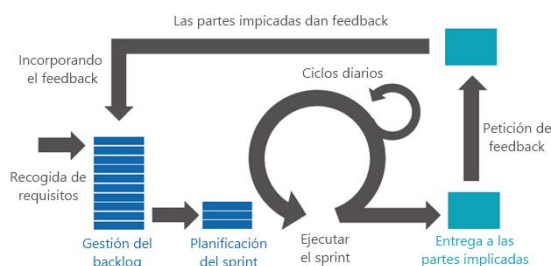


Figura 3. Metodología *SCRUM* en proyectos digitales [15]

2.2 Requerimientos del software

Analizando el problema planteado, se identificaron en primera instancia los siguientes requerimientos:

- Permitir la programación y edición de actividades de los estudiantes a través de un formulario de fácil interacción en donde se especifique: la asignatura, el tipo de actividad, las fechas en que se realizará la actividad y duración de todo el día en caso de ser el caso.
- Permitir la visualización de todas las actividades registradas en un calendario y que este permita la visualización por mes, por semana y por día.
- Facilitar la generación de notificaciones *push* de las actividades programadas por los estudiantes, las cuales deberán generarse dos semanas antes del inicio de la actividad, una semana antes del inicio de la actividad, y el mismo día de inicio de la actividad.
- Permitir el registro de la matriz DOFA del estudiante, respecto a sus competencias y tiempo libre que destinara para la realización del programa académico.
- De los anteriores requerimientos se puede identificar la necesidad de por lo menos dos módulos los cuales se verán con más detalle en los próximos puntos, junto con la clasificación y detalle de los requerimientos.

2.2.1 Requerimientos funcionales

La aplicación móvil adaptativa a entornos *web*, para su implementación gestiona los siguientes módulos:

- *Módulo de gestión y registro de actividades*: el sistema debe contar con un módulo de registro y control de actividades que integre las siguientes secciones:
 - Calendario: Widget gráfico para la visualización de las fechas.
 - Listado de actividades: En esta sección se podrán visualizar las actividades asociadas o registradas a la fecha y/u hora seleccionada en el calendario.
- *Módulo de registro y consulta de matriz DOFA*: Este módulo debe permitir el registro y/o consulta de la matriz DOFA de los estudiantes, de una forma en la que se pueda diferenciar cada grupo de lista (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) y cuya visualización pueda personalizarse en cuanto a la forma en que se muestra el listado de la matriz.

2.2.2 Requerimientos no funcionales

El sistema debe establecer las siguientes restricciones de acuerdo con el establecimiento de los requerimientos:

Rendimiento

- La interfaz gráfica debe garantizar la fácil navegabilidad, captura y visualización de datos.
- Se pide alta velocidad de procesamiento de datos con un tiempo máximo de 20 segundos como tiempo de espera de cada transacción.

Confiabilidad

- Las tecnologías empleadas deben ser robustas, modernas, y con alta tendencia de uso en la actualidad para facilitar temas de soporte.
- El motor de base de datos debe ser relacional para asegurar la integralidad de estos.
- El sistema debe garantizar la correcta codificación de los textos para evitar errores de visualización (ejemplo: tildes).

Disponibilidad

- El sistema debe estar disponible en una ventana de tiempo de 7 * 24.
- El sistema debe ser compatible con dispositivos móviles y de escritorio.

Seguridad

- El sistema debe estar protegido contra las prácticas más comunes de SQL inyection y cross-site scripting (xss).
- La contraseña de acceso debe ser cifrada bajo el estándar SHA2 tanto para envío como para respuesta de una petición, y así mismo para almacenamiento en la base de datos.
- El sistema debe restringir el acceso a los módulos y la visualización de los menús respectivos, en función del rol del usuario autenticado.

Mantenibilidad

- El código fuente del sistema debe estar escrito bajo los principios SOLID, para así facilitar el aprendizaje, entendimiento y mantenimiento del sistema y sus componentes.
- El sistema debe estar estructurado en capas que separen correctamente el contexto de las interacciones y responsabilidades de la secuencia de los datos tanto internos como externos.
- Toda excepción debe ser capturada, registrada en la base de datos, y notificada al equipo de desarrollo cuando sea no controlada.

2.2.3 Definición de usuarios (Roles)

Se identifica el rol de estudiante, el cual contempla las siguientes funciones y privilegios (Tabla 2).

Tabla 2. Funciones y privilegios del rol estudiante

Nombre de Rol	Funciones	Privilegios
Estudiante	Todas las funciones del sistema	Lectura, Escritura, Eliminar

En la Figura 4 se presenta la especificación del caso de uso para el rol del estudiante, donde se detallan las actividades para cada uno de los módulos.

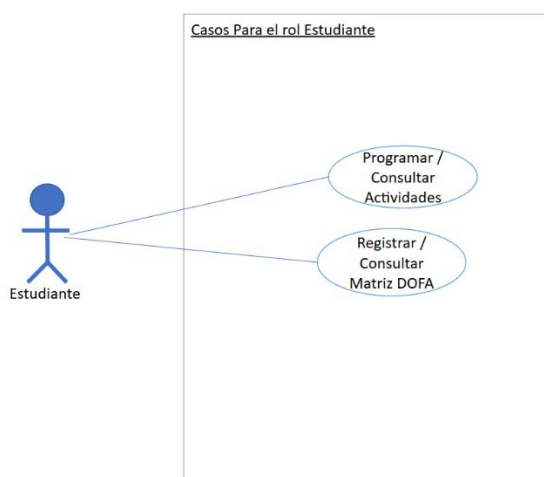


Figura 4. Caso de uso rol de estudiante

2.2.4 Diseño de la aplicación

Como se definió en el diseño el modelo de la aplicación *web (front-end)* es el modelo vista controlador- MVC, toda petición es gestionada por el controlador y este a su vez es el que se encarga de actualizar el modelo de datos y la vista, permitiendo una separación de la lógica del negocio, el comportamiento y la interfaz gráfica. Por lo tanto, para el proyecto de *front* se definen las capas:

- **Modelo:** representado en la aplicación por las entidades y clases de tipo *Typescript (ts)*, cuya estructura sea el modelo de datos de una tabla de origen y/o destino, así como lógica de negocio.
- **Vista:** integrada por la interfaz gráfica con la que interactúa el usuario, y tendrá el objetivo de capturar y/o exponer los datos enviados o recibidos del controlador.
- **Controlador:** encargado de intermediar la comunicación entre la vista y el modelo, y en esta capa debe ser incluida la lógica de negocio, así como la verificación de los datos para garantizar la calidad de estos cuando pasen al modelo de negocio del *back-end*.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez, identificados los requerimientos de la aplicación y las necesidades del estudiante, para gestionar su tiempo, y las actividades planteadas para un semestre académico se presenta la Figura 5. Como se puede evidenciar, el estudiante debe iniciar estableciendo su plan de trabajo, el cual se divide en la *gestión y registro de actividades*, al igual que la gestión de su tiempo en cuanto a las actividades académicas y personales en el módulo de registro y consulta en la matriz DOFA. Sobre la gestión y registro de actividades, el estudiante debe registrar en un semestre académico diversas actividades, entre estas se tienen: las evaluaciones, las tutorías presenciales, las videoconferencias. De igual manera, se pueden registrar las actividades de tipo grupal o la planeación de estudio individual. La planeación de estas actividades por parte del estudiante desarrolla habilidades de autorregulación y autogestión. Otra de las

ventajas de la aplicación es que permite regular el tiempo de las actividades personales, mediante la organización en la matriz DOFA. Esta orientación la recibe el estudiante en el módulo de metodología de la Educación a Distancia.

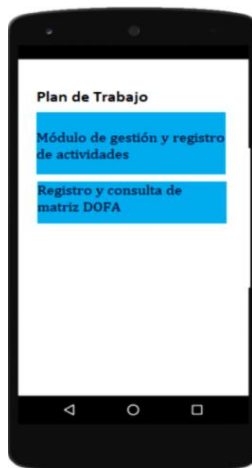


Figura 5. Interfaz plan de trabajo del estudiante

En la Figura 6, se puede evidenciar el tipo de actividades que el estudiante puede gestionar en su plan de trabajo.

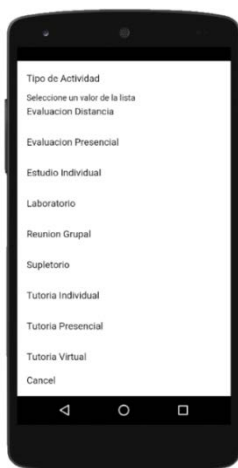


Figura 6. Actividades para la planificación en el plan de trabajo

El estudiante adelanta un proceso de registro de actividades, donde debe seleccionar en el calendario, las fechas y los tiempos de todas las actividades inter semestrales. A continuación, se presentan las opciones para el registro del evento, tanto en el calendario, como de manera individual (Figura 7).

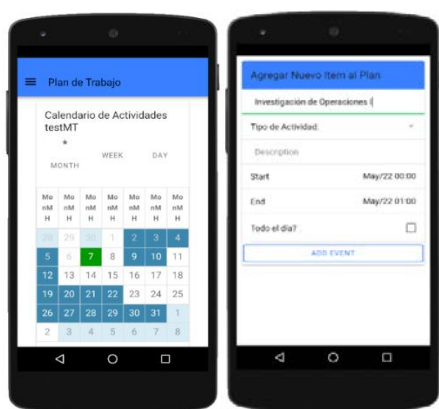


Figura 7. Registro de actividades en el plan de trabajo

Se debe confirmar la creación de cada una de las actividades programadas para el plan de trabajo (Figura 8). Por otra parte, con los docentes se trabajó en la sensibilización hacia los estudiantes para utilizar de forma correcta la aplicación, dándole un uso didáctico, por lo anterior se propone: formación del profesorado, desaprender hábitos relacionados con el móvil, innovar no consiste en usar el teléfono móvil, tenemos que tener claro que usar el teléfono con prácticas tradicionales no es innovar, es seguir haciendo lo mismo con otros medios, pero no con otras técnicas.



Figura 8. Confirmación del registro de las actividades del plan de trabajo

Finalmente, el estudiante una vez generado su plan de trabajo, puede gestionar las alertas que le van a recordar las fechas de entrega de las actividades, emitiendo recordatorios, de acuerdo con la configuración establecida por el estudiante. La anterior técnica de gestionar recordatorios por medio de la aplicación, permite al estudiante ser eficaz en el manejo del tiempo. Así, un sistema de alertas permitirá mantener al estudiante en alerta. Cabe aclarar que la aplicación permite navegarse vía web, lo diferenciador de la herramienta se encuentra en el módulo de gestión de actividades No académicas por medio de la matriz DOFA, la cual entregará al estudiante un resultado de gestión del tiempo y lo que él puede dedicar a las actividades personales y familiares y de esta manera distribuir conjuntamente con las actividades académicas, en la Figura 9 se presenta el sistema de alertas y recordatorios al estudiante.

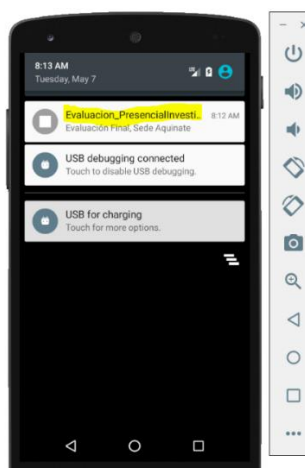


Figura 9. Alertas y recordatorios del plan de actividades

En la segunda parte de la aplicación, en el módulo de Registro y consulta DOFA, el estudiante debe identificar y registrar sus debilidades y fortalezas, así como las amenazas y oportunidades, para metodologías de programas en modalidad abierta, distancia y virtual (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz DOFA

Análisis o factores internos (Personales)	
Debilidades	Fortalezas
Análisis o factores externos (sociales y entorno)	
Amenazas	Oportunidades

De igual manera, se debe registrar la dedicación del tiempo que el estudiante dedica a otro tipo de actividades no académicas, entre estos: familia, descanso, pasatiempos. Al finalizar el registro, se debe totalizar las horas que se van a dedicar a estas actividades. Frente a esta propuesta, el estudiante empieza a generar conciencia sobre el cambio de hábitos que debe tener para llegar a cumplir sus metas (Tabla 4).

Tabla 4. Cronograma de trabajo para la organización del tiempo

Organización de mi tiempo para alcanzar las metas propuestas al iniciar mis estudios en la modalidad a distancia			
Actividades diarias en mi vida	Horas de dedicación antes de iniciar mis estudios	Horas de dedicación ahora que inicié mis estudios	¿Cómo organizaré mi tiempo en esta nueva etapa de vida para alcanzar las metas propuestas al iniciar mis estudios en la Modalidad a Distancia?
Familia			
Entretenimiento			
Amigos (vida social)			
Descanso (dormir)			
Trabajo			
Desplazamiento			
Estudio, Investigación, etc.			
Desarrollo de las Evaluaciones			
Total			

Por otra parte, para validar la aplicación móvil como un producto de *software* se utilizó el instrumento para evaluación de *software* educativo multimedia, donde se evaluaron diferentes aspectos del software, entre estos: técnicos y pedagógicos [16]. Desde los aspectos pedagógicos se contemplaron las estrategias didácticas, el tipo de actividades, la evaluación y el nivel de actualización de contenidos, en los aspectos técnicos, se destacaron la presentación y originalidad de uso de tecnología avanzada. Se presentan los resultados de la aplicación de la rúbrica donde se evalúan, específicamente los aspectos pedagógicos. En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del instrumento. La validación se realizó por parte de cinco (5) profesionales en el área de desarrollo de *software* y áreas relacionadas a educación y TIC. Los resultados reflejaron la articulación y el soporte desde la tecnología a los procesos de enseñanza y aprendizaje. Se destaca cómo se valora el aspecto de motivación que la herramienta puede despertar hacia el usuario y de igual manera la facilidad de adaptación al usuario, por ser una tecnología de tipo móvil. No obstante, se denotan algunos aspectos por mejorar como las formas de evaluación.

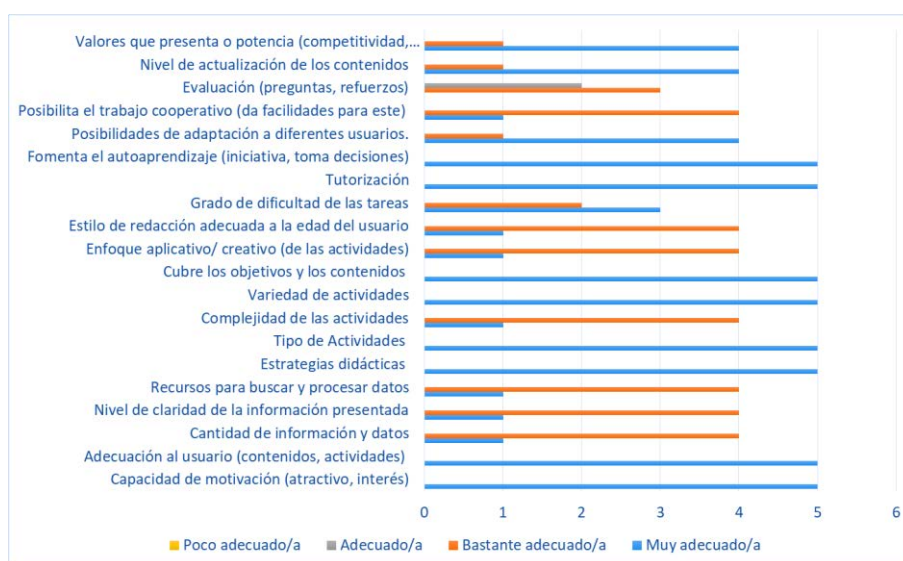


Figura 10. Resultados de la aplicación de la validación del *software* educativo

En general, los resultados de la aplicación del instrumento dieron pistas para mejorar la herramienta y consolidar un trabajo articulado de las tecnologías y las habilidades de los estudiantes en el manejo del tiempo, la auto eficiencia y autoeficacia, de esta manera se está pasando desde un paradigma tradicional y se entra en el paradigma de la acción [17]. Es importante, que los estudiantes sean artífices de la construcción de su propio conocimiento en un ambiente de novedad que redunde en aprendizaje significativo [18].

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de programas académicos bajo la modalidad a distancia requiere una alta participación y compromiso del estudiante, para que existan un progreso constante, buen aprendizaje y asimilación del conocimiento. Es por esto, que la aplicación propuesta incorpora aspectos desde la metodología de educación a distancia, donde se reflexiona y presenta al estudiante las habilidades y competencias que debe desarrollar. Así la propuesta se articula no solo desde los lineamientos curriculares, también da respuesta a las funciones sustantivas, articulando un componente cognoscitivo, donde se articula la producción de saber y las tecnologías [19]. Por otra parte, desde el contexto de la Ingeniería, se incorporaron las aplicaciones híbridas como herramienta de apoyo en la construcción del software. Adicional, se trabajaron *framework* de desarrollo de software donde se evidenciarán los conceptos y aplicaciones de

la programación orientada a objetos (POO), entre estos: *Ionic* y *Angular*. Así mismo, la aplicación puede ser ejecutada por los estudiantes desde entornos web adaptativo y móvil.

Se generó un producto de software como herramienta de apoyo para el proceso de formación y aprendizaje de la metodología de educación a distancia, permitiendo el desarrollo de habilidades de eficacia en el estudiante, mediante la Autoeficiencia y autorregulación en la gestión del tiempo. La herramienta se orienta desde dos módulos: el registro del plan de trabajo y la gestión de la matriz DOFA, esta última actividad permite que el estudiante desarrolle primero un análisis desde sus debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades frente a las metodologías de educación abierta, distancia y virtual. Adicionalmente, el estudiante puede planificar sus actividades no académicas, asignado tiempos y permitiendo dimensionar el valor del tiempo y la gestión.

Finalmente, se puede concluir que el desarrollo de *software* ha revolucionado el estilo de vida de la humanidad, siendo cada vez más creciente la tendencia hacia el aprendizaje y la interactividad con la tecnología y los diferentes dispositivos móviles de última generación, y la influencia en el sector educativo. En este sentido, con este tipo de propuestas se puede contribuir con uno de los grandes desafíos del sistema educativo, el cual consiste en promover en los alumnos un conjunto de competencias de autorregulación necesarias para aprender de forma autónoma y permanente a lo largo de las diferentes etapas de la vida [16]. En este sentido, la aplicación móvil adaptativa a entornos *web* para la gestión del tiempo y el desarrollo de la autoeficacia [20] en estudiantes de programas en educación distancia y virtual, mejorando su rendimiento [21], se constituye en una estrategia apoyada desde la tecnología para la innovación en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

REFERENCIAS

- [1] Universidad del Valle, «Autoformación y Virtualidad,» 2005. [En línea]. Available: <https://revistaeducacionvirtual.com/wp-content/uploads/2016/07/autoformacionyvirt-1.pdf>. [Último acceso: 14 03 2019].
- [2] K. Contreras, C. Caballero y A. Pérez, «Factores asociados al fracaso académico,» *Psicología desde el Caribe*, pp. 1,26, 2008.
- [3] Atencia y F. García, «Incorporación de las tic en las metodologías de los docentes de especialización en docencia de CECAR,» *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, vol. 5, n° 1, pp. 22-38, 2013.
- [4] M. Vergel, J. Martínez y S. Zafra, «Apps en el rendimiento académico y autoconcepto de estudiantes de ingeniería,» *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, vol. 6, n° 2, pp. 198-208, 2015.
- [5] G. F. A. Bautista, *Didáctica Universitaria en Entornos Virtuales*, Narcea: Madrid, 2016.
- [6] A. Barragán y A. Barragán, «Aplicaciones Móviles para el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje en Enfermería,» *Salud y Administración*, vol. 1, n° 3, pp. 51-57, 2014.
- [7] R. Gómez, A. Galvis y O. Grews, «Ingeniería de software educativo con modelaje orientado por objetos: un medio para desarrollar micromundos interactivos,» *Informática Educativa*, vol. 11, n° 1, pp. 9-30, 1998.
- [8] «IONIC,» 2019. [En línea]. Available: <https://ionicframework.com/>. [Último acceso: 2019 05 05].
- [9] My solutions. Digital Factory, 2019. [En línea]. Available: <https://mysolutions.cl/que-es-ionic/>. [Último acceso: 04 05 2019].
- [10] Campus MVP, «las-5-principales-ventajas-de-usar-angular-para-crear-aplicaciones-web,» [En línea]. Available: <https://www.campusmvp.es/recursos/post/las-5-principales-ventajas-de-usar-angular-para-crear-aplicaciones-web.aspx>. [Último acceso: 03 05 2019].
- [11] A. Duarte y M. Rojas, «Las Metodologías de Desarrollo Ágil como una Oportunidad para la Ingeniería del Software Educativo,» *Revista Avances en Sistemas e Informática*, vol. 5, n° 2, pp. 160-172, 2008.
- [12] G. Hackett, «Self-efficacy in career choice and development,» *Self-efficacy in changing societies*, pp. 232-259, 1995.
- [13] A. Alegre, «Autoeficacia académica, autorregulación del aprendizaje y rendimiento académico en estudiantes universitarios iniciales,» *Própositos y Representaciones*, vol. 2, n° 1, pp. 79-120, 2014.
- [14] L. S. & E. T. Zajacova, «Self-efficacy, stress, and academic success in college,» *Research in Higher Education*, vol. 6, n° 46, pp. 677-706, 2005.
- [15] Proyectos Ágiles, «Scrum, la manera ágil de trabajar,» [En línea]. Available: <https://proyectosagiles.org/>. [Último acceso: 14 03 19].
- [16] A. Cova, X. Arrieta y J. A. Durán, «Revisión de modelos para evaluación de software educativos,» *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, vol. 7, n° 1, pp. 93-114, 2008.
- [17] Silva, J. Mendoza y A. Girado, «Prevención del consumo de sustancias psicoactivas. Un aporte desde la neurociencia y el aprendizaje basado en proyectos ABP,» *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 78, n° 1, pp. 107 - 126, 2018.
- [18] Silva y L. Montañez, «Aprendizaje psicomotriz en el área de Educación Física, Recreación y Deportes mediado por el uso de software educativo,» *Retos*, pp. 302-309, 2019.
- [19] W. Lima, M. Cabra y D. Tascón, «Medición del Impacto de Responsabilidad Social Universitaria. Caso Universidad Santo Tomás Colombia,» *Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, vol. 34, n° 18, pp. 935-963, 2018.
- [20] D. Schunk y B. Zimmerman, *Self-regulation of learning and performance: issues and educational applications*, Erlbaum: Mahwah, 1995.
- [21] J. Kohler, «Rendimiento académico asociado a la autoeficacia de estudiantes de 4to. y 5to año de secundaria de un colegio nacional de Lima,» *Cultura*, vol. 23, pp. 101-119, 2009.

Aplicación móvil con Realidad Aumentada para practicar las *preposiciones de lugar* en inglés: Estudio de usabilidad y aceptación

Brenda L. Cano V.¹

Jaime E. Hernández R.²

Jorge Bacca³

Fundación Universitaria Konrad Lorenz – Colombia

El aprendizaje del inglés es un tema fundamental hoy en día, debido a que es un idioma universal y en diversos aspectos es muy utilizado en el ámbito laboral, académico o para ir de turismo. En el contexto del aprendizaje del inglés el tema de las preposiciones de lugar es uno de los temas que se enseña en los primeros niveles de inglés y es también uno de los temas que, de acuerdo con algunos profesores entrevistados, genera mucha confusión en el estudiante. En este tema los estudiantes deben aprender el significado y uso de expresiones como “on”, “over”, “behind”, “under”, “in front of”, entre otras. Ante esta situación y para ayudar a los estudiantes a practicar este tema en las aulas de clase, se desarrolló una aplicación móvil con realidad aumentada centrada en el tema de las preposiciones de lugar en inglés para estudiantes de los primeros niveles de inglés. En este capítulo, se presentan los detalles del desarrollo de la aplicación y se reportan los resultados de un estudio de usabilidad y aceptación de la aplicación que fue llevado a cabo con 46 estudiantes de pregrado de tres cursos de inglés de la Fundación Universitaria Konrad Lorenz durante el semestre 2019-1. Los resultados muestran una percepción positiva con valores notables en las dimensiones de utilidad y estética percibida a partir de la experiencia de usuario con la aplicación lo que abre posibilidades para el uso de este tipo de aplicaciones para la enseñanza de otras temáticas en inglés.

1. INTRODUCCIÓN

La dificultad de los estudiantes en el aprendizaje del inglés es un problema muy común que se está presentando en las instituciones de educación superior. Según un estudio realizado por el ICFES [1] con base en los resultados de las pruebas Saber Pro, los niveles de inglés en las instituciones de educación superior son demasiado bajos. El estudio reporta que el 19% de los estudiantes tienen un nivel de inglés menor a –A1 seguido por un 30% con un inglés de A1 un 25% de A2 el 18% con un inglés B1 y tan solo el 7% con un nivel igual o superior a B+ (Figura 1). Esto demuestra que cerca de la mitad de los estudiantes que están muy próximos a salir de la universidad tienen niveles de inglés –A1 y A1 lo que es muy preocupante debido a la importancia del inglés actualmente. En algunos países, el nivel de inglés es un indicador que se tiene en cuenta para evaluar el nivel de educación en las instituciones. De acuerdo con un informe del British Council [2], los niveles de inglés en niños de primera infancia son muy bajos.

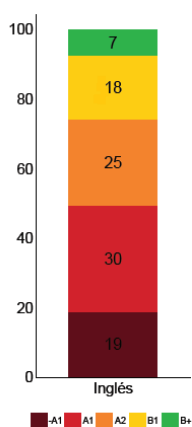


Figura 1. Estadísticas de los niveles de inglés de acuerdo con los resultados de las pruebas Saber pro [1]

Este problema puede tener consecuencias económicas y sociales en los estudiantes debido a que en la sociedad el inglés es reconocido como un lenguaje universal y la comunicación entre las personas en esta lengua es esencial en el ámbito académico y profesional. Muchos estudiantes muestran dificultad en el aprendizaje de este idioma debido a que la manera de enseñanza de este es poco dinámica y por lo tanto los estudiantes no están dispuestos a tener la atención necesaria para aprenderlo; económicamente uno de los problemas más representativos en este ámbito es que reduce mucho las oportunidades con los estudiantes tanto en el ámbito educativo como en el ámbito laboral y también si los estudiantes desean viajar sobre todo a países de habla inglesa [3]. Muchas personas no pueden tener acceso a cursos de inglés puesto que los países asignan un presupuesto para que los estudiantes en las escuelas puedan ver inglés como una materia, pero esto a veces no es posible en todas las escuelas. Existen factores, económicos, políticos, geográficos y culturales que moldean cada país y que a veces hacen difícil la implementación de programas para la enseñanza del inglés.

¹ brendal.canov@konradlorenz.edu.co

² jaim.e.hernandezr@konradlorenz.edu.co

³ jorge.bacca@konradlorenz.edu.co

Debido a que en Latinoamérica el inglés no es obligatorio como segunda lengua, es muy difícil adaptar esta lengua en la sociedad ya que no es natal y en algunos casos no hay una conciencia de la importancia del inglés. Adicionalmente, el inglés no se utiliza en el contexto cotidiano al que están acostumbradas las personas de Latinoamérica por lo que también dificulta la interacción con esta lengua [3]. Según Torrence el aprendizaje es más dinámico cuando se utiliza la realidad aumentada o la realidad virtual en las aulas de clase teniendo un enfoque multimodal, en donde la educación se imparte en varias plataformas para aumentar más el aprendizaje de este idioma, por ejemplo a varios de los estudiantes se les aplicó una prueba con el contenido de la aplicación WITHIN, el cual proporcionó una experiencia más agradable para el estudiante ya que la prueba consistía en mostrar un video de U2 llamado “Canción para alguien”. Este tipo de actividades genera más interés en los estudiantes debido al uso de diferentes plataformas para la enseñanza de este idioma [4].

Uno de los países en el que se encuentra más dificultad en el aprendizaje en el inglés es Colombia. El British Council [2] realizó un estudio en el cual se reflejan percepciones positivas sobre el inglés. Por medio de una encuesta aplicada a 1000 colombianos se concluyó que el 47% de los encuestados manifiesta que el hecho de tener conocimiento en el inglés aumenta las oportunidades laborales y el otro 48% considera que este idioma está asociado con una mejor educación por lo tanto esto genera ingresos más altos. Sin embargo, la mayor cantidad de personas de la población colombiana no tienen contacto con el inglés en su vida diaria debido a diferentes factores contextuales y que gracias a la extrema diversidad de las regiones en Colombia la relación con el inglés es diferente en cada lugar [3].

Por otro lado los exámenes IELTS(International English Language Testing System) y TOEFL(Test of English as a Foreign Language) se usan comúnmente para evaluar el nivel de inglés de una persona y estos exámenes son tomados por muchos países para calificar el nivel del inglés. En estos exámenes, Colombia presenta los puntajes más bajos en todo Latinoamérica [5]. En un informe del British Council [5] se puede notar la comparación entre los puntajes de diferentes países de Latinoamérica para los exámenes IELTS y TOEFL. La Tabla 1 presenta los puntajes de los exámenes IELTS y TOEFL de algunos países latinoamericanos.

Tabla 1. Puntuaciones para los exámenes IELTS y TOEFL en algunos países de América Latina

	Argentina	Brazil	Chile	Colombia	Ecuador	México	Perú
IELTS	7.0, 6.6	6.3, 6.5	6.6, 6.1	6.3, 5.8	6.5, 6.1	6.4, 6.1	6.5, 6.2
TOEFL	93	83	85	81	80	86	87

Como se puede observar en la Tabla 1, Colombia tiene prácticamente los puntajes más bajos en el examen de IELTS y en el examen de TOEFL es necesario tomar medidas para controlar el descenso que está teniendo el país en los niveles de inglés. En este sentido, para identificar uno de los temas en el que los estudiantes tienen dificultades durante los cursos de inglés, se realizó una reunión con la Directora de Instituto de Lenguas de la universidad donde se llevó a cabo este estudio (Fundación Universitaria Konrad Lorenz), posteriormente también se realizaron algunas entrevistas a diferentes profesores de inglés de la misma universidad que dictan en grupos de inglés en el nivel intermedio-bajo. Como resultado de estas entrevistas se concluyó que uno de los temas que genera dificultades en los primeros niveles de inglés es el tema de las preposiciones de lugar. Para conocer las percepciones de los profesores de inglés se realizó una entrevista con las siguientes preguntas:

1. ¿Qué dificultades observa en los estudiantes a la hora de aprender el tema de las preposiciones de lugar?
2. ¿Qué metodologías o estrategias emplea para fomentar el aprendizaje del tema de preposiciones de lugar?
3. ¿Ha utilizado alguna aplicación móvil para la enseñanza de las preposiciones en inglés?
4. ¿Por qué considera importante que los estudiantes aprendan una lengua extranjera como el inglés?
5. ¿Utilizaría nuestra aplicación para la enseñanza del inglés?

A partir de estas preguntas, a continuación se resumen las respuestas dadas por los profesores.

1. Los estudiantes suelen confundir mucho el tema de preposiciones de lugar, debido a que comúnmente traducen la instrucción ya que muchas de estas instrucciones no se traducen en su sentido literal, otro error común es que suelen confundir la preposición del “in” o el “on” con las preposiciones de tiempo y esto ocasiona que los estudiantes cometan muchos errores al utilizar las preposiciones.
2. Comúnmente los profesores para explicar este tema lo hacen por medio de videos o imágenes, haciendo la clase de una forma más didáctica en el sentido de hacerla mucho más visual para llamar la atención de los estudiantes, también hacen que los estudiantes se ubiquen en algún sector del salón con objetos y sigan las instrucciones del profesor.
3. La mayoría de los profesores han usado aplicaciones web para enseñar los diferentes temas del inglés, algunas de las plataformas que más utilizan son Duolingo y FaceToFace. Con respecto a aplicaciones móviles para la enseñanza del inglés los profesores manifestaron que no conocen muchas de ellas.

4. Los profesores consideran importante el aprendizaje de un segundo idioma ya que abre muchas puertas a los estudiantes tanto a nivel cognitivo como a nivel comunicativo, debido a que aprender un segundo idioma es algo primordial hoy en día. El inglés es probablemente la segunda lengua más hablada en el mundo casi llegando a ser una lengua universal, también cambia el modo de ver las cosas en diferentes ámbitos y como se interactúa, otro factor importante es que algunas materias que los estudiantes ven son en inglés esto es algo que se presenta mucho en el contexto universitario por lo que este idioma ahora es fundamental.
5. Todos los profesores entrevistados estuvieron de acuerdo en que sí estarían dispuestos en utilizar una aplicación móvil basada en realidad aumentada, como metodología de enseñanza del inglés para el tema de las preposiciones de lugar en sus clases, gracias a que aporta mucho visualmente y despierta el interés de los estudiantes teniendo interactividad entre la aplicación y los usuarios.

A partir de las entrevistas se seleccionó el tema de las preposiciones en inglés como un tema en el cual se podría desarrollar una herramienta para facilitar su aprendizaje utilizando una tecnología innovadora como la realidad aumentada. Esta tecnología se seleccionó debido a que numerosas investigaciones alrededor del mundo han demostrado que esta tecnología favorece la motivación de los estudiantes y sus resultados de aprendizaje [6, 7]. Por otro lado, a partir de una revisión de la literatura acerca del uso de la realidad aumentada en la enseñanza del inglés se identificó que, al parecer no existe una herramienta con la tecnología de realidad aumentada para la enseñanza de las preposiciones en inglés. En este sentido, en este trabajo se presenta la aplicación denominada "AR Preposiciones" para apoyar el proceso de aprendizaje de las preposiciones de lugar en inglés. El tema en el cual se orientó esta investigación es muy específico (preposiciones de lugar) debido a que se trata de crear una herramienta muy concreta que pueda ser probada y evaluada en un ambiente educativo real (como se presenta aquí) y así determinar algunas potencialidades de esta tecnología para ser usada a futuro para la enseñanza de otros temas en inglés.

Adicionalmente, en este trabajo se presentan los resultados de una evaluación de usabilidad y aceptación de la aplicación desarrollada como respuesta a la siguiente pregunta de investigación que guió dicho estudio: ¿Cuál es la aceptación y usabilidad de la aplicación AR Preposiciones cuando se utiliza para practicar el tema de preposiciones de lugar en los cursos iniciales de inglés? El resto del capítulo se encuentra organizado de la siguiente forma: La sección 2 introduce los trabajos relacionados con la investigación que se presenta en este trabajo y los antecedentes teóricos. La sección 3 describe la aplicación móvil de realidad aumentada que fue desarrollada por los autores y la sección 4 describe el estudio de evaluación de usabilidad y accesibilidad de la aplicación. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones de este estudio y la sección 6 explica las limitaciones de esta investigación.

2. TRABAJOS RELACIONADOS Y ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada (RA) es una tecnología que permite que la información de imágenes virtuales se superpongan en un entorno del mundo real en tiempo real. Los sistemas RA funcionan con o sin marcadores, las aplicaciones basadas en marcadores están compuestas por tres componentes básicos que incluyen un folleto para ofrecer información del marcador y las aplicaciones sin marcadores necesitan un sistema de seguimiento que involucre Global Positioning System (GPS) [8] o identificación del objeto con técnicas de visión artificial. Se define RA como un sistema que tiene las siguientes características:

- Combina información real y virtual.
- Interactivo en tiempo real.
- Registro en 3D

Esta tecnología mejora la percepción e interacción del usuario con el mundo real [9]. Complementando la realidad con objetos virtuales superpuestos permitiendo combinar lo real y lo virtual mediante tablets o Smartphones, logrando ampliar imágenes de la realidad a partir de la captura de la cámara, ofreciendo varias posibilidades educativas para el aprendizaje y la enseñanza dando así una mayor profundidad de comprensión en los temas que se vayan a enseñar, aplicándose en diversos contextos donde muchos de los colegios y universidades ya la están implementando para innovar proyectos, la forma de enseñanza y de aprendizaje.

Estudios realizados en la Universidad de Manchester concluyen que es fundamental para esta tecnología el uso de dispositivos móviles debido a que son accesibles a casi toda la población, es portátil y puede ser utilizada en las ocasiones que se desee, por lo tanto, es muy viable aplicar RA en la educación [10]. De acuerdo con [11] su uso sirve de manera interactiva para el aprendizaje del estudiante y este se divide en 3 etapas primordiales que ayudan a identificar como se puede aplicar mejor el uso de esta tecnología en el aprendizaje, estas etapas son:

1. *Presentación*: Esta consiste en mostrar el tema que se va a presentar en el cual se debe mostrar la información que se va a enseñar de una forma dinámica, comúnmente se recomienda que sea por medio de preguntas para que el estudiante tenga aún más interactividad con la tecnología (RA).

2. *Respuesta*: Este ítem consiste en mostrar al estudiante diferentes opciones o formas de responder a una pregunta según los conocimientos previos que se le explicaron en la presentación del tema.
3. *Retroalimentación*: En este último ítem se debe hacer una retroalimentación al estudiante en el cual se le dice si su respuesta fue correcta o incorrecta y el por qué, para que así la información sea clara y concisa

Una de las mayores ventajas de la aplicación de este tipo de tecnologías es que proporcionan una retroalimentación inmediata, respecto a un tema que se quiera enseñar, lo cual hace que el estudiante ya conozca los resultados respecto a lo que respondió y gracias a esto si la respuesta es correcta el estudiante lo identificará fácilmente y también hará que cumpla el papel de receptor de una forma sencilla, recibiendo la información y en caso de que la respuesta haya sido incorrecta, puede encontrar fácilmente la retroalimentación y corregirla.

La Realidad Aumentada se ha aplicado en una amplia variedad de campos. Por ejemplo, se ha utilizado para mejorar las habilidades de un conductor novato, mejorar la percepción y la reacción a los peligros de la carretera y evitar colisiones haciendo uso de estos teléfonos inteligentes [12]. Por otro lado, Hsiao y Nian-Shing [13] desarrollaron el sistema AR-Fitness que proporciona ejercicios de acondicionamiento físico en el campo de la educación física. Otro campo en el que hay un creciente cuerpo de investigación es el aprendizaje de idiomas. La historia de RA se remonta a la década de 1960 y el primer sistema se utilizó para AR y VR y este término "realidad aumentada" se atribuye al antiguo investigador de Boeing Tom Caudell, quien se cree que acuñó el término en 1990. La Realidad Aumentada (AR) es una tecnología que permite que la información de imágenes virtuales que se superponen en un entorno del mundo real en tiempo real [8].

2.2 Realidad Aumentada en la enseñanza del inglés

Se han desarrollado varias aplicaciones en tecnologías inmersivas como AR para el aprendizaje de idiomas en la educación, cuyas simulaciones hacen que el aprendizaje sea más experiencial y el lenguaje sea más real. Aguirregoitia, Lopez, Artetxe y Bilbao [3] presentan una experiencia AR para facilitar la adquisición de vocabulario y mejorar la comprensión del inglés. Los investigadores encontraron efectos positivos en los resultados de aprendizaje y la motivación de los estudiantes. En la misma línea, Zhenming, Mayu, Mamoru y Tatami [14] desarrollaron un sistema AR utilizando un cubo de marcadores para aprender palabras en inglés. Además, Safar, Al-Jafar y Al-Yousefi [15] realizaron un estudio para evaluar el efecto de la integración de las aplicaciones de AR para el aprendizaje del alfabeto inglés para niños de kindergarten. Los autores encontraron que los estudiantes que usaron la aplicación AR obtuvieron mejores resultados de aprendizaje y los autores comentan la importancia de introducir aplicaciones AR para el aprendizaje en ese nivel educativo. Liu [16] desarrolló una aplicación móvil de AR llamada HELLO para el aprendizaje del idioma inglés. Los autores confirmaron que la aplicación ayudó a los estudiantes a mejorar sus habilidades para escuchar y hablar. En general, hay muchas posibilidades de AR para el desarrollo de experiencias inmersivas para aprender inglés [17].

Algunos de los juegos más destacados en este ámbito son: Mentira, el primer juego basado en el lugar de aprendizaje de idiomas que se lanzó en 2009, ambientado en un vecindario de habla hispana que establece el contexto y las condiciones con personajes simulados, otro ejemplo es Paris Ocupe que permite simular la vida en Paris ocupada por los nazis. En esta aplicación, los estudiantes pueden volver a vivir en esa época de la historia e interactuar por medio de conversaciones en inglés. También está Google Expeditions que recrea una experiencia inmersiva de un escenario del mundo real que ofrece posibilidades para estudiar idiomas y culturas extranjeras [18]. Una forma que se aplicó para el aprendizaje a varios estudiantes fue la creación del MagicBook el cual funcionaba como un libro con varios marcadores en el cual cuando se señalaba con la cámara de un Smartphone este mostraba los objetos en realidad aumentada y fue uno de los proyectos más aceptado por los estudiantes debido a que era fácil usarlo y era entretenido [19].

La Realidad Aumentada ha dado una relevancia en el uso de aplicaciones móviles en el aprendizaje de idiomas, especialmente está siendo utilizada por educadores los cuales desarrollan juegos basados en marcadores para enseñar vocabulario que se puede llevar desde una simple traducción hasta generar una animación. También están basados en la ubicación del usuario, es decir desde la posición en la que se encuentre el jugador, son juegos basados en búsquedas con descripciones detalladas de lo que se encuentra alrededor y esto sitúa al jugador o alumno en un rol más activo. Varias de estas aplicaciones relacionadas con el aprendizaje del idioma han sido creadas con varias plataformas una de ellas es ARIS que tiene una estructura de narrativa básica, hay otros editores de juegos de realidad aumentada de código abierto como TaleBlazer que se basa en roles con una estructura predeterminada y permite el uso compartido de código. Pero ambas ofrecen historias interactivas, recorridos aumentados o basados en el lugar, también se encuentra Aurasma que es multiplataforma que se utiliza para crear recorridos básicos generados al ver marcadores o imágenes, utilizado en una variedad de aprendizaje de idiomas [17].

Continuamente los dispositivos móviles habilitados para esta tecnología pueden mejorar el aprendizaje de idiomas, por ejemplo, un grupo llamado Pearson ha desarrollado un prototipo de un libro de frases de un idioma extranjero para fomentar el aprendizaje del vocabulario contextualizado en tiempo real. Uno de los potenciales de aprendizaje

está en el interés del alumno ya que no dejará de jugar y aprenderá, también es una ventaja que la aplicación se juegue de forma independiente porque puede haber la preferencia de que el individuo juegue solo, en lugar de jugar con otros competidores [18].

2.3 Realidad Mixta

La Realidad Mixta es otra forma de definir la realidad aumentada siendo la fusión de lo real y lo virtual, es decir la combinación de varios elementos virtuales con los reales. Según Milgram la realidad mixta es una matriz unidimensional del entorno real para el entorno virtual lo que se puede considerar punto medio, propiciando no sólo interacciones del usuario con el entorno virtual, sino que también con los objetos físicos teniendo experiencias cada vez más reales [9].

3. APLICACIÓN MÓVIL DE RA PARA APRENDER PREPOSICIONES DE LUGAR: RA PREPOSICIONES

Para los fines de este estudio, se desarrolló una aplicación móvil con realidad aumentada basada en marcadores para enseñar el tema de preposiciones de lugar en inglés denominada AR Preposiciones. En AR Preposiciones, el estudiante puede practicar preposiciones como “under”, “above”, “in”, “on”, “on the left”, “on the right”, “in front of”, “behind”. La aplicación móvil se desarrolló completamente en Unity utilizando la librería Vuforia. Los modelos 3D incluidos en la aplicación se importaron de la tienda de recursos de Unity. La aplicación tiene los siguientes componentes:

- *Tutorial:* Al inicio de la aplicación hay unas instrucciones con descripción e imágenes de los elementos o cosas más importantes para entender la aplicación como: los objetos que serán posicionados y los tipos de ayuda (instrucción en texto y una señal en donde debe ir el objeto, la reproducción de audio).
- *Niveles:* Se encuentran tres niveles con diferentes escenarios con objetos diferentes para posicionar.
- *Tiempo:* Existe un registro de tiempo por los tres niveles.
- *Errores:* Existe un registro de errores por cada vez que el estudiante posiciona mal el objeto.
- *Ayuda:* Existe un mecanismo de ayuda para que los estudiantes puedan completar la tarea de aprendizaje. Esta ayuda fue desarrollada con base en la teoría del scaffolding. La ayuda le permitirá ver dónde colocar el objeto o la preposición específica a través de una instrucción textual o una señal que muestra el lugar donde posicionar el objeto. Más adelante se explicará cómo funciona la ayuda de forma más específica.
- *Retroalimentación:* Al finalizar los tres niveles se le muestra al estudiante información acerca de cuantos errores tuvo, el tiempo total que empleó en completar los niveles y cuantas veces pidió ayuda al sistema. Esta información la puede utilizar para comparar su desempeño con el de otros compañeros.

La aplicación se puede instalar en dispositivos móviles Android con versión 4.4 o superior. Una vez se inicia la aplicación, el estudiante encuentra un tutorial con instrucciones sobre cómo utilizarla. Cada uno de los estudiantes recibe un marcador de realidad aumentada que le permitirá utilizar la aplicación. Después de leer las instrucciones, se inicia una escena de realidad aumentada donde el estudiante debe apuntar al marcador con la cámara de su dispositivo móvil. Cuando la aplicación detecta el marcador entonces se posiciona sobre el marcador la escena que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Escena 1 de la aplicación

Esta escena está conformada por un ambiente que recrea una sala y esta escena constituye el primer nivel de la aplicación. En esta escena, sobre la mesa hay unos libros que el estudiante debe ubicar de acuerdo con una instrucción que escucha por medio de audio. Por ejemplo, cuando inicia la escena se escucha una instrucción que dice: “Put the books under the table”. Lo que traduce a: “Coloca los libros debajo de la mesa”. En ese momento, el estudiante puede interactuar con la escena de realidad aumentada utilizando gestos de touch y puede mover los libros hacia cualquier parte de la sala. En caso de que el estudiante mueva los libros hacia un lugar que no corresponde según la instrucción entonces la aplicación le muestra un mensaje al estudiante indicando que la posición no es correcta.

La Figura 3 muestra una captura de pantalla de la aplicación funcionando con el modo de realidad aumentada. En esta captura de pantalla, el estudiante está apuntando al marcador sobre el cuál esta apareciendo el escenario de realidad aumentada.



Figura 3. Vista de realidad aumentada de la aplicación

También es posible que el estudiante no entienda la instrucción en inglés por lo que se ha creado un botón en la interfaz de la aplicación (botón “Listen again” en la Figura 3) que le permite al estudiante volver a escuchar la instrucción cuantas veces sea necesario para comprender la instrucción. Adicionalmente, y teniendo en cuenta la teoría del scaffolding [20], se implementó un botón de ayuda (botón “Help” en la Figura 3) al que el estudiante puede acudir en caso de que no entienda la instrucción por audio. Este botón proporciona dos niveles de ayuda. El primer nivel de ayuda facilita la comprensión de la instrucción en inglés por medio de la instrucción escrita en texto en la interfaz de usuario. Si el estudiante aún no comprende la instrucción, el segundo nivel de ayuda muestra una señal justo en donde se deben colocar los libros (Figura 4) de tal forma que el estudiante pueda asociar la instrucción con la posición correcta donde deben ir los libros. La instrucción siempre se proporciona primero en audio para que el estudiante practique la habilidad de escucha de acuerdo con las sugerencias de los profesores de inglés que colaboraron con el proyecto. Los niveles de ayuda fueron definidos para que los estudiantes pudieran completar la tarea de aprendizaje sin desmotivarse.

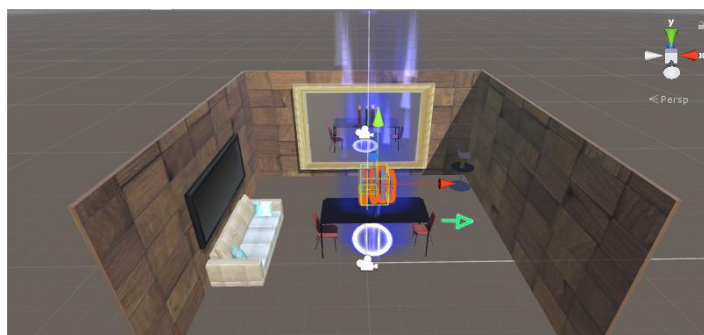


Figura 4. Indicador de ayuda de la posición de los libros de acuerdo con la instrucción de audio

Cuando el estudiante completa de forma correcta una instrucción, entonces la aplicación le plantea al estudiante una nueva instrucción. Esto se repite un promedio de 6 veces por cada uno de los tres niveles que tiene la aplicación. Las instrucciones se ejecutan de forma aleatoria para que la experiencia de usuario sea siempre diferente cuando utiliza la aplicación. Cuando los profesores utilizaron esta aplicación en el aula de clase, le recomendaron a los estudiantes utilizar la aplicación tratando de recurrir lo menos posible a las ayudas para generar un ambiente de reto en los estudiantes para poder completar los niveles acudiendo lo menos posible a las ayudas. La escena que se presenta en la Figura 5 corresponde al segundo nivel de la aplicación. Se trata de una cocina en donde el bowl es el objeto que se ha de posicionar a los diferentes lados de la mesa, la flecha verde indica que ese es el lado derecho de la escena para propósitos de ubicación del lado izquierdo y derecho.



Figura 5. Nivel 2 de la aplicación

La escena que se presenta en la Figura 6, es un cuarto de estudio del tercer nivel, el computador es el objeto que se ha de posicionar de acuerdo con las instrucciones de audio que se proporcionan, la flecha verde indica que ese es el lado derecho de la escena.



Figura 6. Nivel 3 de la aplicación

Al finalizar el tercer nivel se muestra la retroalimentación (Figura 7) del tiempo transcurrido por los tres niveles, cuantos errores hay, cuantas veces se oprimió el botón de audio y cuantas veces se pidió ayuda. Este tipo de información le ayuda al estudiante a comparar su desempeño con sus compañeros y al mismo tiempo fijarse un reto a si mismo para poder completar los niveles de la aplicación sin necesidad de acudir a la ayuda. Este aspecto fue implementado en la aplicación como resultado de las sugerencias de los profesores de inglés que participaron en el diseño de la aplicación móvil de realidad aumentada.

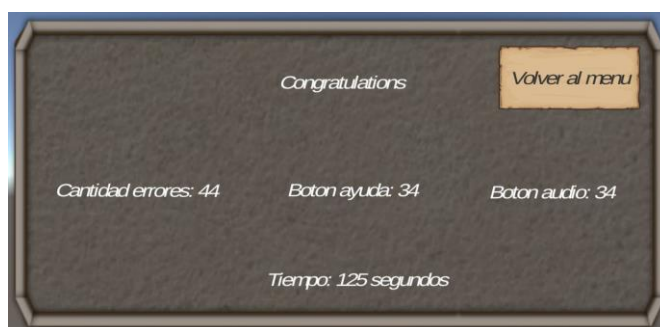


Figura 7. Retroalimentación

Si el usuario cierra la aplicación al abrirla de nuevo puede continuar en el nivel en el que había quedado oprimiendo el botón de “continuar partida”, así no perderá lo que ya había avanzado (Figura 8).



Figura 8. Interfaz de continuar partida guardada

4. ESTUDIO DE EVALUACIÓN

En este estudio se siguió la metodología de investigación basada en diseño o en inglés (Design-based research). La aplicación se probó con 46 estudiantes universitarios de primer año (34 mujeres y 12 hombres) de tres clases de inglés de diversos programas de pregrado del nivel intermedio-bajo de la Fundación Universitaria Konrad Lorenz. Los estudiantes fueron invitados a participar en el proyecto y se les ayudó a instalar la aplicación. Se le proporcionó un marcador impreso de realidad aumentada a cada estudiante. Con el fin de recopilar información sobre las percepciones de los estudiantes en términos de aceptación y usabilidad, se utilizó un instrumento con una escala Likert (1 a 5 puntos). El instrumento fue adaptado a partir de los instrumentos propuestos y validados por Guest et al. [21] y Huang [22]. En particular se adaptaron las siguientes dimensiones: validez ecológica, facilidad de uso percibida, compromiso, utilidad percibida, estética. Además, la Escala de usabilidad del sistema (SUS) [23] también se consideró en la encuesta para evaluar la usabilidad. La encuesta tuvo un total de 19 ítems.

Las dimensiones evaluadas por el instrumento son:

- *Escala de Usabilidad del sistema*: Esta escala permite evaluar la usabilidad de un sistema.
- *Validez Ecológica*: Está definido como el grado en el cual el usuario percibe aspectos de la realidad en un ambiente de simulación.
- *Facilidad percibida de uso*: Está definido como el grado en el cual la cantidad de recursos cognitivos que demanda el uso de la tecnología tiende a ser lo más bajo posible.
- *Compromiso*: Hace referencia a la atracción que genera la aplicación durante su uso.
- *Utilidad percibida*: Hace referencia a la percepción de la tecnología como un elemento más útil que otras tecnologías o recursos anteriores.
- *Estética*: Grado de atracción visual y entretenimiento percibido por el usuario.

5. RESULTADOS

Los resultados de usabilidad muestran una percepción positiva de los estudiantes con respecto a la aplicación AR Preposiciones ($M = 3.48$; $SD = 0.66$). En términos de aceptación, los resultados generales para cada dimensión son: validez ecológica ($M = 3,63$; $SD = 0,6$), facilidad percibida de uso ($M = 3,54$; $SD = 0,63$), compromiso ($M = 3,8$; $SD = 0,75$), Utilidad percibida ($M = 4.18$; $SD = 0.7$), estética ($M = 3.91$; $SD = 0.74$). Estos resultados también muestran una percepción positiva de los estudiantes con respecto a la aceptación de la aplicación. Los valores para cada dimensión están en una escala del 1 al 5, donde 1 es el valor mínimo y 5 el valor máximo. La Figura 9 muestra un resumen de los resultados para cada dimensión.

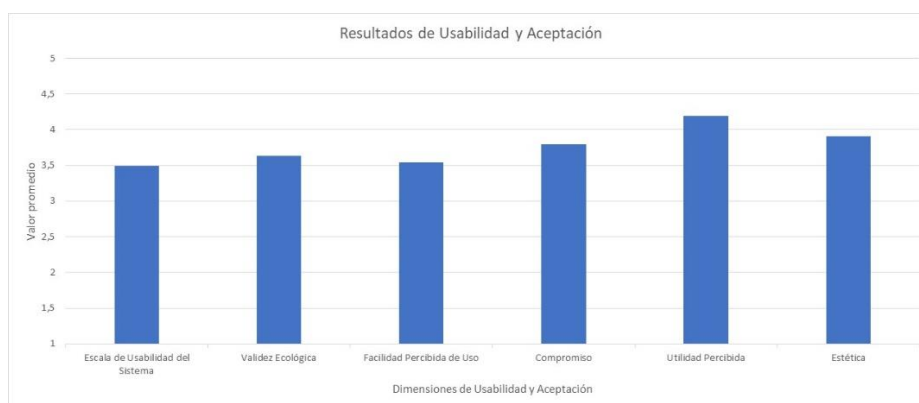


Figura 9. Resumen de resultados de usabilidad y aceptación de la aplicación

Aunque los resultados son positivos en general, el mejor resultado se obtuvo en la dimensión de la utilidad percibida ($M = 4.18$; $SD = 0.7$). Este resultado sugiere que los estudiantes percibieron que la aplicación es útil para su proceso de aprendizaje y que puede ser efectiva para aprender el tema de las preposiciones de lugar. Estos resultados concuerdan con otras investigaciones que han confirmado que las aplicaciones de realidad aumentada favorecen las actitudes positivas de los estudiantes [24, 25]. Otra dimensión con altos resultados es la dimensión de estética ($M = 3.91$; $SD = 0.74$). Este resultado muestra que los estudiantes tuvieron percepciones positivas hacia la interfaz y el diseño de la aplicación. Los resultados más bajos se obtuvieron en términos de facilidad de uso percibida, facilidad de uso (SUS) y validez ecológica. Estos resultados muestran que hay algunas dificultades que los estudiantes experimentan al usar la aplicación. Una posible explicación de este resultado es que a veces es difícil mantener el teléfono móvil apuntando al marcador. Además, el smartphone debe posicionarse bien para tener una mejor perspectiva de cada uno de los escenarios con el fin de mover los objetos fácilmente utilizando gestos de “touch”. Esto requiere que los estudiantes muevan el smartphone mientras señalan un objeto que aparece en la escena de realidad aumentada, por lo que esto aumenta la dificultad para usar la aplicación. De acuerdo con estos resultados, sugerimos que la interacción mediante el touch con una escena AR debe diseñarse cuidadosamente para evitar aumentar la dificultad de uso de la aplicación y tal vez la carga cognitiva.

A partir de las pruebas realizadas en el aula de clase, recopilamos las apreciaciones de los profesores acerca de la experiencia de aprendizaje de sus estudiantes con esta aplicación. Aunque no se realizaron entrevistas formales, los comentarios de los profesores fueron muy positivos en el sentido de que los profesores notaron que esta actividad mantuvo a los estudiantes “enganchados” en un reto de completar los niveles de la aplicación y notaron que el uso de la aplicación motivó a los estudiantes debido al alto contenido gráfico. Los profesores valoraron de forma positiva la experiencia con la aplicación y comentaron su disposición de seguir usando la aplicación para la enseñanza de las preposiciones en inglés. En este sentido, las apreciaciones de los profesores confirman también los resultados obtenidos a partir del instrumento en cuanto a que los estudiantes reportaron altos niveles de aceptación con respecto

al uso de la herramienta. Estos resultados son de alta importancia para la comunidad científica en esta área porque confirman que para este tema de inglés la realidad aumentada parece ser aceptada como una tecnología que podría ayudar a practicar el tema de las preposiciones en inglés.

Limitaciones de este estudio

En este estudio se abordó principalmente la evaluación de usabilidad y aceptación de una aplicación de realidad aumentada que fue desarrollada para facilitar la práctica del tema de las preposiciones de lugar en inglés como un primer ejercicio de puesta en marcha de una innovación educativa en el área de inglés. Debido a restricciones de tiempo y logística no fue posible probar la aplicación durante un lapso de tiempo mayor y como consecuencia de esto no fue posible identificar si la aplicación favorecía o no el proceso de aprendizaje del estudiante. En este sentido la aplicación se debe utilizar teniendo en cuenta que aún no se ha confirmado si la aplicación puede favorecer el proceso de aprendizaje del estudiante. Este aspecto puede ser evaluado en trabajos futuros debido a que de momento se ha demostrado únicamente que los estudiantes reportan altos niveles de aceptación y usabilidad de la herramienta.

6. CONCLUSIONES

Las dos contribuciones principales de este trabajo son: 1) Se introduce una aplicación móvil de realidad aumentada desarrollada para apoyar la práctica del tema de las preposiciones en inglés en los cursos de inglés. De acuerdo con la investigación realizada no existe una aplicación similar por lo que este desarrollo representa una innovación en este aspecto. 2) se evaluó la usabilidad y aceptación de la aplicación mediante una prueba con 46 estudiantes de tres clases de inglés a nivel universitario. Esta evaluación proporciona ideas acerca de las potencialidades que puede tener esta tecnología en la enseñanza del inglés confirmando los hallazgos de otros investigadores en este ámbito [17].

- *Sobre usabilidad de la aplicación.* Sobre la base de los resultados de la prueba realizada con diferentes estudiantes, la aplicación puede ser una herramienta útil que puede ayudar a practicar el tema de las preposiciones de lugar en inglés. En general, la aceptación y usabilidad de la aplicación fue muy positiva. A partir de esta evaluación se identificaron algunas mejoras en el aspecto de la interacción para que sea más efectiva para el proceso de aprendizaje porque algunos estudiantes experimentaron algunas dificultades cuando interactúan con la información aumentada. En consecuencia, estas adiciones o cambios se traducen en una persona que interactúa mucho mejor con el entorno de realidad aumentada, así como a un nivel superior. Como resultado de las pruebas, se pudo concluir que este tipo de tecnología (realidad aumentada), puede ser útil para practicar el tema de las preposiciones de lugar en inglés.
- *Sobre la metodología.* Con respecto a la metodología utilizada se concluye que el diseño e implementación de cada una de las fases es eficiente para aplicaciones en el ámbito educativo, debido a que es una metodología que se enfatiza en esta área y facilita el encontrar elementos muy específicos de la problemática siendo aplicable a la construcción de prototipos de software ya que sus fases permiten desarrollar y realizar cambios respecto a lo que se desea implementar.
- *Sobre las tecnologías de desarrollo*
 - El desarrollo de esta aplicación utilizando como motor de videojuegos Unity facilitó el desarrollo del software debido a que Unity tiene una interfaz muy amigable para el desarrollo de prototipos rápidos lo que facilita el desarrollo de software.
 - El uso de Vuforia facilitó el uso de la tecnología de Realidad aumentada en dispositivos móviles.
 - A través de la solución planteada en este proyecto los estudiantes tendrán una mejor manera de aprender inglés como lo es el tema de las preposiciones de lugar y donde la aplicación ofrece un tipo de inmersión al jugarlo.

Agradecimientos

El desarrollo de este capítulo de investigación fue apoyado por la Fundación Universitaria Konrad Lorenz. Los autores agradecen especialmente la colaboración de los profesores de inglés que aportaron al desarrollo de la aplicación y a la realización de las pruebas de la aplicación con estudiantes en particular agradecemos a la profesora Adriana Ahumada Vanegas y al profesor Franz Mauricio Castro. Adicionalmente, agradecemos la colaboración de la profesora Bibiana Martínez Piraquive (Directora del Instituto de Lenguas Extranjeras de la Fundación).

REFERENCIAS

- [1] J. Manuel, S. Calderón, and H. M. Hernández, "Informe Saber Pro Informe Nacional de Resultados," Bogota D.C, Informe, Junio 2018.
- [2] British Council, "El inglés en Colombia: Estudio de políticas, percepciones y factores influyentes," Informe, Mayo 2015.
- [3] A. Aguirregoitia, J. Lopez, E. Artetxe, and E. Bilbao, "An experience of the application of Augmented Reality to learn English in Infant Education", In. Proc. 2017 International Symposium on Computers in Education (SIIE), 2017, pp. 1–6.

- [4] W. McMahon, "How AR and VR Can Make Students Laugh and Cry Out Loud—and Embed Them in Their Learning," Agosto 28, 2018. [Online]. Available: <https://www.edsurge.com/news/2018-08-28-how-ar-and-vr-can-make-students-laugh-and-cry-out-loud-and-embed-them-in-their-learning>. [Accessed: Sept. 24, 2018].
- [5] British Council, "Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Ecuador, Mexico & Peru," Informe, 2003.
- [6] J. Bacca, S. Baldiris, R. Fabregat, S. Graf, and Kinshuk, "Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications," *J. Educ. Technol. Soc.*, vol. 17, no. 4, pp. 133–149, 2014.
- [7] J. Bacca, S. Baldiris, R. Fabregat, and Kinshuk, "Framework for designing motivational augmented reality applications in vocational education and training," *Australas. J. Educ. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 102–117, 2019.
- [8] K. Lee, "Augmented Reality in Education and Training," *TechTrends*, vol. 56, no. 2, pp. 13–21, 2012.
- [9] G. Bhorkar, "A Survey of Augmented Reality Navigation," vol. 8, no. 2, pp. 73–272, 2017.
- [10] J. Bloxham, "Augmented Reality Learning," *Itnow*, vol. 56, no. 3, pp. 44–45, 2014.
- [11] M. B. Ibanez, D. Villaran, and C. Delgado-Kloos, "Integrating assessment into augmented reality-based learning environments," In Proc. IEEE 15th Int. Conf. Adv. Learn. Technol. Adv. Technol. Support. Open Access to Form. Informal Learn, 2015, pp. 218–222.
- [12] G. D. Voinea, C. Postelnicu, and M. Duguleana, "Towards Using an Augmented Reality Mobile Assistant for Improving Driving Skills," In Proc. International Conference on Technologies for E-Learning and Digital Entertainment, 2017, pp. 52–55.
- [13] K. F. Hsiao and N. S. Chen, "The development of the AR-fitness system in education," In Proc. International Conference on Technologies for E-Learning and Digital Entertainment, 2011, pp. 2–11.
- [14] B. Zhenming, U. Mayu, E. Mamoru, and Y. Tatami, "Development of an english words learning system utilizes 3D markers with augmented reality technology," In *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 2017, pp. 1–2.
- [15] A. H. Safar, A. A. Al-Jafar, and Z. H. Al-Yousefi, "The effectiveness of using augmented reality apps in teaching the english alphabet to kindergarten children: A case study in the state of Kuwait," *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 13, no. 2, pp. 417–440, 2017.
- [16] T.-Y. Liu, "A context-aware ubiquitous learning environment for language listening and speaking," *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 25, no. 6, pp. 515–527, 2009.
- [17] R. Godwin-jones, "Augmented reality and language learning: From annotated vocabulary to place-based mobile games," *Language Learning & Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 9–19, 2016.
- [18] C. Blyth, "Immersive technologies and language learning," *Foreign Lang. Ann.*, vol. 51, no. 1, pp. 225–232, 2018.
- [19] M. Billinghurst, "Augmented reality in education," *New Horizons Learn*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2003.
- [20] D. Wood, J. S. Bruner, and G. Ross, "The role of tutoring in problem solving," *Child Psychol Psychiatry*, vol. 17, no. 2, pp. 89–100, 1976.
- [21] W. Guest, F. Wild, P. Lefrere, R. Klemke, M. Fominykh, T. Kuula, "A technology acceptance model for augmented reality and wearable technologies," *Journal of Universal Computer Science*, vol. 24, no. 2, pp. 192–219, 2018.
- [22] T. Huang and S. Liao, "A model of acceptance of augmented-reality interactive technology : the moderating role of cognitive innovativeness," *Electronic Commerce Research*, vol. 15, no. 2, pp. 269–295, 2015.
- [23] J. Brooke, "SUS - A quick and dirty usability scale," *Usability Evaluation in Industry*, pp. 4–7, 1996.
- [24] A. Taskiran, "The effect of augmented reality games on English as foreign language motivation," *E-Learning and Digital Media*, vol. 16, no. 2, pp. 122–135, Mar. 2019.
- [25] E. Liu, C. Liu, Y. Yang, S. Guo, and S. Cai, "Design and Implementation of an Augmented Reality Application with an English Learning Lesson," In Proc. 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE), 2018, pp. 494–499.

Evolución de la tecnología *blockchain* como pilar para la Cuarta Revolución Industrial

Nelson F. Barco B.¹

Francisco J. Moreno A.²

Jaime A. Guzmán L.³

Universidad Nacional de Colombia Medellín – Colombia

Blockchain (cadena de bloques) es un tipo de base de datos relativamente nuevo. En este capítulo se presenta un panorama general sobre *blockchain*. Se presentan diversos casos de estudios a nivel mundial que han usado esta tecnología. Por otro lado, se presentan brevemente las políticas sobre tecnologías que tiene el gobierno de Colombia. De esta forma, se espera que la experiencia de otras aplicaciones de *blockchain*, en campos tan diversos como cadenas de suministro, gestión de contratos, derechos de autor, entre otros, sirvan de base y generen ideas para su articulación con el medio colombiano y su incorporación a la cuarta revolución industrial.

1. INTRODUCCIÓN

Blockchain (cadena de bloques) es un tipo de base de datos relativamente nuevo, que permite el intercambio de datos entre usuarios sin necesidad de un intermediario (como un banco) que valide las transacciones, reduciendo la incertidumbre del intercambio entre las partes. La aplicación más popular de *blockchain* son las criptomonedas, particularmente Bitcoin. Pero esta es solo una de las posibles aplicaciones de *blockchain* [1].

Pero ¿por qué *blockchain* otorga tanta confianza a las partes interesadas al hacer un intercambio de datos, sin necesidad de tener un intermediario? Para responder esta pregunta se debe explicar cómo funciona *blockchain*. Se trata de una base de datos distribuida que almacena un registro de transacciones a través de una red *peer-to-peer*. Además, este registro debe ser público, o al menos debe serlo para las partes involucradas en las transacciones. Su seguridad se refuerza con el uso de la criptografía, creando un “registro inmutable de datos” (aunque esto no se cumple necesariamente en todas las *blockchains*), prácticamente imposible de modificar y que puede almacenar prácticamente cualquier tipo de datos. Esta base de datos está replicada en muchos computadores; esta característica junto con aspectos criptográficos es lo que hace tan seguro a *blockchain*, y que puede ser [2]:

- *Público*: no requiere permisos y cualquiera con acceso a la red puede verificar los datos (transacciones).
- *Privado*: requiere permisos para acceder a él. Algunos autores no la consideran como una *blockchain* pues el control es ejercido por una sola entidad que se encarga de mantener y de otorgar los permisos sobre la *blockchain* a los diferentes usuarios participantes.

Dos grandes ejemplos de *blockchain* son Bitcoin y Ethereum, ambas públicas. R3, Ripple, Chain y Quorum son ejemplos de *blockchain* privadas [3]. A continuación, se explica brevemente el funcionamiento de *blockchain*. A grandes rasgos, una *blockchain* convencional (en general, existen muchas variantes de *blockchain*; estas no se apegan necesariamente a los aspectos acá descritos) funciona así: *Blockchain* es una cadena de bloques, donde cada bloque contiene un conjunto de transacciones aprobadas. El último bloque de la *blockchain* corresponde a las últimas transacciones aprobadas.

Existen usuarios (participantes) que ingresan transacciones (por ejemplo, una transferencia de dinero del usuario A al usuario B) al sistema. Estas transacciones, que están pendientes por ser aprobadas (o sea, aún no hacen parte de la *blockchain*), quedan almacenadas en el sistema en un “fondo común” (*pool*). Además, existen nodos (computadores) que acceden a este fondo de transacciones y cada uno toma un subconjunto de ellas y con ellas forma un bloque.

Cada uno de estos nodos, denominado *minero*, tiene el objetivo de anexar su bloque a la *blockchain*. Sin embargo, para lograrlo el sistema exige que el minero resuelva una prueba, denominada prueba de trabajo (*proof-of-work*). Cuando un minero resuelve la prueba impuesta, este avisa a los demás mineros, estos validarán que la prueba fue resuelta correctamente y si se aprueba (por consenso, e.g., mayor al 51% [4]), el bloque será agregado a la *blockchain* y el minero que resolvió el problema obtiene un incentivo monetario. A continuación, se resumen algunos términos clave de *blockchain*:

- *Transacciones*: corresponden a los datos de las transacciones, emitidas por los usuarios, y son almacenados en la *blockchain*. Las transacciones que figuran registradas en la *blockchain* corresponden a transacciones aprobadas y verificadas. Las transacciones pendientes por aprobar están en un fondo común (*pool*).
- *Bloques*: almacenan las transacciones (datos en general). Son creados por los mineros a partir del fondo común de transacciones.

¹ nfbarcob@unal.edu.co

² fjmoreno@unal.edu.co

³ jaguzman@unal.edu.co

- **Mineros:** son los computadores (unidades de procesamiento CPU's), los cuales arman los bloques de transacciones (a partir del fondo común de transacciones pendientes) e intentan resolver la prueba de trabajo para tratar de que su bloque sea agregado a la *blockchain*.
- **Fork (bifurcación):** cuando dos o más mineros resuelven la prueba de trabajo en un mismo tiempo se genera un *fork*. En ese momento la *blockchain* tiene dos "últimos" bloques. Naturalmente, alguna de las dos subcadenas tomará ventaja sobre la otra (número de bloques apilados) y se convertirá en la *blockchain* oficial, la otra usualmente se desecha o puede dar origen a otra *blockchain* [5].

La Figura 1 ilustra una *blockchain* y bosqueja la situación cuando ocurre un *fork*. Pero ¿cómo podría una tecnología como estas abrirse paso y emerger en un país como Colombia? ¿Cuáles son las condiciones que beneficiarían las aplicaciones basadas en esta tecnología en el ámbito colombiano? Para responder estas preguntas, es necesario analizar la política actual sobre tecnologías que tiene el gobierno de Colombia.

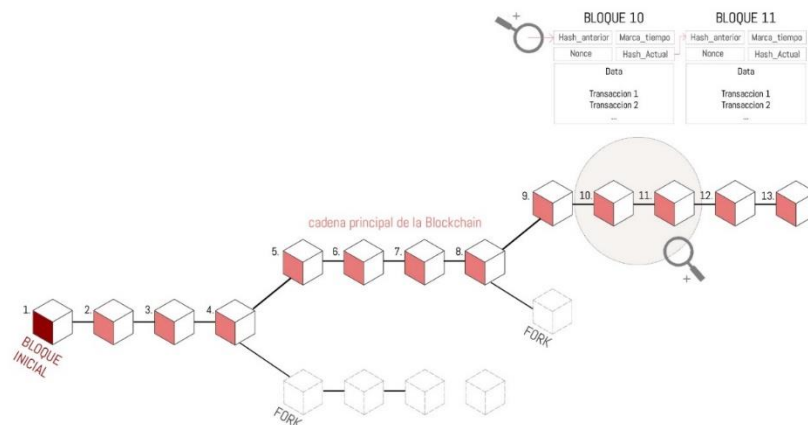


Figura 1. Estructura de una *blockchain* con *forks* y sus bloques [4]

2. CONTEXTO PARA EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA *BLOCKCHAIN* EN COLOMBIA

“La cuarta revolución industrial” es un fenómeno que se desarrolla de forma acelerada e irrumpe en todas las industrias y países. Su capacidad de permear la sociedad ha sido tal que hoy millones de personas están conectadas a través de sus teléfonos inteligentes, que tienen la capacidad de procesar y almacenar datos, y permiten acceder al conocimiento y obtener respuestas inmediatas [6]. Por otro lado, *blockchain* se puede considerar como una evolución en la manera en que la sociedad hace las transacciones, desde los comienzos cuando las transacciones eran persona a persona (presencialmente), pasando por las instituciones bancarias, gubernamentales o intermediarios que validan las transacciones entre las partes, hasta llegar a *blockchain* [7] [1].

En Medellín, el 30 de abril de 2019 se inauguró el Centro para la Cuarta Revolución Industrial “un espacio para co-crear, probar y refinar protocolos, marcos regulatorios y políticas que nos permitan maximizar los beneficios y reducir los riesgos de tecnologías de Industria 4.0, como Inteligencia Artificial, *Blockchain* y registro distribuido, Internet de las cosas, robótica y ciudades inteligentes” [8]. El Centro desarrollará seis frentes con los que busca impactar de forma directa la población de Medellín y posiblemente otras ciudades, entre estos frentes se encuentra “Políticas Públicas para la adopción de *Blockchain*”, donde el centro colabora con entidades del estado para definir un marco político para implementar soluciones basadas en esta tecnología. Algunas aplicaciones contempladas son identidad digital, voto electrónico, historial clínico digital, trazabilidad de multas, pasado judicial, impuestos, servicios notariales, entre otras [8] [9].

Es importante reconocer como ha sido el desarrollo y evolución de esta tecnología en el resto del mundo, en que industrias ha logrado emerger y como se ha logrado implementar, para así tener referentes para su aplicación en Colombia. A continuación, se detallan algunos casos de uso exitosos de esta tecnología.

3. CASOS DE USO DE LA TECNOLOGÍA *BLOCKCHAIN*

3.1 Criptomonedas

Las criptomonedas son el caso de aplicación de *blockchain* más conocido. Una criptomoneda es un activo digital usado como medio de intercambios. La tecnología *blockchain* usa técnicas criptográficas para asegurar la veracidad e integridad de las transacciones [10], [11]. Hasta el 2018 se estima que hay más de 1300 criptomonedas tales como Bitcoin, Ethereum (siendo estas las dos más populares [12], [13]). Entre los aspectos negativos de las criptomonedas están [14], [15]:

- No cuenta con apoyo legal o alguna entidad que la respalde.
- Se pueden usar para lavar dinero, debido a que las transacciones son “anónimas” y al convertir el dinero en Bitcoin se pierde su origen.
- Su precio puede fluctuar drásticamente en el mercado.

3.2 Cadena de suministro

Para la gestión de las cadenas de suministro, *blockchain* ofrece seguridad (evitar modificaciones mal intencionadas), monitoreo y trazabilidad de la información) y automatización de todo el proceso de gestión de la información. Lo anterior promueve [16] - [18]:

- La transparencia, la rastreabilidad y la prevención de robos.
- Mayor eficiencia y reducción de costos, ya que las transacciones y transferencias de materia prima se pueden registrar (y adjuntar a la *blockchain*) a medida que esta se mueve por la cadena de suministro. Las partes interesadas son notificadas inmediatamente cuando ocurre un evento del proceso de abastecimiento y pueden revisar el historial de órdenes de compra, notificaciones de envío y de recepción.
- Reducción (casi total) del uso de papel. Todos los documentos son mantenidos por la plataforma *blockchain* de tal forma que cualquiera de las partes interesadas tenga acceso a ellos al instante, haciendo más oportuna la toma de decisiones.
- Cuando se requiere registrar una operación en la plataforma *blockchain*, esta se valida mediante un consenso entre las partes involucradas en la cadena de abastecimiento. Este consenso es transparente para todas las partes ya que todos se basan en la misma información (un libro de contabilidad distribuido).

De esta forma, *blockchain* ayuda a reducir las pérdidas de información y de productos, y resuelve dos problemas principales de la logística: la eficiencia y la transparencia en el proceso de abastecimiento [16], [19].

- *Suministro Rastreo de productos farmacéuticos.* *Blockchain* podría ayudar a reducir el número de muertes debidas al uso de medicamentos falsificados. Según la Interpol [20] [21], alrededor de un millón de personas muere cada año debido a medicamentos falsificados, lo que representa casi el 30% de los productos farmacéuticos que se venden en los mercados emergentes, como son las ventas por internet [22]. En operaciones coordinadas por la INTERPOL contra la delincuencia organizada, se han llegado a incautar hasta 20 millones de medicamentos ilícitos [23]. DHL en asociación con Accenture [24], han desarrollado un proyecto para aplicar *blockchain* en el sector de los suministros farmacéuticos. El proyecto aplica la tecnología *blockchain* para rastrear estos productos desde su fabricación hasta su prescripción. Las simulaciones mostraron que se pueden manejar más de siete mil millones de números de serie y 1500 transacciones por segundo [25] [24].
- *Cadenas de suministro y transporte marítimo.* IBM y Maersk desarrollaron TradeLens [26] [27], una plataforma que aplica *blockchain* para la gestión de transacciones en la industria del transporte marítimo global. La plataforma permite el acceso transparente y en tiempo real de información como eventos (como el paso por aduanas, inconvenientes en el camino como el retraso de una entrega o pérdida de la mercancía) y documentos de la cadena de suministro. Cada participante puede ver el progreso de los bienes a través de la cadena de suministro, incluido el estado de los documentos de aduana y las facturas entre otros [28]. También permite la gestión de contratos inteligentes: donde el proceso de negociación entre las organizaciones y el despacho de importaciones y de exportaciones están integrados al *blockchain*, con copias distribuidas lo que evita que un participante cambie la lógica del negocio. Al ser un *blockchain* privado, solo los participantes autorizados lo pueden gestionar.
- *Sistema de abastecimiento de productos de pesca.* World Wide Fund for Nature (WWF) está involucrada en la creación de un sistema *blockchain* para rastrear el atún desde que se captura hasta cuando se compra para consumo [29]. El proyecto implica una etiqueta RFID (Radio Frequency Identification) que se fija debajo de las agallas de cada atún cuando este se captura. La etiqueta permite rastrear su procesamiento, que es donde ocurre usualmente el fraude, e.g., un pescado de 40 kilos no debe generar más de cuatro piezas de 10 kilos de atún puro [29]. Los participantes pueden verificar la información a medida que los activos fluyen a través de la cadena de suministro [30]. El proyecto usa el mismo software que la criptomoneda Ethereum pero no se requiere la creación de monedas ni la minería de los bloques [31]. Además, los contratos inteligentes facilitan la gestión de los pagos a los proveedores, así el operador de un barco podría recibir el 10% del valor de cada pescado cuando se desembarca, el 40% cuando se envían los productos resultantes y el 50% restante cuando todo se venda [32].
- *Confianza y transparencia en la alimentación.* La ruta que siguen los alimentos, desde su producción, pasando por los supermercados y hasta el plato del consumidor final, implica diversas transacciones [33]. IBM Food Trust usa la tecnología *blockchain* para simplificar los procesos y permitir que todos los actores de la cadena de suministro puedan gestionar las transacciones de forma segura y eficiente [34]. El sistema conecta a los productores,

procesadores, distribuidores y minoristas (retailers) por medio de un registro autorizado, permanente y compartido del sistema alimenticio [35]. Con esta tecnología se busca [34]:

- *Seguridad alimentaria*: Rastreo instantáneo de los productos, lo que permite tomar decisiones inmediatas. Esto es posible ya que la información está disponible al instante en la nube. Hoy, una eventualidad puede tardar semanas en ser atendida mientras se hace el papeleo y se contactan a las entidades pertinentes; esto puede generar contaminación y propagación de enfermedades y de residuos innecesarios.
- *Alimentos más frescos*: El productor puede anticipar, según el historial, la cantidad de productos que debe enviar y calcular el tiempo requerido para la conservación de este. Todo esto para garantizar alimentos frescos y de calidad para los consumidores.
- *Reducir desperdicios*: Gracias a que la información está disponible al instante y de forma pública para los participantes, se puede maximizar el tiempo de conservación de los alimentos y reducir las pérdidas debido a productos que superan su fecha de vencimiento.
- *Sustentabilidad*: verificar la autenticidad de los productos y certificar su procedencia a lo largo de la cadena de suministro.

3.3 Contratos inteligentes

Los contratos inteligentes tienen los mismos principios que los contratos convencionales, en los cuales dos o más partes involucradas se comprometen a cumplir unas condiciones pactadas; sin embargo, se diferencian en tres factores fundamentales, explicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Diferencia entre contratos convencionales y contratos inteligentes [36] [37]

Característica	Contrato convencional (en papel)	Contrato inteligente
Forma en que se escribe	Lenguaje natural. Puede llevar a diferentes interpretaciones de cada una de las partes, donde cada uno busca su beneficio.	Codificado como un <i>software</i> con condiciones e instrucciones a cumplir. No está sujeto a la interpretación.
Implicaciones legales	Se necesita un notario o alguna otra entidad para validarlo.	Al igual que las criptomonedas, no se necesita un intermediario para dar validez al contrato. Implícitamente se asegura su cumplimiento.
Cumplimiento de lo pactado	Depende de los involucrados y su voluntad.	El contrato se encarga de dar cumplimiento a lo pactado gracias al soporte del internet de las cosas (IoT).

- *Automatización de pagos para los proyectos de las ONG's*. Los contratos inteligentes se pueden usar para programar pagos y garantizar que los recursos estén cuando son requeridos. Se pueden usar para programar herencias, pagos de préstamos, distribución de fondos a de caridad y subsidios [37]. Start Network desarrolló una plataforma basada en Ethereum para aumentar la velocidad de respuesta ante una catástrofe humanitaria y reducir los costos de las transacciones de dinero. Mientras que por los métodos convencionales las donaciones tardan hasta 90 días en llegar a la ONG (por barreras legales, contractuales y papeleo), con su nueva plataforma [41] se garantiza que los dineros llegarán en un plazo máximo de 72 horas luego de la alerta [42] [37]. Con esta plataforma se busca [43]:
 - Apoyar la toma de decisiones descentralizada por parte de Start Network, para definir qué proyectos serán atendidos.
 - Activar y acelerar los pagos, utilizando contratos inteligentes que garanticen la entrega oportuna de los fondos necesarios para realizar el proyecto de atención de la emergencia.
 - Mejorar la transparencia con el uso del *blockchain* donde los donantes puedan ver como se han usado los fondos.
- *Registros y cambio de propiedad en los bienes raíces*. Los títulos de propiedad se pueden registrar en una plataforma *blockchain* y cambiar la titularidad mediante los contratos inteligentes [37]. El sector de bienes raíces cuenta con intermediarios que hacen el proceso engorroso [44]:
 - Suecia ha probado una plataforma Postchain [45], en colaboración con Chromaway [46], basada en *blockchain* para agilizar el proceso de bienes raíces en el país. En esta plataforma cada propiedad se marca con una huella digital única. Así, una propiedad solo es registrada en su primera venta en papel y a partir de allí, la plataforma se encargará de resguardar, verificar y modificar los datos de cada compra, haciendo el proceso más fácil, rápido y reduciendo costos, eliminando intermediarios y papeleo. Esta plataforma permitirá el acceso a los actores autorizados de la industria, como los bancos, los compradores y los vendedores, y así se podrá consultar la historia de una propiedad [47].

- ABN Amro [48] ha puesto en marcha, en conjunto con IBM, un proyecto piloto llamado Torch el cual se basa en la tecnología *blockchain*, para el sector de los bienes raíces. En la plataforma los clientes pueden ingresar sus propiedades y contratos de arrendamiento. El cliente ingresa la información a través de la plataforma y permite el acceso a los datos de forma personalizada, esto permite que otras partes (valoradores, posibles compradores, tasadores, arrendatarios, financieros) accedan a los datos de la propiedad. Como resultado se tiene un mercado transparente con datos de bienes raíces confiables, haciendo los negocios más rápidos y fáciles [49].
- *Transacciones energéticas*
- La compañía BTL Group ofrece su plataforma Interbit basada en *blockchain*, para el comercio de energía hecho por grandes empresas. Normalmente, el mantenimiento de registros y la gestión de datos son procesos engorrosos y vulnerables a errores en el comercio de productos energéticos, así como el seguimiento de la propiedad de activos. Con la tecnología *blockchain* se solucionan estos aspectos [50] - [53].
- La compañía energética Innogy puso a disposición cientos de estaciones de carga para autos eléctricos en toda Alemania, las cuales usan contratos inteligentes para procesar los pagos de la energía recargada. La plataforma en la que funciona este servicio (Share & Charge) se llama Motion Werk [54] [55]. En esta plataforma también se han desarrollado los siguientes casos de uso:
 - OSLO2ROME: Proyecto para conectar la infraestructura de carga de automóviles híbridos en toda Europa. Las transacciones y la liquidación se hacen sin intermediarios a través de contratos inteligentes [56].
 - OMOS: Open Monility System es un infraestructura descentralizada, abierta y segura digitalmente que busca un futuro de la movilidad mediante *blockchain* e IoT como su base para todo tipo de transacciones [57] [58].
- *Propiedad Intelectual (IP)*. Cuando se comparten los derechos de un producto o servicio, los contratos inteligentes podrían llegar a facilitar el proceso de la distribución de las ganancias (las cuales suelen darse hasta meses o años luego del lanzamiento del producto). Así, los participantes (programadores, diseñadores, animadores, productores musicales, actores, entre otros) reciben lo pactado en los tiempos adecuados. La compañía Digital Catapult y el Fondo de Juegos de Reino Unido han desarrollado un prototipo de contrato inteligente, especialmente diseñado para el proceso de desarrollo de juegos de video. El objetivo es formalizar el proceso de titularidad fraccionada de una nueva propiedad intelectual, e.g., los video juegos, haciendo la participación en los ingresos más democrática y valorar más el trabajo en equipo de los desarrolladores, equipos donde el personal suele cambiar durante el desarrollo de los proyectos [59] [60].
- *Seguros*. Los procesos de pagos ante incidentes (siniestros) se podrían automatizar y librarse del papeleo y el tiempo que implica el proceso para el desembolso del dinero [37]. La firma de abogados Hogan Lovells [61] ha estudiado la aplicación de los contratos inteligentes en torno a los seguros que ofrece contra accidentes. Uno de los mayores impactos que tendría el uso de *blockchain* en el tema, es la eliminación de procesos manuales, a partir de la automatización de acuerdos y de transacciones contractuales previamente acordadas entre las partes. Sin embargo, este tipo de aplicaciones puede requerir que el abogado adquiera conocimientos técnicos básicos en cuanto a *blockchain* y contratos inteligentes para así poder indicarle al desarrollador como debe ser programado cada contrato [62].

En la Tabla 2 se resumen de los casos de uso de *blockchain* descritos.

Tabla 2. Resumen casos de uso de *blockchain*

Caso de Uso	Descripción	Referencias	Aporte
Criptomonedas	Economía mundial. Uso de la tecnología <i>blockchain</i> para el comercio, el intercambio de bienes y servicios y transacciones en general, con base en las criptomonedas	[1] - [6]	Se elimina la necesidad de un intermediario central que regule las transacciones que se hacen entre los participantes.
Cadena de Suministro	Suministro y rastreo de productos Farmacéuticos y su información	[11], [13] - [17]	Se evita la falsificación de medicamentos gracias a la inmutabilidad de los datos de la <i>blockchain</i> . Permite a los clientes conocer toda la información de un medicamento, incluyendo toda la ruta por la que ha pasado hasta llegar a sus manos.
	Cadena de suministro y transporte marítimo	[18] - [20]	Todas las partes involucradas en el proceso del transporte pueden saber en tiempo real toda la información necesaria para tomar decisiones. Gestión inteligente y ordenada de los proveedores, aduanas, puertos, entre otros.
	Sistema de abastecimiento de productos de pesca	[21] - [24]	Reducción del contrabando de alimentos. Las personas pueden obtener información de los productos, incluyendo su origen y transporte hasta el

			supermercado. Además de conocer en tiempo real el proceso de suministro. Además, se logra una gestión más eficiente de pagos a los proveedores.
	Confianza y transparencia en la alimentación. Cadena de suministro de alimentos.	[25] - [27]	Igual que el anterior.
	Automatización de pagos para los proyectos de las ONG's	[29], [33] - [35]	Reducción en el tiempo de respuesta de las ONGs, ya que los procesos contractuales para el desembolso de los dineros y el tiempo se reduce (de 90 días a 72 horas después de la alerta).
	Registros y cambio de propiedad en los bienes raíces. Comercialización	[29], [36] - [39]	Se eliminan los intermediarios y se reducen los tiempos y los costos en el proceso de compra/venta de bienes raíces. Además, los compradores pueden verificar la información sobre una propiedad y su historial gracias a la tecnología inmutable de <i>blockchain</i> .
Contratos Inteligentes	Transacciones energéticas	[44] - [52]	Mejor organización y gestión de la información de los activos energéticos para mejorar el negocio de energía entre las grandes empresas. También se mejora la experiencia de los usuarios que utilizan automóviles híbridos para que puedan hacer recargas en cualquier lugar (sin limitantes de pago como la moneda o el tipo de transacción).
	Propiedad intelectual (IP)	[53], [54]	El objetivo es formalizar el proceso de titularidad fraccionada de una nueva propiedad intelectual, haciendo la participación en los ingresos más democrática.
	Seguros	[29], [55], [56]	Eliminación de procesos manuales, a partir de la automatización de acuerdos y transacciones contractuales previamente acordadas entre las partes. Automatización de pagos ante los incidentes, liberándose del papeleo y del tiempo que involucra el desembolso de los dineros.

4. CONCLUSIONES

- Una *blockchain* permite reducir la incertidumbre que se tiene entre las partes involucradas a la hora de intercambiar bienes sin necesidad de intermediarios.
- Esta tecnología tiene grandes posibilidades de aplicación en el ámbito colombiano, ya que uno de los planes del gobierno es fortalecer su infraestructura TIC, modernizándola y adaptándola a la cuarta revolución industrial. Ejemplo de esto es el Centro para la Cuarta Revolución Industrial en Medellín.
- La aplicación que tiene *blockchain* le permite adaptarse a cualquier industria, como puede ser la cadena de suministro de alimentos, fármacos, criptomonedas y dinero electrónico o contratos inteligentes (*smart contracts*) que se ejecutan "solos".
- Para aprovechar al máximo las ventajas que ofrece *blockchain*, es necesario trabajar en las demás tecnologías de la cuarta revolución industrial, como son *machine learning*, *big data* y el internet de las cosas y así permitir que estas tecnologías permeen y beneficien a la sociedad.

REFERENCIAS

- [1] B. Warburg, «TED:Ideas Worth Spreading. How the Blockchain will radically transform de economy,» Junio 2016. [En línea]. Available: https://www.ted.com/talks/bettina_warburg_how_the_blockchain_will_radically_transform_the_economy?language=hi. [Último acceso: 17 Mayo 2019].
- [2] M. Calvo, «Blockchain Servives. Conoce los diferentes tipos de blockchain,» 28 Julio 2018. [En línea]. Available: <http://www.blockchainservices.es/novedades/conoce-los-diferentes-tipos-de-blockchain/>. [Acceso: 28 Mayo 2019].
- [3] Blockchain, «Blockchain,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.blockchain.com/es/>. [Último acceso: 15 Mayo 2019].
- [4] A. S. Bruyn, Blockchain an introduction, Univetrstiy Amsterdam, 2017.
- [5] Blockchain, «Blockchain: What is Bitcoin Cash?,» 18 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://support.blockchain.com/hc/en-us/articles/115005882786-What-is-Bitcoin-Cash->. [Último acceso: 28 Abril 2019].
- [6] R. N. MEDELLIN, «CUARTA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL,» [En línea]. Available: <https://www.rutanmedellin.org/es/cuarta-revolucion-industrial>. [Último acceso: 15 Diciembre 2018].
- [7] Ruta N Medellín, «#4revolución: Blockchain,» 22 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.rutanmedellin.org/es/industria-4-0/item/4revolucion-blockchain>. [Último acceso: 13 Noviembre 2018].

- [8] Ruta n Medellín, «En Medellín se inauguró el centro para la cuarta revolución industrial,» [En línea]. Available: <https://www.rutanmedellin.org/es/noticias-rutan/item/en-medellin-se-inauguro-el-centro-para-la-cuarta-revolucion-industrial>. [Último acceso: 3 Diciembre 2018].
- [9] Ruta n Medellín, «¿Qué más quieres saber sobre blockchain?,» [En línea]. Available: <https://www.rutanmedellin.org/es/industria-4-0/item/%C2%BFqu%C3%A9-m%C3%A1s-quieres-saber-sobre-blockchain>. [Acceso: 22 Mayo 2019].
- [10] U. W. Chohan, «SSRN. Cryptocurrencies: A Brief Thematic Review,» 25 Agosto 2017. [En línea]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3024330&download=yes. [Último acceso: 30 Enero 2019].
- [11] CoinMarketCap, «CoinMarketCap: Crypto Glossary» [En línea]. Available: <https://coinmarketcap.com/glossary/>. [Último acceso: 9 Mayo 2019].
- [12] Exumm Coin, «Medium,» 30 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://medium.com/@exummcoin/cu%C3%A1ntas-criptomonedas-existen-en-el-mundo-4ecf0ae88584>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [13] CoinMarketCap, «CoinMarketCap,» [En línea]. Available: <https://coinmarketcap.com/all/views/all/>. [Último acceso: 9 Febrero 2019].
- [14] Forex Investing, «Forex Investing: ¿Cuántas criptomonedas existen y en cuáles criptomonedas es mejor invertir?,» [En línea]. Available: <https://forexinvestinginfo.com/cuántas-criptomonedas-existen-cuales-criptomonedas-mejor-invertir/>. [Último acceso: 10 Mayo 2019].
- [15] Association for Information Systems AIS Electronic Library (AISeL), «Economic Analysis of Cryptocurrency Backed Money Laundering,» 29 Mayo 2015. [En línea]. Available: https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=ecis2015_cr. [Último acceso: 30 Noviembre 2018].
- [16] Retos en Supply Chain, «EA Business School: Blockchain: la revolución llega a la cadena de suministro,» 17 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/blockchain-la-revolucion-llega-a-la-cadena-de-suministro/>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [17] OBS Business School, «Tendencias & Innovación: Blockchain: Una nueva era para la Supply Chain Management,» [En línea]. Available: <https://www.obs-edu.com/int/blog-investigacion/logistica/blockchain-una-nueva-era-para-la-supply-chain-management>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [18] B. Marr, «Forbes: Cómo Blockchain transformará la cadena de suministro y la industria logística,» 23 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/03/23/how-blockchain-will-transform-the-supply-chain-and-logistics-industry/#4a8c3c8a5fec>. [Último acceso: 26 Mayo 2019].
- [19] IBM, «Now arriving: IBM Blockchain for supply chain,» IBM, [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/blockchain/industries/supply-chain>. [Último acceso: 30 de Octubre 2018].
- [20] Organización Mundial de la Salud, «Boletín de la Organización Mundial de la Salud. La falsificación de medicamentos: una amenaza creciente,» © 2019 WHO, abril 2010. [En línea]. Available: <https://www.who.int/bulletin/volumes/88/4/10-020410/es/>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [21] Noticias RCN, «Un millón mueren al año por medicamentos falsos,» Un producto de RCN televisión 2018, octubre 2013. [En línea]. Available: <https://noticias.canalrcn.com/nacional-pais/un-millon-personas-mueren-al-ano-medicamentos-falsos>. [Último acceso: 3 Marzo 2019].
- [22] Interpol, «Interpol: medicinas falsas,» marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2013/INTERPOL-y-la-industria-farmaceutica-lanzan-una-iniciativa-mundial-para-combatir-las-medicinas-falsas>. [Último acceso: 3 Mayo 2019].
- [23] Interpol, «Una operación coordinada por Interpol contra la delincuencia organizada se salda con la incautación de 20 millones de medicamentos ilícitos,» junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2015/Una-operacion-coordinada-por-INTERPOL-contra-la-delincuencia-organizada-se-salda-con-la-incautacion-de-20-millones-de-medicamentos-ilicitos>. [Último acceso: 6 Mayo 2019].
- [24] DHL Trend Research, «Blockchain in logistics,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.logistics.dhl/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-blockchain-trend-report.pdf>. [Último acceso: 11 Mayo 2019].
- [25] K. Flinders, «TechTarget. Prueba de concepto muestra que blockchain puede salvar vidas en logística farmacéutica,» TechTarget, S.A de C.V 2005 - 2019, marzo 2018. [En línea]. Available: <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/noticias/252436778/Prueba-de-concepto-muestra-que-blockchain-puede-salvar-vidas-en-logistica-farmaceutica>. [Último acceso: 21 Abril 2019].
- [26] Tradelens, «The Tradelens Solution,» [En línea]. Available: <https://www.tradelens.com/solution/>. [Último acceso: 22 Enero 2019].
- [27] IBM y Maersk, «TradeLens Overview,» IBM Corporation y Maersk GTD Inc. 2018, [En línea]. Available: https://docs.tradelens.com/learn/tradelens_overview/. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].
- [28] M. Osore, «TechTarget. Asociación global de Maersk e IBM digitalizará cadenas de suministro usando blockchain,» TechTarget, S.A de C.V 2005 - 2019, enero 2018. [En línea]. Available: <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/noticias/450433373/Asociacion-global-de-Maersk-e-IBM-digitalizara-cadenas-de-suministro-usando-blockchain>. [Último acceso: 22 Diciembre 2018].
- [29] S. Mathieson, «TechTarget. Blockchain entrega valor al sistema de abastecimiento de alimentos,» TechTarget, S.A de C.V 2005 - 2019, febrero 2019. [En línea]. Available: <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/Blockchain-entrega-valor-al-sistema-de-abastecimiento-de-alimentos>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [30] VIANT, «Viant is a blockchain-based platform for modeling business processes, tracking assets and building the supply chains of the future,» © 2018 Viant, enero 2019. [En línea]. Available: <https://viant.io/>. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [31] WWF New Zeland, «New Blockchain Project has potential to revolutionise seafood industry,» [En línea]. Available: <https://player.vimeo.com/video/270537729>. [Último acceso: 28 Mayo 2019].
- [32] WWF, «WWF. New Blockchain Project has potential to revolutionise seafood industry,» © WWF, [En línea]. [Último acceso: 30 Enero 2018]. Available: https://www.wwf.org.nz/what_we_do/marine/blockchain_tuna_project/. [Último acceso: 15 Febrero 2019].
- [33] IBM Blockchain, «Youtube: Join the power of IBM Food Trusthttps://www.youtube.com/watch?v=QWijlTDHLMQ#action=share» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=QWijlTDHLMQ#action=share>. [Último acceso: 30 Mayo 2019].

- [34] IBM, «IBM Blockchain,» IBM®, [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/co-es/blockchain/solutions/food-trust>. [Último acceso: 10 Diciembre 2018].
- [35] IBM, «About IBM Food Trust» [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/downloads/cas/EX1MA10X>. [Último acceso: 15 Diciembre 2019].
- [36] Cryptoner, «Cryptoner: What are smart contracts?» junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.cryptoner.com/2017/06/what-are-smart-contracts.html>. [Último acceso: 30 Enero 2019].
- [37] Criptonoticias, «Criptonoticias: ¿Qué son los contratos inteligentes?» [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/informacion/que-son-los-contratos-inteligentes/>. [Último acceso: 10 Diciembre 2018].
- [38] Oraclize, «Documentación Oraclize,» [En línea]. Available: <https://docs.oraclize.it/#data-sources-url>. [Último acceso: 4 Febrero 2019].
- [39] The ProvableTM blockchain oracle for modern DApps, «<https://provable.xyz/>,» [En línea]. Available: <https://docs.oraclize.it/#data-sources-url>. [Último acceso: 11 Febrero 2019].
- [40] J. Sandoval, «Criptonoticias: DAO sufre advertido ataque que sustrae 60 millones de dólares y amenaza su continuidad,» junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/seguridad/dao-sufre-advertido-ataque-sustrae-60-millones-dolares-amenaza-continuidad/>. [Último acceso: 5 Enero 2019].
- [41] Start Network, «Start Fund,» © 2015 Start Network, [En línea]. Available: <https://startnetwork.org/start-fund>. [Último acceso: 8 Marzo 2019].
- [42] I. Perez, «CRIPTONOTICIAS: INVERSIÓN DEL GOBIERNO DE ESTONIA REIMPULSA PROYECTO DE BLOCKCHAIN HUMANITARIA,» febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/aplicaciones/inversion-gobierno-estonia-reimpulsa-proyecto-blockchain-humanitario/>. [Último acceso: 25 Octubre 2018].
- [43] Start network, «Start fund to test revolutionary blockchain technology in disaster response,» [En línea]. Available: <https://startnetwork.org/news-and-blogs/start-fund-test-revolutionary-blockchain-technology-disaster-response>. [Último acceso: 3 Noviembre 2018].
- [44] I. Perez, «Criptonoticias: ABN AMRO continúa su innovación blockchain ahora en bienes raíces,» Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/banca-seguros/abn-amro-continua-su-innovacion-blockchain-ahora-en-bienes-raices/>. [Último acceso: 9 Febrero 2019].
- [45] ChromaWay, «Postchain,» [En línea]. Available: <https://chromaway.com/products/postchain/>. [Último acceso: 6 Febrero 2019].
- [46] ChromaWay, «Chromapolis,» [En línea]. Available: <https://chromaway.com/>. [Último acceso: 15 Febrero 2019].
- [47] I. Perez, «Criptonoticias: Suecia concluye con éxito prueba de registro de propiedad basado en blockchain,» [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/aplicaciones/suecia-concluye-exito-prueba-registro-propiedad-basado-blockchain/>. [Último acceso: 1 Mayo 2019].
- [48] ABN-AMRO, «ABN-AMRO,» [En línea]. Available: <https://www.abnamro.com/en/index.html>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].
- [49] ABN-AMRO, «Blockchain pilot in commercial real estate,» 16 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.abnamro.com/en/newsroom/press-releases/2016/blockchain-pilot-in-commercial-real-estate.html>. [Último acceso: 14 Abril 2019].
- [50] I. Perez, «Criptonoticias: BTL Group probará transacciones energéticas en la blockchain junto a Austria,» febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/aplicaciones/btl-group-probara-transacciones-energeticas-blockchain-ey-austria/>. [Último acceso: 12 Enero 2019].
- [51] Wiener Stadtwerke, «Wiener Stadtwerke: Wien Energie testet Blockchain-Technologie,» [En línea]. Available: <https://www.wienerstadtwerke.at/eportal3/ep/contentView.do/pageTypeId/71283/programId/72211/contentTypeId/1001/channelId/-49478/contentId/1801181>. [Último acceso: 25 Enero 2019].
- [52] Interbit, «Interbit,» [En línea]. Available: <https://interbit.io/about/about/>. [Último acceso: 26 Enero 2019].
- [53] L. Esparragoza, «Criptonoticias: Compañías energéticas crean fundación para desarrollar y aplicar plataforma blockchain,» mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/comunidad/adopcion/carros-electricos-alemania-recargaran-contratos-inteligentes-basados-ethereum/>. [Último acceso: 30 Enero 2019].
- [54] Motion Werk, «Motion Werk,» [En línea]. Available: <https://motionwerk.com/#development>. [Último acceso: 3 Febrero 2019].
- [55] Share & Charge, «The share&charge solution,» [En línea]. Available: <https://shareandcharge.com/solution/>. [Último acceso: 14 Febrero 2019].
- [56] Share & Charge, «Oslo2Rome Tour,» [En línea]. Available: <https://shareandcharge.com/oslo-2-rome/>. [Último acceso: 21 Febrero 2019].
- [57] C. Dietrich Sümmerrmann, «OMOS,» [En línea]. Available: https://www.omos.io/wp-content/uploads/whitepaper/OMOS_concept_paper.pdf. [Último acceso: 26 Febrero 2019].
- [58] OMOS, «OMOS,» [En línea]. Available: <https://www.omos.io/>. [Último acceso: 3 Marzo 2019].
- [59] I. Perez, «Criptonoticias: Revelan prototipo de contrato inteligente para desarrolladores de videojuegos en el Reino Unido,» Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/aplicaciones/prototipo-contrato-inteligente-desarrollo-juegos-reino-unido/>. [Último acceso: 7 Marzo 2019].
- [60] F. Durrant, «Microsoft Wor,» septiembre 2016. [En línea]. Available: <http://nebula.wsimg.com/c89a91d3e60d56b45efe7fc409c41105?AccessKeyId=C527A018C673F95B6BF8&disposition=0&alloworigin=1>. [Último acceso: 9 Marzo 2019].
- [61] Hogan Lovells, «Hogan Lovells,» [En línea]. Available: <https://www.hoganlovells.com/>. [Último acceso: 15 Marzo 2019].
- [62] «Criptonoticias: Firma de abogados prueba contratos inteligentes para seguros contra terremotos,» febrero 2017. [En línea]. Available: <https://www.criptonoticias.com/aplicaciones/firma-abogados-prueba-contratos-inteligentes-seguros-terremotos/>. [Último acceso: 1 Abril 2019].

Solución Internet de las cosas para personas con movilidad reducida

Albenis Cortés R.¹
William A. Villalobos V.²
Jhonston J. Lemus C.³
Diego F. Rodríguez R.⁴
Alaira J. Vargas B.⁵

Fundación Universitaria Unipanamericana – Colombia

Este artículo presenta los resultados obtenidos en el primer Sprint de desarrollo de una solución de Internet de las cosas (IoT) dirigida a personas con movilidad reducida, a causa de distrofia muscular, y la proyección del segundo sprint como parte de un ejercicio de mejora continua. Se ha tomado como caso de estudio la situación de un joven de 17 años estudiante en una IED de la ciudad de Bogotá con esta patología. Por tratarse de una solución tecnológica, se establecen cinco etapas: la reunión de planificación de Sprint, los Scrums semanales, el trabajo de desarrollo, la revisión del Sprint, y la retrospectiva del Sprint. En el primer Sprint de desarrollo se planteó como alcance, el adaptar una silla de ruedas tradicional y garantizar: i) desplazamiento en cuatro direcciones haciendo uso de un joystick, ii) alertas tempranas como resultado de la lectura del sensor de pulso Amped a través de la plataforma Thing Speak. Las alertas tempranas envían un SMS al familiar del paciente registrado en la plataforma, indicando la alteración del pulso y la ubicación geográfica. A partir de la prueba piloto desarrollada en el primer semestre de 2019, se propone optimizar en el segundo sprint: 1) el sistema de desplazamiento de la silla implementando un sistema de reconocimiento de comandos de voz; 2) la lectura del pulso cardíaco con un desarrollo de software propio para web y móvil.

1. INTRODUCCIÓN

Hace años hablar de Internet, domótica o conectar las cosas a la web resultaba imposible de imaginar. Más aún, el llegar a pensar que esas cosas serían capaces de enviar información relevante para la toma de decisiones. Con el avance de la Internet y los desarrollos tecnológicos que han venido de la mano, el Internet de Todo (IoT) es una realidad. El campo de la salud no ha sido ajeno al impacto generado por las tecnologías, y es así, como en la actualidad se realizan microcirugías y nano-cirugías que están cambiando la vida de las personas y debatiendo el concepto de espacio-tiempo. La masificación de soluciones IoT está ligada a la incorporación de microcontroladores cada vez a precios más accesibles y el uso de sensores y actuadores que permiten articularse con códigos de programación para tomar decisiones, capturar información o generar órdenes.

Este tipo de desarrollos han logrado que los sistemas embebidos tomen cada vez más fuerza. Un Sistema Embebido es un sistema electrónico diseñado para realizar pocas funciones en tiempo real, según sea el caso, al contrario de lo que ocurre con las computadoras, las cuales tienen un propósito general, ya que están diseñadas para cubrir un amplio rango de necesidades en comparación con los Sistemas Embebidos que se diseñan para cubrir necesidades específicas.

Estos sistemas suelen ser más pequeños que un PC normal, en algunos casos del tamaño de una tarjeta de crédito, algunos otros, más pequeños o más grandes y cada uno de ellos con características especiales o particulares, de acuerdo a su desempeño y a las funciones a realizar, estos equipos están compuestos por una computadora que es el cerebro del sistema, un microcontrolador con un microprocesador con interfaces de entrada y salida. A donde miremos nos encontraremos que casi todo está controlado por este tipo de sistemas, en la Tabla 1 se pueden observar diversos circuitos controlados y algunas áreas donde se pueden aplicar. La Tabla 1, presenta la aplicación de algunos sistemas y software embebido.

Tabla 1. Aplicación de algunos sistemas y software embebidos [1], [2]

Área	Aplicación
Electrónica de consumo	Lavadoras, congeladores, microondas, Smart Tv, consolas de juegos, cámaras de videos, DVDs, GPS, TV digital.
Sistemas de Comunicación	Contestadores, sistemas de telefonía, PDAs, celulares, enrutadores, sistemas de redes.
Industria	Monitoreo, control, instrumentación, control de tráfico, manejo de códigos de barras, rastreo, ascensores, cámaras de vigilancia, puntos de servicio, radares.
Automóviles	Inyección electrónica, frenos, elevavidrios, geoposicionamiento, control de asientos, seguridad, control de asientos e instrumentación
Medicina	Monitores cardíacos, renales, de apnea, diálisis, marcapasos, de alineación, etc.
Sistemas con Software Libres	GNU Linux (Knopix, dynebolic), Lego Mindstorms (LegOS, Noga) PC Engines (tinyBIOS) con routers inalámbricos. Proyecto WEP wireless embedded plataform, microprocesador inalámbrico. Proyectos RedBoot y Ecos (RedHat), entre otros.

¹ albeniscortes@unipanamericana.edu.co

² wvillalobos@unipanamericana.edu.co

³ jjlemus@unipanamericana.edu.co

⁴ dfernandorodriguez@unipanamericana.edu.co

⁵ ajazminvargas@unipanamericana.edu.co

El lograr que una silla de ruedas convencional se adapte para funcionar en forma eléctrica, inteligente o auto controlada, depende de su sistema central, el cerebro que también es llamado tarjeta inteligente. Entre las tarjetas más populares están Arduino y Raspberry, existen otras, pero estas dos son las más usadas en los proyectos de estudiantes, emprendedores, desarrollares y todo aquel que le guste la tecnología, así no tenga el mayor conocimiento en programación y desarrollo en código, estas tarjetas tienen un sistema de entrada y de salida, significa que reciben información, la procesan, la controlan y con ella dan ordenes o funciones a otro dispositivo o parte del circuito. Es así, como para el primer sprint se incorporó Arduino como tarjeta con microcontrolador que permite activar los motores para hacer girar las ruedas de una silla convencional, controlar una palanca o joystick, y capturar el pulso cardiaco.

2. MÉTODO

El método de investigación seleccionado es el estudio de casos, el cual busca ahondar en la especificidad de las condiciones de movilidad de un joven de 17 años con distrofia muscular para comprender las necesidades del joven e identificar los requerimientos funcionales y no funcionales de una solución IoT. Por tratarse de una solución tecnológica, se establecen cinco etapas: la reunión de planificación de Sprint, los Scrums semanales, el trabajo de desarrollo, la revisión del Sprint, y la retrospectiva del Sprint. A continuación, se detalla cada una de ellas:

1. *Etapa 1:* Planificación de Sprint. En esta etapa se busca comprender las características de la distrofia muscular, su clasificación y cómo afecta la movilidad de las personas que la padecen. De igual forma, se busca comprender el funcionamiento técnico de las sillas de rueda convencional, eléctricas e inteligentes con el fin de planificar el desarrollo. En esta etapa se realiza el levantamiento de los requerimientos funcionales y no funcionales de la solución. De igual forma, se realiza la selección de componentes a partir de sus atributos técnicos.
2. *Etapa 2:* Scrum semanales. En esta etapa se revisa el avance del proyecto a partir de la planificación realizada.
3. *Etapa 3:* Trabajo de desarrollo. etapa se realizó la adaptación de la silla ruedas convencional para brindarle funcionalidades de silla eléctrica controlada por un joystick. Adicionalmente, se incorpora un sensor de pulso Amped y se programa un sistema de alertas temprana que informe a un familiar del paciente vía SMS la alteración del pulso cardiaco y la ubicación geográfica del paciente.
4. *Etapa 4:* Revisión del Sprint. En esta etapa se hizo entrega de la solución al joven para probar su funcionalidad.
5. *Etapa 5:* Retrospectiva del Sprint. En esta etapa se valoran los resultados del piloto y se proyectan los requerimientos funcionales y no funcionales del siguiente sprint de desarrollo.

3. RESULTADOS

3.1 Etapa 1: Planificación de Sprint

3.1.1 Distrofia muscular

La distrofia muscular (DM) comprende un determinado grupo de enfermedades provocadas por defectos en los genes de una persona, es decir, es un trastorno genético (hereditario) de los músculos, provocando su debilitamiento, al pasar el tiempo los músculos se degeneran y son sustituidos por depósitos adiposos existen varios tipos de distrofia muscular y afectan grupos determinados de músculos, en algunos casos especifican la edad en los cuales aparecen los síntomas, estos aparecen en la infancia o la niñez, otras se manifiestan hasta la mediana edad o después, variando su gravedad, el paciente puede empeorar a medida que los músculos se debilitan, incluso el paciente puede perder la capacidad de caminar, perder movilidad en miembros superiores, capacidad del habla [3], [4], [5].

La palabra distrofia deriva del griego dis, que significa "difícil" o "defectuoso," y trof, o "nutrición, La distrofia muscular puede generar además problemas del corazón o cardiacos, también pueden generar escoliosis, obesidad, afectar el sistema gastrointestinal, las glándulas endocrinas, la columna, los ojos, el cerebro, entre otros. Las enfermedades cardiacas y respiratorias son muy comunes. En el cuerpo se encuentran los genes, al interior de las células, en los cromosomas, normalmente los seres humanos tienen 23 pares de cromosomas, es decir un total de 46 cromosomas, los primeros 22 están presentes tanto en hombres como en mujeres, el último par de cromosomas es el encargado de determinar el género, son conocidos como par de cromosomas sexual, las mujeres tienen dos cromosomas X, y los hombres tienen un cromosoma X y un cromosoma Y. Las distrofias musculares son enfermedades heredadas que implican una mutación en uno de los miles de genes que programan las proteínas y que a su vez son relevantes para la integridad muscular, cuando una proteína se altera o se produce en cantidad insuficiente, incluso puede pasar que falte por completo lo que provoca que una célula no funcione correctamente [6].

Las distrofias musculares pueden heredarse de tres maneras: Herencia dominante autosómica: El gen se encuentra en uno de los 22 pares de cromosomas no sexuales o autosomas, se presenta cuando el alelo alterado es dominante sobre el normal, basta una sola copia para que la enfermedad se muestre, puede afectar tanto a hombres como a mujeres, el alelo alterado se puede haber heredado tanto del padre como de la madre, cada persona afectada tiene

muy probablemente un progenitor afectado y hay probabilidad del 50% de que cada hijo (a) herede este alelo defectuoso y por tanto la enfermedad. La herencia recesiva autosómica: Se presenta cuando ambos padres tienen el gen defectuoso, pero no está afectado por la enfermedad, sus hijos tienen una probabilidad del 50% de heredar un gen defectuoso, este patrón hereditario puede ser contraído por hombres y mujeres igualmente. Herencia recesiva ligada al sexo (X): Los hijos hombres heredan un cromosoma X de la madre y un cromosoma Y del padre, las hijas mujeres heredan un cromosoma X de cada uno de sus padres, la distrofia se produce cuando la madre es portadora del gen afectado el alguno de sus cromosomas X y lo transmite, los hijos hombres tienen una probabilidad de 50% de heredar la enfermedad, las hijas mujeres tienen una probabilidad del 50% de heredarlo también solo que generalmente no se ven afectadas debido a que el cromosoma X sano que reciben de su padre compensa el gen defectuoso recibido de la madre, en el caso que el padre sea el portador del gen defectuoso X este no lo pueden heredar a sus hijos hombres, por el contrario las hijas mujeres si serán afectadas por la distrofia solo que con síntomas más leves [6].

- *Tipos de distrofias musculares.* A continuación, se presenta la clasificación de la distrofia muscular:
 - *Distrofinopatías:* La distrofia muscular de Duchenne (DMD), y la distrofia muscular de Becker (DMB) son las distrofias musculares más comunes de herencia recesiva, ligadas al cromosoma X, afectando a uno de cada 3.500 niños. Se caracterizan por debilidad y atrofia muscular proximal y luego distal, estas son progresivas. La DMD conduce a la muerte alrededor de los 20 años, en consecuencia, de problemas respiratorios o cardíacos, mientras que la DMB permite una supervivencia mejor que puede alcanzar los 50 – 60 años [7]. La Tabla 2 presenta las características de los pacientes con DMD y DMB.

Tabla 2. Características de los pacientes con DMD y DMB [7]

Tempranas	Lentitud en la marcha
	Retardo en el lenguaje
	Retardo en el desarrollo general
Intermedias	Dificultad para caminar
	Caídas frecuentes, bamboleo al caminar
	Marcha en la punta de los pies
	Atrofia muscular de predominio proximal
Tardías	Pseudohipertrofia de gemelos
	Perdida de la habilidad para deambular
	Debilidad en los miembros superiores
	Contracturas articulares y tendinosas
	Insuficiencia cardíaca

Nota: Algunos pacientes presentan retardo mental leve, pero esto es poco frecuente

- *Distrofia muscular de Duchenne (DMD).* La distrofia muscular de Duchenne (DMD) es una enfermedad heredada recesiva ligada al cromosoma X, causada por una mutación en el gen de la distrofina, es la distrofia muscular más frecuente en el ser humano, este gen se encuentra en el cromosoma Xp21.2, está formado por 79 exones y tiene una extensión de 2,3 Mb, la distrofina es el producto funcional del gen, sus mutaciones dan lugar a DMD (OMIM 310200), así como a la distrofia muscular de Becker y la cardiomiopatía. Cuando la distrofina está presente, la distribución de las fuerzas mecánicas se lleva a cabo de manera coordinada, en las células musculares, pero cuando hay una deficiencia de esta, la célula es sensible al estrés mecánico, la infiltración anormal de calcio, lo que produce la destrucción de la fibra muscular. Afecta principalmente a los hombres. La causa de esta enfermedad es la deficiencia de una proteína denominada distrofina, que se encuentra en la cara citoplasmática del sarcolema y este maneja las fibras musculares. Hasta hace algunos años no existían muchos tratamientos, hoy en día se han realizado más investigaciones que han permitido modificar la historia natural de la enfermedad, permitiendo que los pacientes que la padecen puedan llegar a la edad adulta [6].

Los pacientes con esta enfermedad presentan debilidad de los músculos de la cintura pélvica, pseudohipertrofia de gemelos, que son detectados antes de los 5 años, los pacientes pierden la capacidad de caminar alrededor de los 9 años de edad, esto ocasiona enfermedades como escoliosis en un 75% de los casos, cuando las funciones cardíacas y respiratorias no están muy comprometidas se puede realizar una cirugía para corregirla, la edad óptima está entre los 11 y 13 años, esto le permitirá al paciente mantener el balance postural, esta debilidad también afecta a los músculos respiratorios lo que produce insuficiencias respiratorias en un 75% de los casos y/o cardíacas en un 25% de los casos, lo que finalmente produce la muerte. Teniendo en cuenta lo anterior es importante realizar un seguimiento a estas condiciones para poder controlarlas, la afectación de los músculos respiratorios afecta la mecánica respiratoria lo que produce neumopatía restrictiva, que aumenta el riesgo de contraer infecciones broncopulmonares, insuficiencia respiratoria, neumonía, estos pacientes deberán ser evaluados por un neumólogo como mínimo dos veces al año, cuando dejan de caminar. La Cardiomiopatía dilatada es una complicación frecuente de los pacientes con DMD, sus síntomas se presentan en etapas tardías de la enfermedad, las lesiones aparecen a temprana edad, pero permanecen estáticas durante años, la valoración cardiológica se debe realizar cada 2 años, hasta que el paciente tenga 10 años y posteriormente esta valoración será bianual. [8]

- *Distrofia muscular de Becker (DMB)*. Este tipo de distrofia es hereditaria, los músculos esqueléticos y del corazón se atrofian, y se debilitan progresivamente, afecta a los hombres principalmente, sus síntomas inician alrededor de los 5 y 15 años, es una enfermedad similar a la DMD, pero cuyas manifestaciones clínicas son menos graves, estos pacientes pueden llegar a vivir hasta los cuarenta años o más de edad, tienen dificultad para caminar, caídas frecuentes, dificultad para saltar o correr, pierden masa muscular y en algún momento podrían llegar a necesitar sillas de ruedas, al igual que la distrofia muscular de Duchenne puede ocasionar cardiomiopatía dilatada, consecuencia de que el bombeo de la sangre no es suficiente, la DMB puede ocasionar problemas cognitivos, fatiga, dolor muscular, aumento de los músculos de la pantorrilla, problemas para respirar. La DMB es causada por mutaciones en el gen DMD, que produce una proteína llamada distrofina, que ayuda a estabilizar y proteger las fibras musculares, la DMB provoca que las células musculares se dañan cuando los músculos se contraen y se relajan y este movimiento con el tiempo hace que se debiliten y mueran, lo que da lugar a sus síntomas. No existe cura para esta enfermedad, pero los tratamientos buscan aliviar sus síntomas y mejorar la calidad de vida del paciente, La DMB se hereda de forma ligada al cromosoma X, en los hombres una copia mutada del gen en cada célula puede causar esta enfermedad, en el caso de las mujeres para que presenten la enfermedad los dos genes deben presentar la mutación, los padres no pueden pasar rasgos ligados al cromosoma a sus hijos o hijas, Las mujeres que portan el gen X tienen 50% de riesgo de transmitir el gen mutado a cada hijo, los niños tienen riesgo del 50% de ser afectados y las niñas 50% de ser portadoras, las mujeres portadoras no tienen síntomas de la enfermedad. [9]
- *Distrofina muscular Emery-Dreifuss (DMED)*. Este tipo de distrofia se caracteriza por contracturas tempranas en los codos, cuello y tendón de Aquiles, al igual que otros tipos de distrofia también presenta debilidad muscular, problemas cardiacos, se ve comprometido también el musculo esquelético, estos síntomas pueden variar dependiendo del paciente. Los genes que causan la mutación de este tipo de distrofia son: el gen EMD, FHL1, LMNA los dos primeros relacionados al X. [10]
- *Distrofia muscular Facioescapulohumeral (DFEH)*. No son muchos los casos reportados de este tipo de distrofia, se estima que tiene una prevalencia de 1 por 20.000 habitantes, aunque cerca de un 15% de los pacientes afectados llega a depender de una silla de ruedas, los pacientes en su mayoría logran llevar una vida con normalidad, una de las características es que afecta de manera asimétrica los músculos de la cara, la cintura escapular, los pacientes presentan debilidad en los músculos peroneos y de la cintura pelviana, muy pocas veces presentan problemas cardiacos [11]. La Tabla 3, presenta las características clínicas y de laboratorio de 7 pacientes con diagnóstico de DMFEH.

Tabla 3. Características clínicas y de laboratorio de 7 pacientes con diagnóstico de DMFEH [11]

Sexo	Edad Inicio	Edad Consulta	Motivo	Presentación ¹	Asimetría	Historia familiar	EMG	CK	D4Z4 ²	
1	F	23	24	Dolor pie derecho dificultad marcha	F, H, B, T, C, E	Si	No	Patrón miopático	395	8
2	F	13	44	Debilidad de ambos brazos	F, H, B, T	Si	Padre, abuelo, tía, prima	Patrón miopático	85	7
3	F	59	60	Dolor y debilidad hombro derecho	F, H, B, T, C, E	Si	Hermana de paciente 5 años	NR	ND	10
4	F	10	36	dificultad para elevar brazos	H, B, T, E	Si	No	NR	ND	8
5	M	55	61	Caída del pie derecho	H, B, T, E	Si	Hermano de paciente 3 años	NR	174	NR
6	M	15	18	Dolor Hombro derecho	H, B	Si	No	NR	ND	10
7	M	29	33	Dolor y debilidad de hombros	F, H, B, T	Si	Hijo de paciente 2 años	NR	158	NR

¹ F: facial, H: hombro, B: brazo, T: tronco, C: cadera; M: muslo, P: pantorrilla, E: Extensores del pie. ² Fragmento de contracción de región D4Z4 (doble digestión). ND: no disponible. NR: no realizado.

3.1.2 Atrofia muscular Werdnig-Hoffmann

La Atrofia muscular espinal (AME) de la infancia, es una enfermedad neuromuscular hereditaria, degenerativa y fatal para los pacientes que la padecen, afecta las motoneuronas de la medula espinal, representa la segunda causa de muerte de las enfermedades Autosómicas recesivas, después de la fibrosis quística, puede afectar a una persona en cualquier edad o sexo, se clasifica de acuerdo a la edad de comienzo, signos clínicos, y severidad de la enfermedad [12]. La Tabla 4 presenta la clasificación de la atrofia espinal de la infancia.

Tabla 4. Clasificación de la atrofia espinal de la infancia [12]

Tipo I - infantil	Manifestaciones clínicas antes de los 6 meses, deterioro progresivo, peor pronóstico, fallecen antes de los 2 años
Tipo II - intermedia	Manifestaciones clínicas de los 6 hasta los 18 meses fallecen a los 4 años
Tipo III - juvenil	Manifestaciones clínicas de 8 meses a los 17 años mejor pronóstico, forma crónica
Tipo IV - Enfermedad de Fazio-Londe	Parálisis bulbar progresiva

3.1.3 Funcionamiento técnico de las sillas de rueda convencional, eléctricas e inteligentes

Para hablar de la existencia y/o desarrollo de la silla de ruedas no es posible precisar en qué año se crearon, pues a lo largo de la historia, existieron prototipos, elementos y máquinas similares que llevaron a la creación de la silla de ruedas que hoy en día es conocida convencionalmente en el mundo. La única información encontrada para la primera silla creada, es el nombre que se le otorgó a estas sillas el cual fue dado por “el monarca Felipe II” y creada por un inventor desconocido. Por lo tanto, y como es de saber, las sillas de ruedas fueron construidas para el desplazamiento de personas con dificultades motrices, ya sea por circunstancias temporales como lesiones, o definitivas debido a alguna enfermedad o accidente.

Esto llevó a que las personas con este tipo de limitaciones optaran por vivir la mayor parte de su vida en una silla de ruedas, permitiéndoles una mayor autonomía e independencia en la realización de sus actividades diarias. Ahora bien, existe una gran variedad de diseños y prototipos de una silla de ruedas, sin embargo, el propósito de esta investigación está contemplado en las sillas eléctricas e inteligentes. Hoy en día, con el avance tecnológico del mundo y el continuo desarrollo de aparatos electrónicos, se han visto algunas novedades e innovaciones con las sillas de ruedas, vemos ahora que algunas son eléctricas siendo éstas más sofisticadas y con buena capacidad de transporte; logrando así, que los diferentes desarrollos en ellas suplan las necesidades básicas de una persona con problemas en sus extremidades inferiores y estén en pro del bienestar de las personas.

- *Sillas de ruedas eléctricas.* El material más usado para la fabricación de las sillas de ruedas es el aluminio por su resistencia y durabilidad, existen plegables o no plegables, según el tipo de silla y sus características; algunas son desmontables o para doblar, facilitando su transporte en vehículos y aviones. Sin embargo, existen otras sillas eléctricas que debido a su mecanismo y ubicación de las baterías y el motor no se pueden doblar, desmontar o plegar. Este tipo de sillas se encuentran conformadas por uno o dos motores eléctricos con potencias de 200 a 300 Vatios en su gran mayoría; para su alimentación se usan baterías recargables de 12V de litio o Gel que pueden llegar a tener una autonomía desde 10 Km a 25 Km según la capacidad, el peso de la persona, también se debe considerar el tipo de terreno e inclinación. Son controladas por un Joystick, Palanca o Mando, ubicado en los descansabrazos, izquierdo o derecho según gusto o necesidad de la persona con ajuste de altura.

Por seguridad estas sillas de ruedas deben tener un límite de velocidad si se refiere al uso doméstico el cual está en un máximo de velocidad de 15 Km/h. A pesar de las diferentes tipologías de sillas, la mayoría de estas tienen uso en el hogar, por lo tanto, para un óptimo manejo estas deben medir entre 60 y 70 cm de ancho, para que puedan pasar por las puertas, quedando 5 cm a cada lado de la silla teniendo en cuenta la medida de ancho de las puertas convencionales (80 cm).

- *Mecanismos y dispositivos de conducción de las sillas de ruedas.* Para comenzar es importante entender qué es una silla de ruedas autónoma o inteligente, este tipo de sillas se describe como sillas inteligentes, que están desarrolladas con el objetivo de reducir el trabajo del usuario en relación con la movilidad, este tipo de movimiento depende de las circunstancias que se encuentren las personas y van más enfocadas a personas que tienen su motricidad reducida o la están perdiendo a media del tiempo o avance de la enfermedad. Ahora bien como se componen este tipo de tecnologías a una silla normal, teniendo en cuenta que hay muchas piezas que la componen con su respectivo funcionamiento, para este tipo de sistemas tenemos entre una particularidad importante y la clave de todo es la parte electrónica y de sensores, que me define la diferencia entre una silla eléctrica normal a una silla autónoma o inteligentes, estos tipos de elementos deben de ser resistentes pequeños, ligeros, precisos y de bajo costo ya que la implementación de este tipo de tecnologías enfocadas a IoT y que cuyo objetivo principal sean de bajo costo, ahora bien este tipo de sensores nos ayudan a que la silla obtenga información y sea transmitida y almacenada en un servidor, para que los datos recolectados puedan ser analizados dependiendo del caso y de conformidad con la enfermedad que tenga cada paciente, para su monitoreo y control.

Actualmente existen varias formas de implementar un sistema inteligente en una silla de prueba para la movilidad de la persona con condición de incapacidad, en lo que se ha manifestado en el artículo referente a la distrofia muscular, esta puede avanzar y atacar de distintas formas al sistema muscular, no todas las enfermedades comienzan o avanzan igual, de la investigación realizada vamos a explicar con detalle los que más se utilizan de acuerdo a cada caso y en particular para el paciente del estudio [13].

- *El corazón, frecuencia cardíaca y el pulso.* El corazón es el órgano responsable de bombear la sangre por todo el cuerpo. Se encuentra casi en el centro del tórax, ligeramente desplazado a la izquierda y rodeado por los pulmones. El corazón está compuesto por cuatro cavidades; dos aurículas y dos ventrículos. La aurícula derecha recibe la sangre que vuelve al corazón de todo el cuerpo. La sangre pasa a través del ventrículo derecho y se bombea a los pulmones, donde se oxigena y luego regresa al corazón a través de la aurícula izquierda, a continuación, la sangre pasa a través del ventrículo izquierdo y es bombeada de nuevo para ser distribuida a todo el cuerpo a través de las arterias [14]. Frecuencia cardíaca: El corazón tiene como tarea hacer fluir la sangre por el cuerpo, para esto necesita contraerse y expandirse. La velocidad de contracción del corazón también se conoce como la frecuencia

cardíaca. Esta es la cantidad de pulsaciones o contracciones por minuto (p.p.m) que realiza el corazón, lo cual corresponde a la cantidad de veces que el corazón se contrae en un minuto [15]. Los valores normales para la frecuencia cardíaca en reposo se muestran en Tabla 5, dependiendo de la edad y el sexo. La tabla V, presenta la frecuencia cardíaca por edad y sexo. En ella se muestra la frecuencia cardíaca de una persona en condiciones óptimas y un buen estado de salud, cabe aclarar que cualquier alteración o enfermedad podría cambiar estos valores.

Tabla 5. Frecuencia cardíaca por edad y sexo [16], [17]

Edad	Sexo Femenino	Sexo Masculino
1 a 2	Entre 80 y 130 puls/min	Entre 80 y 130 puls/min
3 a 4	Entre 80 y 120 puls/min	Entre 80 y 120 puls/min
5 a 6	Entre 75 y 115 puls/min	Entre 75 y 115 puls/min
7 a 9	Entre 70 y 110 puls/min	Entre 70 y 110 puls/min
10 a 19	Entre 60 y 100 puls/min	Entre 60 y 100 puls/min
20 a 29	Entre 70 y 84 puls/min	Entre 78 y 94 puls/min
30 a 39	Entre 72 y 84 puls/min	Entre 80 y 96 puls/min
40 a 49	Entre 74 y 88 puls/min	Entre 80 y 98 puls/min
50 a 59	Entre 74 y 88 puls/min	Entre 84 y 102 puls/min
60 a 100	Entre 76 y 90 puls/min	Entre 88 y 106 puls/min

El ritmo del pulso: es la medida de la frecuencia cardíaca, es decir, del número de veces que el corazón late por minuto. Cuando el corazón impulsa la sangre a través de las arterias, éstas se expanden y se contraen con el flujo de la sangre. Al tomar el pulso no sólo se mide la frecuencia cardíaca, sino que también puede indicar el ritmo del corazón y la fuerza de los latidos, el pulso normal de los adultos sanos oscila entre 60 y 100 latidos por minuto de acuerdo a la Tabla 5. El pulso podría fluctuar y aumentar con el ejercicio, las enfermedades, las lesiones y las emociones. Las niñas a partir de los 12 años y las mujeres en general suelen tener el pulso más rápido que los niños y los hombres [18].

Hay varias formas de tomar el pulso para poder medir la frecuencia cardíaca, palpar con las yemas de los dedos, los principales puntos donde se puede medir son, pulso temporal, carotideo, humeral, tibial posterior, poplíteo, pedio, central o apical, y radial. En los hospitales, centro de atención de usuarios y profesionales de la salud cuentan con diferentes mecanismos (Tabla 6) para poder medir, analizar y controlar la frecuencia cardíaca, pero estos equipos son demasiado costosos y muy grandes ya que cuentan con un monitor tipo PC o TV pequeño, pero en el mercado se pueden conseguir dispositivos más pequeños y portables para pacientes que requieren tener un control más regular en las siguiente tabla se indican cuáles son los más destacados y sus características importantes.

Tabla 6. Dispositivos portables para medir la frecuencia cardíaca [19], [20], [21]

Dispositivo	Descripción	Observaciones
Finger Clip	Se puede colocar en el dedo o en el oído, se consigue en el mercado y que por medio de una aplicación al celular indica la frecuencia cardíaca máxima y mínima.	Requiere de una aplicación y en particular de un celular para el funcionamiento, donde se visualiza, la información y análisis de la frecuencia.
Pulseras cuantificadoras Fitness	En forma de pulsera con una pequeña pantalla led, donde indica la frecuencia cardíaca, medidor de pasos y de distancia, de altura, cuantificación de sueño, de actividad, como Fitbit Charge HR.	Resistente al agua hasta 10 metros, funciona a altas temperaturas hasta 113°C, y la batería puede durar hasta 5 días continuos, algunos son resistentes al agua hasta 10 metros.
Relojes Smart Health	Sistema de pulso como los relojes deportivos cuenta con un sistema GPS que indica la distancia recorrida, la frecuencia cardíaca, esta información puede ser enviada vía bluetooth a un celular o a un PC, como el reloj Polar M400+sensor de Frecuencia cardíaca.	La batería recargable puede durar hasta 8 horas continuas, y tiene una resistencia al agua con una profundidad de 30 metros.
Oxímetro de pulso dactilar	Medidor de oxígeno de la sangre dactilar de alta precisión y durabilidad, mide las pulsaciones del corazón y la saturación, como el Sport Guard Oled SpO2.	Consumo de batería bajo hasta 50 horas de uso continuo, cuenta con un sensor de apagado al no recibir señal después de 8 segundos.
Smart Watches	Relojes inteligentes, que dentro de funciones aparte de dar la hora, cuentan con sistema GPS, barómetro, acelerómetro, giroscopio, medidor de pasos y los más importen en caso todos ellos el medidor de frecuencia cardíaca, como el iWatch de Apple o el Gear de Samsung.	Algunos y más sofisticados aparte de tener sistema de conectividad bluetooth, cuentan con Wifi y NFC.
Correa de Pecho	La mayoría de estos dispositivos se conectan vía <i>bluetooth</i> , son más precisos que los relojes inteligentes siempre que estén ajustados son especializados para atletas y personas que hacen ejercicio regularmente, como la Garmin HRM Tri, que sirve para personas que quieren medir su frecuencia cardíaca cuando nadan	Si se llegan a de desajustar, aparte de no medir con precio pueden ser incómodos porque se deslizan se mueven y puede causar rozaduras, otra desventaja es que no muestra la información hasta que se conecta a un dispositivo como celular, un pc o las maquinas compatibles para hacer ejercicio, algunas cuentan con sistema resistente al agua hasta 50 metros.
Audífonos	Aparte de ser un dispositivo para escuchar música recibir llamadas cuenta con varios sensores para fitness y salud estos dispositivos cuentan con un sensor biométrico para medición de la frecuencia cardíaca, como los audífonos buds de Samsung	Alcanzan una duración de hasta 24 horas continuas, con escuche recargable, por si solos no funciona tienen que estar conectados a un celular u otro dispositivo para poder revisar la información capturada.

3.1.4 Requerimientos funcionales

De acuerdo con lo anterior, para el primer Sprint de desarrollo se definió adaptar una silla de ruedas tradicional y garantizar: 1) desplazamiento en cuatro direcciones con joystick, 2) alertas tempranas como resultado de la lectura del sensor de pulso Amped a través de la plataforma Thing Speak. Las alertas tempranas envían un SMS al familiar del paciente registrado en la plataforma, indicando la alteración del pulso y la ubicación geográfica.

3.2 Etapa 2: Scrum semanales

En este apartado se realiza la explicación técnica del diseño y desarrollo de la solución para una persona con movilidad reducida a causa de una distrofia muscular. Dicha solución se basa en la tecnología IoT, que articula: sensores, actuadores, controladores e información en la nube. Este es el resultado de los Scrum semanales realizados.

3.3 Etapa 3: Desarrollo

3.3.1 Decisiones técnicas

- *Silla de ruedas.* Se tomó como referencia el Manual de una silla con referencia McKesson 18" Seat convencional Manual. Esta referencia es la actualmente utilizada por el paciente.
- *Motores y batería.* Con el fin de garantizar el desplazamiento de la silla, se calculó el total del peso a mover y de esta forma seleccionar los motores necesarios. En este cálculo se utilizó el peso del joven y el peso de la silla:
Peso del joven: 70 kilos
Peso de la silla: 38 libras = 19 kilos
Total = 89 kilos

Con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos de peso necesarios para movilizar la silla se implementan motores elevavidrios genéricos, comúnmente utilizados en camionetas, los cuales poseen un piñón situado en el centro para realizar el giro. Inicialmente, se consideró el uso de una cadena de bicicleta que permitiría el engranaje con la llanta trasera de la silla de ruedas; sin embargo, se observó dificultad debido a que el motor podría presentar afectaciones y se podía dañar; adicionalmente, no se logró garantizar la fuerza necesaria para el desplazamiento, por lo tanto, fue descartado.

En cuanto a la batería se garantiza una carga de 8 horas (Figura 1) considerando que el paciente se encuentra estudiando en nivel de secundaria. Se implementó la referencia Magna MF-12N9-4N de 12V recargable que se utiliza con mayor frecuencia en motos y en los motores eléctricos elevavidrios. Se toma como criterio de selección, las especificaciones técnicas y la compatibilidad electrónica con los demás módulos del proyecto. Esta batería tiene un método de recarga de 10 minutos con duración de 6 horas. Es de considerar, que se debe conectar de forma correcta para no generar afectaciones en los dispositivos, como, por ejemplo, que se quemen. Esta batería es instalada en la parte inferior, situada en la estructura plegable de la silla, con el fin de aprovechar el tornillo de agarre y que no sea incómoda para el paciente. Inicialmente, se planificó un bolsillo en el espaldar de la silla para la batería, sin embargo, en la prueba se visualizó que esta no es viable porque impide cerrar la silla. De igual forma, considerando condiciones ambientales se ubicó en un lugar donde no se moje por la lluvia y se pueda llegar a generar un corto circuito.



Figura 1. Pruebas de batería [23]

- *Uso de joystick y sensor de pulso.* Actualmente, existen muchas sillas eléctricas las cuales permiten que las personas se auto movilicen, estas acciones lo realizan a partir de un sistema eléctrico y por medio de un joystick que utiliza el usuario para que se ejecuten las acciones de desplazamiento, pero bien este sistema solamente lo

utilizan las personas que no tiene movilidad en sus extremidades inferiores pero que cuenta con casi toda la movilidad en el resto de su cuerpo, pero para personas que van perdiendo a medida del tiempo la movilidad del resto de sus extremidades se deben diseñar o construir un mecanismo que no lo limite a mover un joystick. Este tipo de tecnologías se consiguen hoy en día en el mercado pero a un costo muy alto, no todas las personas tiene los recursos para adquirir este tipo de tecnología , sin embargo jóvenes estudiantes se dan la tarea de crear un dispositivo que se pueda integrar en cualquier silla normal y que con los componentes necesarios y que ya están fabricados se logre implantar este tipo de dispositivos de bajo costo y que a su vez sean resistentes, para ejecutar la tarea de mover una persona, Hoy en día y para satisfacer cualquier proyecto utilizan tecnología muy básica y la acomoda a carcasas diseñadas en impresoras 3d para que tengan una vida útil más larga [22]. El paciente tiene movilidad reducida en la mano izquierda, por lo tanto, se adapta la solución para que con la mano derecha se pueda coordinar el desplazamiento de la silla con ayuda de un joystick y la mano izquierda se aprovechará para realizar el monitoreo constante del pulso cardiaco.

- *Rueda de fricción.* De acuerdo a indagaciones de cómo ejercer la fricción en las ruedas se realizaron pruebas funcionales con múltiples referencias considerando materiales y eje central, pero no fue posible conseguir una llanta con el tamaño del piñón del motor. Por lo anterior, se eliminó el piñón y se realizó una adaptación de la pieza entre la llanta y el motor. De esta forma, se garantizó la unión de estos dos elementos con el fin de tener un mejor agarre, para que en el momento de poner en funcionamiento el motor, la rueda de fricción no se salga de este eje (Figura 2). Para realizar este montaje se utilizó *epopsica* (mezcla que permite pegar dos piezas del mismo material).

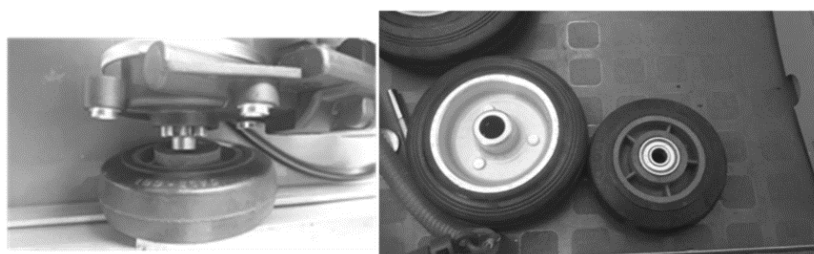


Figura 2. Pruebas con la rueda de fricción [23]

Posteriormente, se realizaron pruebas para verificar que le motor tuviera la potencia suficiente (20 Watts), estas se realizaron instalando el motor directamente alimentado con una batería de 12V, obtenido la prueba exitosa. Estas pruebas permitieron determinar la importancia de la distancia entre las llantas, dado que si quedan muy separadas no se generaría la fricción entre estas; de igual manera con las pruebas se logró visualizar que en uno de los motores el piñón y la llanta quedaron muy separados por lo cual fue necesario realizar modificaciones. El microcontrolador va a permitir que el motor avance hacia adelante, atrás, derecha e izquierda siendo conectado a los pines análogos 6,7,8,9 de un Arduino Uno y controlado por un Joystick. Para verificar su funcionamiento se implementan 4 leds que permiten conocer la dirección de la orden, derecha, izquierda, adelante y atrás.

Se implementó un puente H L298N. Este es un módulo para Arduino trabaja a 5V hasta 12V, tiene un jumper, que al retirar llega hasta un voltaje de 32V. Para el fin de este proyecto se realizó la conexión de los pines 6,7,8,9 del Arduino a las borneras del puente H, EN1 EN2 EN3 EN4, y en los 3 conectores unidos que cumplen la siguiente función 12V, GND y 5V, de los cuales se conectaron 12V a positivo y GND al negativo de la batería además se conectó el GND el cable verde del Arduino. También se conectaron los motores al positivo y GND en los 2 conectores azules. Se conecta a la entrada de 12V y con el Jumper para habilitar el regulador, aclarando que el voltaje de la fuente es el que soporta el motor. De esta forma la entrada de 5V no debe estar conectada a ninguna fuente, ya que en este pin están presentes 5V a través del regulador interno; pero se puede utilizar este pin como una salida de 5V, pero sin exceder los 500mA de consumo. Se recomienda hacer esta conexión para voltajes menores de 12V para no sobrecalentar el regulador utilizando dos fuentes, una de 5V conectada a la entrada de 5V (puede ser los 5V de un Arduino) y otra fuente con el valor del voltaje que trabaja el motor, conectada al pin de 12V. Para esto se tiene que desconectar el Jumper lo que deshabilitará al regulador.

3.3.2 Implementación de un sistema de alerta temprana asociada a la alteración del pulso cardiaco

IoT ha incursionado en todos los campos y todas las ciencias, dentro de ellos, el de la salud. Los familiares de pacientes crónicos han encontrado en esta tecnología una posibilidad para realizar seguimiento y control, no solo de la enfermedad, sino el funcionamiento de los órganos y funciones vitales de los pacientes. Un factor importante para personas con enfermedades crónicas y más los pacientes con distrofia muscular que debido a su estado de salud delicado y deterioro de algunos músculos y sistema motriz como se explicó anteriormente, ameritan un seguimiento regular y en pacientes un control más continuo, lo que genera en la mayoría de los casos inconvenientes logísticos y molestias en algunos pacientes al querer buscar verificar del estado general de salud de dichos pacientes en todo momento. Es debido a esto y a la patología de los pacientes con distrofia muscular un elemento primordial es poder

monitorear es el ritmo cardiaco, como completo al primer sprint del proyecto de convertir una silla convencional a eléctrica y que adicional lograra medir el ritmo cardiaco por medio de un sistema de alerta temprana al joven de 17 años del caso de estudio. Pero antes de indicar en que consta este sistema, es necesario conocer algunos aspectos relevantes en cuanto a que es el ritmo cardiaco, forma y dispositivos para medirlo y porque es parte fundamental del proyecto y como se es el funcionamiento de alerta.

- *Diseño y forma de usos del dispositivo de alerta cardiaca.* Con base a la anterior y en vista que los sistemas de monitoreo de control son en la mayoría de los casos demasiado grandes (centros de salud y hospitales) y costosos (los portables), se hace necesario poder construir un sistema de monitoreo y de alerta temprana para el joven con distrofia muscular y de alguna manera poder tener una alerta cuando se sufra de un cambio drástico en la frecuencia cardiaca y ser notificados a sus familiares indicando aparte de sus latidos del corazón la ubicación de georreferenciación, este sistema lo componen: una placa Arduino, un sensor de pulso Amped, un monitor de ritmo cardiaco AD8232 que medirá la actividad eléctrica del corazón que se produce por cada latido del corazón, para así poder encontrar patrones y diferencias, tomando la señal de entrada y que debe ser entre 0 - 3.3 voltios que viene del sensor de pulso Amped, el cual recibirá la lectura de las pulsaciones por medio de un infrarrojo para poder obtener la frecuencia cardiaca.

La señal será amplificada con el monitor AD8232, esta información llegara a la tarjeta Arduino que procesara la información que llega analógicamente para poderla transmitir por el módulo GSM y que envíe la información para ser analizada en la plataforma ThingSpeak que es una plataforma que está enfocada en el análisis de información IoT, que para este caso adicional de capturar la información enviada desde el dispositivo de alerta ayudara a que esta información se logre visualizar de forma gráfica como los monitores que tiene los centros de hospitalario, la frecuencia cardiaca del paciente igual que como si se estuviera realizando un electrocardiograma, después de esto y analizando los datos y los rangos que se hayan configurado en el código para Arduino conforme a la frecuencia del paciente, el sistema valorara si hay frecuencias mínimas o máximas para poder enviar una alerta a los familiares del joven indicando su frecuencia en caso de que haya alguna alteración en su ritmo adicional enviara la ubicación donde se encuentra por medio de la longitud y latitud, para que sus familiares determinen si es una emergencia y llevarlo de inmediato a una hospital o centro de salud más cercano.

3.4 Etapa 4: Revisión del Sprint

3.4.1 En relación con la silla de ruedas tradicional

Se modificó una silla de ruedas manual y se convirtió en una silla de ruedas eléctrica por medio de motores elevadores utilizados en camionetas, acordes a la condición de salud del Johan teniendo en cuenta su peso, logrando una alta potencia, para la alimentación del sistema se utilizó una batería ubicada estratégicamente para no generar afectación en la movilidad del paciente. Para lograr esto se utilizó una rueda de fricción (es un sistema de transmisión circular que permite transmitir el movimiento, la potencia y la fuerza desde un motor hasta un receptor), el control de la silla se realizó por medio de un Joystick compuesto por dos potenciómetros que controlan el eje X y Y están relacionado con el movimiento, utilizando una tarjeta controladora conocida como Arduino.

3.4.2 En relación con los sensores

Por medio de un lector electromagnético se envía información del pulso cardiaco, ubicado en los dedos de la mano derecha ya que no se encuentran afectados por la enfermedad.

3.4.3 En relación con el monitoreo

El Módulo Nodemcu ESP8266 que es el módulo Wifi de Arduino, se utilizó para enviar la información obtenida por el sensor de ritmo cardiaco a Internet a la plataforma de estadística ThinkSpeak, en dicha plataforma se pueden observar las alteraciones o variaciones del pulso cardiaco del joven.

3.5 Etapa 5: Retrospectiva del Sprint

Con el objetivo de mejorar de manera continua la productividad y la calidad del producto e identificar el engranaje logrado entre los miembros del equipo a partir de la última iteración teniendo como meta el logro del objetivo propuesto, se desarrolla la retrospectiva del Sprint a partir de la cual se ha logrado determinar el plan de acción de mejora de la solución. A continuación, se resume lo identificado. Teniendo en cuenta que la distrofia muscular reduce la movilidad de los pacientes (dependiendo del tipo y gravedad de la misma), cuando la persona pierde la movilidad de los miembros inferiores la silla de ruedas se convierte en su sistema de desplazamiento, por tal motivo es de vital importancia que está cumpla con ciertas características, las sillas de ruedas convencionales permiten al paciente desplazarla por medio de la fuerza de sus manos y brazos, esto aplica cuando la enfermedad no impide mover los miembros superiores, pero la distrofia muscular de Duchenne y Becker por ejemplo, que son las más agresivas

generalmente impiden su movimiento, dependiendo de qué tan avanzada este en el paciente, la silla de ruedas convencional limita su movilidad e independencia, esto puede tener implicaciones psicológicas en el individuo y hacerlo más dependiente de las personas o persona encargado de su cuidado. Teniendo en cuenta lo anterior se han implementado a lo largo de los últimos 10 años soluciones tecnológicas que permiten su desplazamiento por medio de Joystick, comandos de voz, movimientos oculares, con los músculos fáciles entre otros, permitiendo al paciente mayor independencia lo que mejora su calidad de vida y la de las personas que lo rodean.

De acuerdo con los resultados de encuestas realizadas por el Hospital Hines VA, y Centro de Investigación y Desarrollo en Rehabilitación [24], se identificó que los pacientes que deben hacer uso de las sillas de ruedas no saben cómo maniobrarlas, aun después de tomar un breve curso, el proceso de adaptación y control del sistema para hacerla mover se les dificulta, ya que cada enfermedad se debería tomar cada una por separado. Los pacientes con distrofia muscular deberían tener mayor atención y cuidado no solo con la enfermedad, también el de poder adecuar la silla de ruedas a las necesidades conforme a su discapacidad y de cómo va evolucionado su distrofia y de acuerdo a como va perdiendo la movilidad de su sistema muscular y motriz. De esta forma, cada enfermedad debería haber un tipo de silla y componentes de control especial. Es por eso y después de validar y comparar los dos tipos de tarjetas inteligentes entre Arduino y Raspberry. La Tabla 7 presenta el comparativo entre placas, para ajustarse a las necesidades del proyecto. No se descarta el uso de la tarjeta Raspberry PI en el segundo sprint.

Tabla 7. Comparativa de las tarjetas Arduino más usadas [25]

Name	Processor	Operating /Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
101	Intel@ Curie	3.3 V / 7-12V	32MHz	6/0	14/6	-	24	196	Regular	-
Mega 2560	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/6	1	2.5	32	Micro	1
MKR 1000	SAMD21 Cortex-M0+	3.3 V / 5V	48MHz	7/1	8/4	-	32	256	Micro	1
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Zero	ATSAMD21G18	3.3 V / 7-12 V	48 MHz	6/1	14/10	-	32	256	2 Micro	2
Due	ATSAM3X8E	3.3 V / 7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Leonardo	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Nano	ATmega168	5 V / 7-9 V	16 MHz	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini	1
	1					2	32			

Otro factor importante en esta investigación es analizar y evaluar cuál puede ser el mejor dispositivo que interactúe con la tarjeta Arduino para recibir las órdenes y que la silla pueda moverse a cualquier dirección, y de los diferentes mecanismos y en vista de la enfermedad del paciente de estudio que es la distrofia muscular de Duchenne, se ha definido que la mejor forma como el usuario de la silla podría maniobrar su silla sin un asistente y posteriormente sin el joystick, es por medio de comando de voz, aunque es necesario poder profundizar un poco más en el historial clínico del paciente y confirmar si esta enfermedad podría afectar prontamente su sistema lingüístico que es manejado por el cerebro y el sistema nervioso.

De acuerdo a las indagaciones realizada de las tecnologías disponibles para la transformación de la silla tradicional y mejorar el producto obtenido en el primer Sprint, se presenta a continuación las tecnologías susceptibles de ser adaptadas y se define una de ellas para iniciar el proceso de planificación. La Tabla 8, presenta los requerimientos funcionales del segundo sprint de desarrollo.

Tabla 8. Requerimientos funcionales del segundo sprint de desarrollo [26], [27]

Tecnología	Descripción
Expresiones de usuarios	Este sistema consiste en el movimiento de la silla inteligente de acuerdo a gestos o señales Electrooculograficas por medio de los ojos, este tipo de sistema puede llegarse a implementar para personas con limitaciones en su movilidad para que pueda controlar el movimiento de la silla a través de los músculos oculares, el sistema esta implementado en una etapa inicial de procesamiento del envío de las señales donde se adquiere, se amplifica y se filtrar las señales análogas que viene de dichos músculos hacia el sistema que reconoce y transforma las señales a digitales, enviando esta información para ser procesada por la tarjeta Arduino donde ejecuta las acciones de movimiento según lo deseado por usuario.
Autonomía de la silla	Este tipo de sistema se define de acuerdo a la necesidad de movilidad del usuario, por medio de un asiste que lo movilizara a lugares determinados que estén configurados en la tarjeta Arduino, por medio de geoposicionamiento se pueden configurar rutas y ser grabadas en la tarjeta, esto también nos ayuda a una movilización constante que el usuario tenga que realizar en casa, el asistente lo puede controlar cualquier persona como lo es el acompañante por si el paciente no puede por temas de salud. Este sistema simplemente está conectado a la silla de ruedas y configuradas las rutas realizara su movilización cada vez que el usuario lo desee.
Reconocimiento de voz	Cuando la DM tiene un avanza del más del 90% el paciente ya no tiene movilidad en su cuerpo por lo que solamente puede realizar movimientos con su rostro y voz, se desarrollara un sistema inteligente por medio de comando de voz en el cual consiste en que el paciente por medio de la voz de las ordenes al sistema y se ejecute una acción. El sistema esta con puesto por un módulo de reconocimiento de voz en donde el usuario puede dar las instrucciones verbales y la silla ejecutara las ordenes moviéndose automáticamente hacia la posición dada por el usuario.

Señales o Pulsos Neuronales	Este sistema es un poco más complicado de desarrollar ya que debe de realizarse el estudio de la parte cerebral y su funcionamiento, el sistema está compuesto por medio de sensores electrodos que permite la lectura y trasmisión de la señal del cerebro al dispositivo, el cual procesa este tipo de señales y envíe los comandos a ejecutar en la tarjeta inteligente implementada para la movilización, ahora bien, este sistema está en pruebas de prototipo no es concreto que vaya a funcionar al 100%, respecto a las pruebas puede de que el modelo se adecue a un usuario específico dado de que no se pueda generalizar el sistema.
Teclado Virtual para la comunicación a través de eventos acústicos	Como alternativa para el caso en que el paciente pierde la movilidad de su cuerpo y también el habla, como otro tipo de alternativa para él envío de señales neuronales, existe la forma de que el usuario pueda crea o transmitir su información a través de un teclado virtual, el cual permite a través de un evento crear un carácter o línea de caracteres para la construcción de un mensaje el cual se envía a la tarjeta inteligente y ejecute una acción programada de movilidad permitiendo que el usuario pueda moverse libremente sin limitación.

3.5.1 Decisiones para el segundo Sprint

En relación con las tecnologías que no serán consideradas:

- Expresiones de usuarios, este tipo de sistema no abarcara en el objetivo principal del proyecto ya que por el momento el paciente no ha perdido toda la movilidad de su cuerpo ni el habla, pero para una proyección a mediado plazo de acuerdo como avance la DM, estar entre las opciones para un siguiente sprint.
- Autonomía de la silla: Este sistema tiene como limitación la movilización del paciente libremente, por lo que se busca que la silla no sea autónoma, pero para pacientes que no salen de casa es uno de los sistemas más viables ya que tendrá las rutas definidas en su configuración.
- Señales o Pulsos Neuronales: Este estudio no es viable, dado de que hay que tener un estudio más amplio y preciso en la parte del cerebro humano y su funcionamiento, además de que está en su etapa de pruebas y no hay resultados que ameriten trabajar este tipo de sistema.
- Teclado Virtual para la comunicación a través de eventos acústicos: No se tiene proyectado trabajar este tipo de tecnología, pero a futuro de la situación del paciente o para otros casos es viable aplicarla.

Por lo tanto, el sistema de reconocimiento de comandos de voz será considerado en la planificación del segundo Sprint del proyecto.

4. CONCLUSIONES

Este capítulo muestra una reseña de las posibles enfermedades que se pueden clasificar de la distrofia muscular, cuáles son sus características y algunos de sus síntomas, también nos brinda un breve conocimiento de cómo han evolucionado las sillas de ruedas y hasta donde podemos llegar a diseñar por medio de los avances tecnológicos que se tiene hasta el momento, así convirtiéndolas en sillas inteligentes con diferentes especificaciones y características, este estudio también permitió conocer que no todos los pacientes, no solo los que sufren distrofia muscular, otros pacientes con otras enfermedades que limitan su movilidad no cuentan en muchos casos con los recursos económicos necesarios para poder conseguir una silla de ruedas eléctrica e imposible pensar en un silla inteligente, es por eso que aprovechando los avances tecnológicos, Internet y que a nivel mundial se ha despertado un espíritu innovador en donde muchas personas hoy en día buscan diseñar, renovar, inventar cosas con y sin conocimiento en programación, aumentado el mercado laboral, la competitividad buscando que las cosas sean mejores, logrando satisfacer las necesidades de los usuarios y llegar a un mejor confort y estilo y calidad de vida para los pacientes y sus familiares.

El conocimiento adquirido a través de cada sprint de desarrollo hace posible formular mejoras. Es por esto, que el segundo, estará enfocado en optimizar el desarrollo en aras de ofrecer a las personas que no cuentan con los recursos económicos para adquirir sillas de ruedas eléctricas o inteligentes una solución de calidad que ayude a mejorar la calidad de vida. De igual forma, se quiere aprovechar las potencialidades de IoT para hacer monitoreo al comportamiento del corazón, a través del ritmo cardiaco, generando propuestas de valor a la toma de decisiones en este campo asociado a la enfermedad de referencia.

REFERENCIAS

- [1] P. Arevalo, «Sistemas embebidos,» 6 Junio 2016. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/8332293/A07_Sistemas_Embebidos.
- [2] Semantic Web Builder, «Sistemas embebidos: Innovando hacia los sistemas inteligentes,» Febrero 2016. [En línea]. Available: http://www.semanticwebbuilder.org.mx/es_mx/swb/Sistemas_Embebidos_Innovando_hacia_los_Sistemas_Inteligentes_.
- [3] Centros para el control y la prevención de enfermedades, «Distrofia Muscular: Información básica sobre la distrofia muscular,» 16 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.cdc.gov/ncbddd/spanish/musculardystrophy/facts.html>.
- [4] Stanford Children's, «Muscular dystrophy,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.stanfordchildrens.org/en/topic/default?id=muscular-dystrophy-90-P02771>.
- [5] Medline Plus, «Distrofia muscular,» 11 Marzo 2010. [En línea]. Available: https://medlineplus.gov/spanish/musculardystrophy.html#cat_83.

- [6] National institute of neurological disorders and stroke, «Distrofia muscular,» 30 Diciembre 2016. [En línea]. Available: https://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/distrofia_muscular.htm.
- [7] C. Silva, D. Fonseca, H. C. N. Mateus y C. Restrepo, «Distrofia muscular de Duchenne y Becker Una visión molecular,» *ACTA MÉDICA COLOMBIANA*, vol. 30, nº 3, p. 5, 2005.
- [8] L. Lopez, N. Vázquez y E. Luna, «Distrofia muscular de Duchenne: actualidad y perspectivas de tratamiento,» *Revista Neuronal*, vol. 49, nº 3, pp. 369-375, 2009.
- [9] NIH, «Centro de Información sobre Enfermedades genéticas y raras (GARD,» 9 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://rarediseases.info.nih.gov/espanol/13098/distrofia-muscular-de-becker>.
- [10] V. Zubiri, O. Gerardi, N. Medina, A. Taratuto, J. Huamanchumo, M. Lopez, V. Aladino, G. Gargiulo, D. Gonzales, M. Cordoba, S. Rodriguez, G. Volman, M. Kauffman y A. Ucelli, «Distrofia muscular de Emery-Dreifuss: la importancia de un estudio ordenado a partir de la clínica y una correcta caracterización etiológico-molecular,» *Neurología Argentina*, vol. 7, nº 3, pp. 171-175, 2015.
- [11] G. Cea y D. Jimenez, «Distrofia muscular facioescapulohumeral en Chile: presentación de serie en hospital de referencia terciario,» *Rev Med Chile*, nº 143, pp. 304-309, 2015.
- [12] S. Martinez, E. Lancheros y J. Rodriguez, «Síndrome de Werdnig-Hoffmann (atrofia muscular espinal de la infancia: Presentación de un caso y revisión en la literatura,» *Revista Médica UNAB*, vol. 13, nº 2, pp. 116-122, 2010.
- [13] G. Manjunath, Artist, *Autonomous wheelchair with a smart driving mode and a WiFi positioning system*. [Art]. School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria, 2018.
- [14] C. Casillas, «Heart rate monitor and electrocardiograph fundamentals,» *Application Note, Freescale Semiconductor*, pp. 1-22, 2010.
- [15] P. Training, «Pulso, reposo,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.changewithpaleo.com/test-pulso-reposo>.
- [16] J. Hernández, «Frecuencia cardiaca,» 3 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.mundoatletismo.com/Site/atletismopopular/01d67c944b0dec402.html>.
- [17] M. Plus, «Pulso,» 10 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003399.htm>.
- [18] W. Volg, R. Drake y A. Mitchell, *Anatomía para estudiantes*, 3ra Edición ed., Amsterdam: Gray - Elsevier, 2015.
- [19] Consalud, «Unos auriculares inalámbricos miden el ritmo cardiaco gracias a un sensor biométrico,» 4 Septiembre 2016. [En línea]. Available: https://www.consalud.es/tecnologia/unos-auriculares-inalambricos-miden-el-ritmo-cardiaco-gracias-a-un-sensor-biometrico_29495_102.html.
- [20] P. Velázquez y L. Villagrán, Artists, *Monitor de ritmo cardiaco para dispositivos android mediante un enlace bluetooth*. [Art]. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de Culhuacán, 2016.
- [21] G. Andrade, Artist, *Diseño e implementación de un módulo didáctico para la medición del ritmo cardíaco mediante la técnica de pulsometría*. [Art]. Universidad de las Fuerzas Especiales ESPE, 2015.
- [22] S. Robotics, «Electric wheelchair kit,» 3 Julio 2008. [En línea]. Available: <https://docs.google.com/document/d/1Flv7uNClvOijLe7h66AhiZqFkpVH0gaxODXEzmz30hE/edit#>.
- [23] T. Bobadilla, H. Correa, C. Duarte, F. Prieto y A. Cortés, Artists, *Solución IoT para una persona con movilidad reducida a causa de una distrofia muscular de Duchenne*. [Art]. Fundación Universitaria Unipanamericana – Compensar, 2005.
- [24] L. Fehr, E. Langbein y S. Skaar, *Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities*, Hines Illinois, Estados Unidos.: A Clinical Survey, 2000.
- [25] Arduino, «compare Board Specs,» 1 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/products.compare>.
- [26] Vasquez y I. Haas, «Aplicación de técnicas electrooculográficas en el control de una silla de ruedas eléctrica para personas con discapacidad motriz,» *Memorias del XL Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, vol. 4, nº 1, pp. 234-237, 2017.
- [27] J. Valero, B. Yedith, C. Sandoval y C. Duque, «Sistema de control de una silla de ruedas para seguimiento automático,» de *X Congreso Anual de Ingeniería Asme Usb*, Caracas, Venezuela, 2016.
- [28] S. Guevara, Artist, *Adquisición de señales electroencefalografías para el movimiento de un prototipo de silla de ruedas en un sistema BCI*. [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2012.
- [29] J. Sanchez y J. Jiménez, «Teclado virtual para personas con enfermedades neuromusculares accionado a través de un evento acústico,» *Revista Politécnica*, vol. 12, nº 22, pp. 33-40, 2016.
- [30] J. Alcubierre, J. Minquez, L. Montesano, L. Montano, O. Saz y E. Leida, «Silla de ruedas inteligente controlada por voz, Primer Congreso Internacional de Domótica,» de *I Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos*, Zaragoza, España, 205.

Estudio térmico y de dinámica de gases de la implementación del motor PT6A-65B en la aeronave CESTOL Skyron

Germán Reyes R.¹
Luis A. Hernández C.²
Federico Riveros G.³
Rafael M. Cerpa B.⁴

Universidad de San Buenaventura Bogotá – Colombia

En este documento se presenta el análisis realizado al motor PT6A-65B para determinar las características del ciclo térmico y el estudio de las tres etapas del compresor axial y una etapa de la turbina axial. Se realizó el análisis para encontrar la operación óptima del motor que será implementado en una aeronave CESTOL para la industria aeronáutica colombiana. Se encontró que la altura óptima de operación de la aeronave en crucero es de 25000 ft; en la que se tendría el menor consumo de combustible, garantizando una potencia de 1000 hp (requerimiento de selección). Adicionalmente, se realizó una optimización térmica inicial, para lograr una disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno. La comparación entre el ciclo de GasTurb, y el ciclo térmico modelado siguiendo a Antas y Wolanski, reveló una semejanza entre los dos métodos y permitió la validación de los resultados del ciclo. Se obtuvieron los triángulos de velocidad para el compresor y la turbina diseñados, así como la variación de los ángulos desde la raíz hasta la punta del álabe. Finalmente, se calcularon los esfuerzos a los que son sometidos los álabes de la turbina. Del estudio se concluye que el motor PT6A-65B se puede implementar en la aeronave Skyron, ya que proporciona la potencia requerida por la aeronave para las condiciones de vuelo planteadas, asegurando asimismo el mínimo consumo de combustible.

1. INTRODUCCIÓN

En la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, se viene trabajando en el diseño de una aeronave Cruise Efficient Short Takeoff and Landing (CESTOL). Dicho estudio preliminar requiere analizar, mediante el estudio térmico y de dinámica de gases, la implementación del motor PT6A-65B en la aeronave. Para esto, se realizaron tres estudios diferentes: en primer lugar, se desarrolló el modelamiento del ciclo térmico del motor en el programa GasTurb 11, con el fin de obtener la parametrización y optimización del ciclo térmico. Esto permitió encontrar la altura ideal de operación para la aeronave, el flujo másico de aire requerido, y el consumo de combustible. Además, se pudo realizar un análisis de las emisiones del motor.

Posteriormente, se realizó el análisis termodinámico del ciclo del motor siguiendo la metodología de Antas y Wolanski, lo cual permitió encontrar los parámetros térmicos en diferentes puntos del motor, para comparar el ciclo con los resultados obtenidos en GasTurb. Por último, se realizó el estudio del compresor y la turbina siguiendo la metodología de Cohen, Rogers y Saravanamutto, para obtener los triángulos de velocidad y para realizar el análisis de los ángulos de deflexión del aire a través de las etapas diseñadas. Además, esta metodología de diseño permitió definir los esfuerzos en la turbina, y la eficiencia de una etapa de compresor y de turbina.

2. MÉTODO

2.1 Requerimientos de la aeronave CESTOL Skyron

La aeronave Skyron presenta los siguientes requerimientos para su diseño, como se indica en la Tabla.

Tabla 1. Requerimientos aeronave Skyron

Requerimiento	
Categoría	FAR 23
Acceso a pistas no preparadas	
Carga	19 pasajeros o 2 toneladas
Short Takeoff and Landing	
Cruise Efficient	
Cabina presurizada	
Bimotor, turbo-hélice	
Longitud de pista para aterrizaje y despegue	900 m
Potencia requerida del motor	1000 hp

2.2 Simulación del ciclo térmico en GasTurb 11

- *Análisis del ciclo simple.* Se realizó el análisis del ciclo simple del motor en GasTurb, para tener un análisis a partir del cual se pudiera hacer la parametrización y optimización del ciclo. Se asumió una altitud de 15000 ft,

¹ gereyes@academia.usbbog.edu.co

² lahernandezc@academia.usbbog.edu.co

³ friveros@academia.usbbog.edu.co

⁴ ing.decano@usbbog.edu.co

considerando un cambio de temperaturas respecto al modelo de atmósfera estándar (ISA) de +21.9 K. Además, se consideró la humedad relativa del aire de 80 %, y una operación a una velocidad de 250 nudos, o un número de Mach de 0.38. El flujo másico de entrada se tomó de 9.5 lb/s [1], la pérdida a la entrada del difusor se asumió como 99%, la relación de compresión está dada dentro de las condiciones del proyecto y es de 9.0, el certificado tipo del motor indica una temperatura a la entrada de la turbina de 1083 K [2], y establece que la cantidad máxima de aire que se puede sangrar del motor es el 5.25 % del aire de entrada [2], es decir, 0.226 kg/s.

Por otra parte, según los manuales de operación del sistema de propulsión se conoce que la turbina de potencia rota a 1870 RPM y la del eje de generación de gas es de 39000 RPM. [2] Se recomienda una velocidad de 350 m/s en la punta del álabe a la entrada del compresor [3]. Todas las eficiencias de los elementos fueron tomadas de [4]. Resumiendo, se tienen los siguientes valores de entrada, mostrados en la Tabla.

Tabla 2. Parámetros de entrada ciclo simple GasTurb

Parámetro	Unidad	Valor
Altitud	m	4572
Delta Temperatura ISA	K	21.9
Humedad relativa	%	80
Número de Mach		0.38
Flujo másico de entrada	kg/s	4.31
Pérdida en el difusor		0.99
Relación de compresión		9
Temperatura de entrada de la turbina	K	1083
Sangrado de aire	kg/s	0.226
Potencia extraída	kW	5.0
Poder calorífico de combustible (JP-4)	MJ/kg	43.323
Velocidad nominal turbina de potencia	RPM	1870
Velocidad en el tip del compresor	m/s	350
Velocidad del eje de generación de gas	RPM	39000
Eficiencia del diseño de cámara		0.97
Eficiencia mecánica del eje de alta presión		0.97
Eficiencia mecánica del eje de baja presión		0.97
Eficiencia isentrópica del compresor		0.77
Eficiencia isentrópica de la turbina de alta presión		0.88
Eficiencia isentrópica de la turbina de potencia		0.88

- *Análisis paramétrico del ciclo.* El análisis paramétrico del ciclo en GasTurb se realizó para obtener la altura de operación y el flujo másico de aire y combustible que se requieren para unas condiciones de potencia y consumo específico, dadas en el planteamiento del proyecto y en el certificado tipo [2]. Se requiere que el motor entregue una potencia de 1000 hp (745 kW) con un consumo específico de combustible de 0.557 lb/hp*h (0.339 kg/kW*h). En el análisis paramétrico, se comparó la potencia entregada por el motor y el consumo específico respecto al flujo másico de aire, la altura de vuelo, el delta de temperatura ISA, la temperatura de entrada de la turbina y el flujo másico de combustible.
- *Optimización del ciclo.* Una vez evaluados los parámetros de operación del motor, se realizó la optimización del ciclo para una altura de operación de 25000 ft, planteando las siguientes variables (Tabla) y restricciones (Tabla) para optimizar el ciclo térmico.

Tabla 3. Variables para el proceso de optimización

Variable	Valor mínimo	Valor de inicio	Valor máximo
Flujo másico de entrada [kg/s]	0	4.31	20.0
Altura de vuelo [m]	7595	7600	7620
ITT	1000	1083,15	1200

Tabla 4. Parámetros restringidos para el proceso de optimización

Restricción	Valor mínimo	Valor de inicio	Valor máximo
Velocidad de vuelo [m/s]	127	127.828	128
Eficiencia isentrópica del compresor	0.769	0.77	0.771
Eficiencia isentrópica de la turbina	0.879	0.88	0.881
Presión de entrada del compresor [kPa]	41	41.704	42
Presión de salida del compresor [kPa]	371	375.366	376
Potencia entregada [kW]	130	178.5	745
Consumo específico de combustible [kg/kW*h]	0.39	0.4114	0.5

Para el proceso de optimización del ciclo, se priorizó la potencia entregada por el motor. Además, se minimizó el consumo específico de combustible y se minimizó también la temperatura ITT. En la Figura se detallan los principales puntos del motor, dados por GasTurb [5].

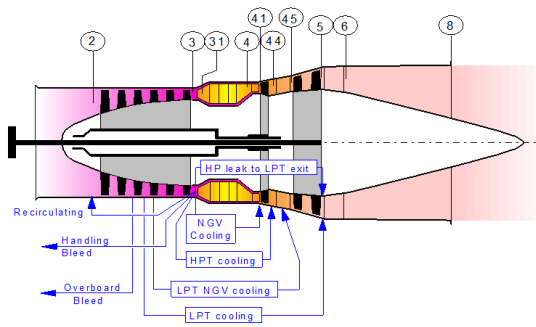


Figura 1. Etapas del motor en GasTurb [5]

2.3 Estudio del ciclo térmico siguiendo a Antas y Wolanski

Antas y Wolanski proponen una metodología de diseño que permite obtener, con base en unos datos iniciales, los parámetros térmicos del ciclo del motor: presión y temperatura en diversos puntos, consumo específico de combustible y potencia entregada. Además, se modeló la variación del consumo específico con la relación de compresión para diferentes ITT, y la potencia específica entregada respecto a la relación de compresión, también para varias ITT. El motor modelado por Antas y Wolanski se muestra en la Figura. Los valores de presión y temperatura obtenidos en el ciclo optimizado de GasTurb se compararon con los obtenidos según esta metodología, obteniéndose el diagrama P-v y el diagrama T-s del ciclo del motor.

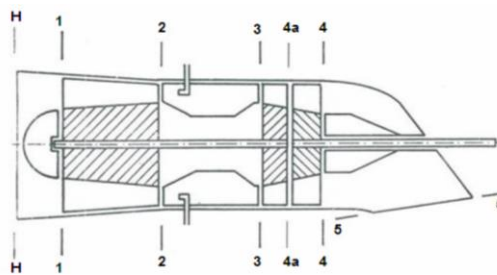


Figura 2. Etapas del motor según [6]

Es importante indicar que se decidió realizar el estudio térmico a partir de la metodología expuesta en Antas y Wolanski para comprobar los resultados obtenidos a partir del software GasTurb.

2.4 Diseño de compresor y turbina

- *Diseño de compresor.* El motor PT6A-65B tiene un compresor axial y uno centrífugo. Dentro de las condiciones del análisis, se realizará únicamente el estudio del compresor axial, teniendo en cuenta que está conformado por 3 etapas (rotor – estator). Se asumió el flujo másico de entrada optimizado en GasTurb, y se consideran las mismas eficiencias para el análisis. Además, se asume también que el aire entra completamente axial a la primera etapa del compresor. En el manual de entrenamiento del motor, se pudo determinar que la relación de compresión para el compresor axial es de 3.5 [7] Además, se mantiene la temperatura a la entrada de la turbina de 1083 K [2]. La velocidad axial del aire a la entrada del motor y la velocidad del aire en la punta del álabe a la entrada se definieron siguiendo a Saravanamuttoo [3]. Se tienen las condiciones del punto de diseño del motor dadas en la Tabla.

Tabla 5. Punto de diseño para el compresor axial

Parámetro	Unidad	Valor
Altitud	ft	25000
Relación de compresión		3.5
Flujo másico	kg/s	7.007
ITT	K	1083.15
Eficiencia politrópica		0.8273
Velocidad axial de entrada	m/s	150
Velocidad del aire en la punta del álabe	m/s	350

- *Diseño de turbina.* El motor PT6A-65B consta de una turbina para mover el compresor y otra para mover el eje de potencia, como se muestra en la Figura. Se realizará únicamente el estudio de la turbina del compresor, que es de

una sola etapa estator - rotor. Se considera que la turbina proporciona un ángulo de salida del aire de 10°. Con base en los datos del manual de entrenamiento, se calculó una relación de expansión de 1.35. [7] La presión a la entrada de la turbina se asumió de 364 kPa, considerando las pérdidas de presión en la cámara. Las principales condiciones de diseño para la turbina de presentan en la Tabl. En la Figura se muestran las piezas principales del motor PT6A - 65B, según su manual de mantenimiento [7].

Tabla 6. Punto de diseño para la turbina del compresor

Parámetro	Unidad	Valor
Altitud	ft	25000
Relación de expansión		1.35
Flujo másico	kg/s	7.007
ITT	K	1083.15
Eficiencia asumida		0.88
Coefficiente de pérdida rotor		0.05

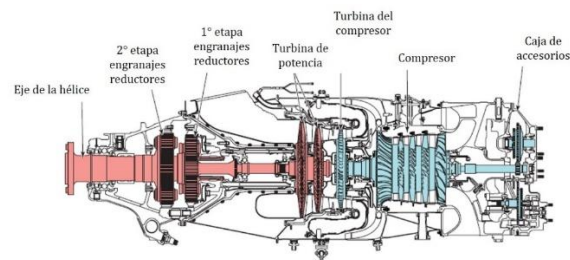


Figura 3. Elementos principales del motor [7]

3. RESULTADOS

3.1 Simulación del ciclo simple en GasTurb 11

A continuación, se muestra en la Tabla los resultados obtenidos al simular el ciclo del motor a 15000 ft de altura, sin realizar ningún proceso de optimización.

Tabla 7. Resultados ciclo simple a 15000 ft

Station	W [kg/s]	T [K]	P [kPa]	WRstd [kg/s]	PWSD	178.5	kW
Amb		280.33	57.182				
1	2.651	288.42	63.169		PSFC	0.6019	kg/(kW*h)
2	2.651	288.42	62.537	4.309	Heat rate	26076	kJ/(kW*h)
3	2.625	607.95	562.836	0.688	V0	127.84	m/s
31	2.653	607.95	562.836		FN res	-0.29	kN
4	2.282	1083.15	545.951	0.823	WF	0.02984	kg/s
41	2.282	1083.15	545.951	0.823	sNOx	0.1852	
43	2.282	740.64	92.308		Therm Eff	0.13806	
44	2.415	733.59	92.308		P45/P44	0.975	
45	2.415	733.59	90	4.35			
49	2.415	664.44	58.407		Incidence	0	°
5	2.442	662.52	58.407	6.44	P6/P5	0.98	
6	2.442	662.52	57.239		PWX	5	kW
8	2.442	662.52	57.239	6.571	P8/Pamb	1.001	
Bleed	0.239	607.95	562.834		WBld/W2	0.09033	
					A8	0.41742	m ²
Efficiencias	Isentr	polytr	RNI	P/P	TRQ	100	%
Compressor	0.77	0.827	0.617	9	P2/P1	0.99	
Burner	0.97			0.97	Loading	100	%
HP Turbine	0.88	0.8533	1.138	5.914	e444 th	0.85249	
LP Turbine	0.88	0.8738	0.295	1.541	WHcl/W2	0.05	
Generator	1				PW_gen	178.5	kW
HP Spool mech Eff		0.97	Nom Spd	39000	WLcl/W2	0.01	
PT Spool mech Eff		0.97	Nom Spd	1870	eta t-s	0.84117	
hum [%]	war0	FHV	Fuel				
80	0.00898	43.323	JP-4				

Se pueden elaborar las siguientes observaciones al analizar la Tabla: 1) en primer lugar, se obtiene una potencia de 178.5 kW, y 2) por otra parte, el consumo específico obtenido es de 0.9895 lb/hp*h.

3.2 Análisis paramétrico del ciclo en GasTurb 11

El consumo específico de combustible, en relación con la potencia entregada por el motor, se puede modelar en forma paramétrica para ubicar el punto de diseño según los requerimientos detallados en la Sección 2.2, como se muestra en la Figura 1.

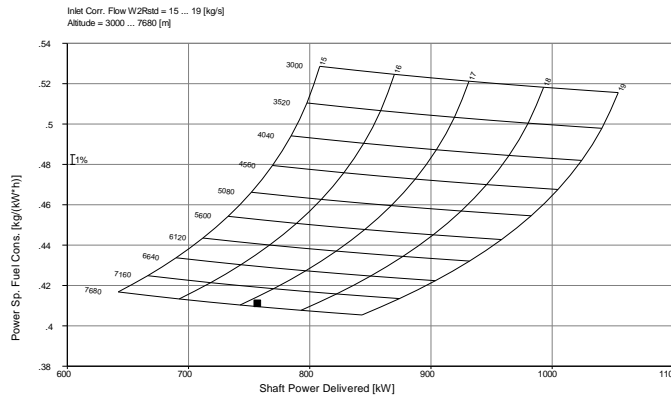


Figura 1. Vista general de la curva paramétrica

Analizando la parametrización de la potencia entregada por el motor, se observa en la Figura 2 que es necesario un flujo mássico de aproximadamente 17 kg/s para garantizar una potencia de 745 kW. Además, se tuvo un aumento del consumo específico de combustible, que deberá ser de 0.41 kg/kW*h.

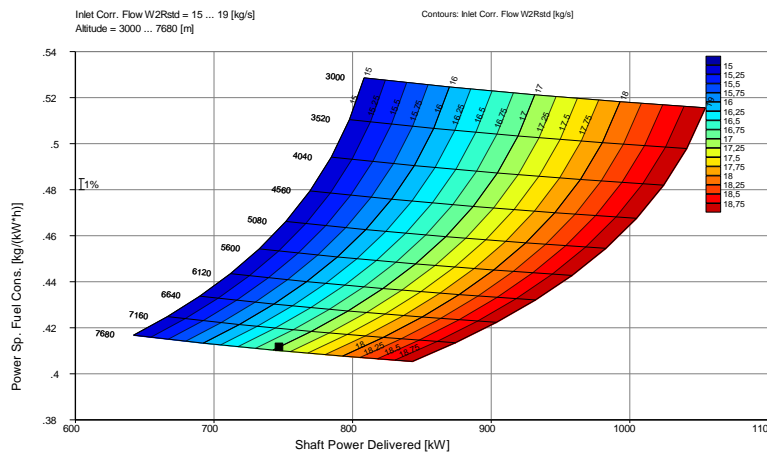


Figura 2. Curva paramétrica del flujo mássico

Dentro de las condiciones iniciales, de restringió la altura de crucero entre 10000 y 25000 ft (Estudio de rendimiento de la aeronave Skyron). Se determinó que, para obtener la potencia deseada con el menor consumo específico de combustible, es necesario mantener una altura de vuelo de aproximadamente 25000 ft. Sin embargo, el consumo específico aumentó un 18 % respecto al valor dado en las condiciones de parametrización (Figura). Habiendo definido una altura de operación óptima de 25000 ft, se realizó la optimización del ciclo considerando la operación de la aeronave a este techo de vuelo.

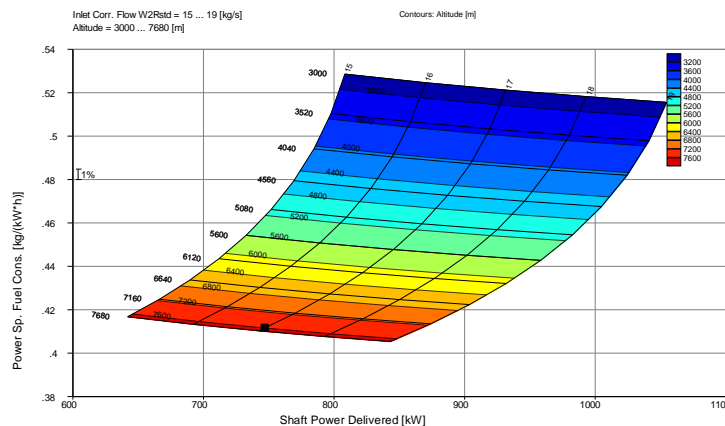


Figura 6. Curva paramétrica de la altitud

Mediante el análisis paramétrico de esta variable se demuestra en la Figura la influencia que tiene la diferencia de temperatura ISA en el desempeño del motor. Se determinó que, para garantizar el empuje requerido con un consumo específico de combustible mínimo, la temperatura ambiente deberá ser la misma temperatura ISA. Una de las ciudades donde operaría la aeronave CESTOL Skyron es Bogotá, que acorde con sus parámetros atmosféricos tendría un delta de temperatura ISA elevado.

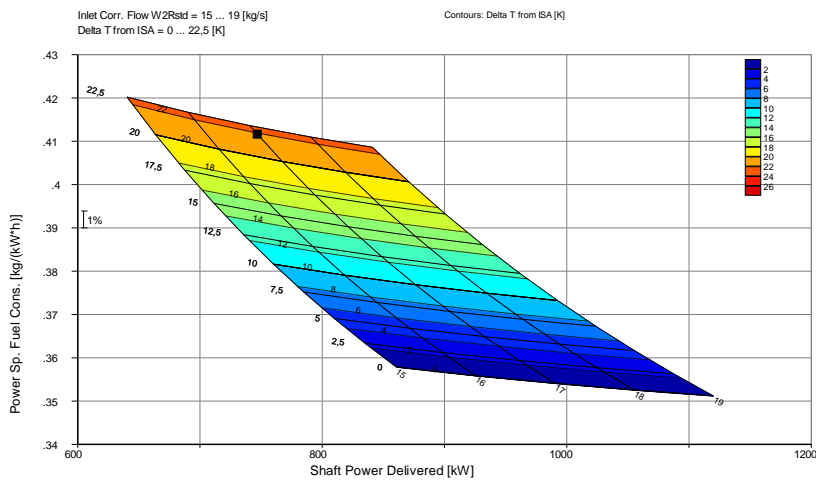


Figura 7. Curva paramétrica del delta de temperatura ISA

El estudio paramétrico de la temperatura a la entrada de la turbina permitió determinar que una reducción en la misma se traduce en un aumento del consumo específico de combustible. Por lo tanto, para garantizar la potencia entregada por el motor a un mínimo consumo específico, sería necesario aumentar la temperatura de entrada de la turbina.

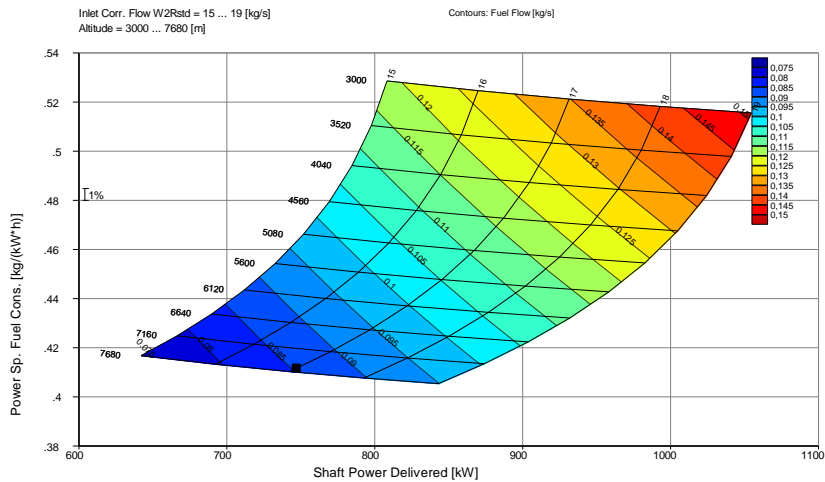


Figura 8. Curva paramétrica del flujo másico de combustible

La Figura indica la potencia producida por el sistema de propulsión, comparada con el consumo específico de combustible y flujo de combustible a diferentes alturas de operación de la aeronave. El flujo de combustible aumenta a medida que se requiera obtener mayor potencia entregada. En el caso de estudio se establece una potencia al eje específica, razón por la cual el estudio se centró en determinar el comportamiento del consumo específico de combustible y flujo de combustible a diferentes alturas. Dichos resultados serán incluidos en el manual de operaciones de la aeronave, donde se le indique a la tripulación el comportamiento de la misma en diferentes condiciones.

3.3 Optimización del ciclo térmico en GasTurb 11

A continuación, se muestra en la Tabla los resultados obtenidos al simular el ciclo del motor a 25000 ft de altura, realizando la optimización según se indica en la Sección 2.2.

Tabla 8. Optimización del ciclo a 25000 ft

Station	W [kg/s]	T [K]	P [kPa]	WRstd [kg/s]	PWSD	744.9	kW
Amb		260.67	37.728				
1	7.007	269.02	42.125		PSFC	0.4066	kg/(kW*h)
2	7.007	269.02	41.704	16.465	Heat rate	17616.2	kJ/(kW*h)

3	6.937	569.12	375.336	2.634	V0	129.59	m/s
31	6.325	569.12	375.336		FN res	-0.78	kN
4	6.409	1053.28	364.076	3.414	WF	0.08414	kg/s
41	6.409	1053.28	364.076	3.414	sNOx	0.13041	
43	6.409	752.23	76.27		Therm Eff	0.20436	
44	6.76	743.09	76.27		P45/P44	0.975	
45	6.76	743.09	74.264	14.805			
49	6.76	639.29	38.536		Incidence	0	°
5	6.83	637.43	38.536	26.734	P6/P5	0.98	
6	6.83	637.43	37.765		PWX	5	kW
8	6.83	637.43	37.765	27.28	P8/Pamb	1.001	
Bleed	0.261	569.12	375.337		WBld/W2	0.03729	
					A8	1.73154	m ²
Efficiencias	Isentr	polytr	RNI	P/P	TRQ	100	%
Compressor	0.77	0.8273	0.446	9	P2/P1	0.99	
Burner	0.97			0.97	Loading	100	%
HP Turbine	0.88	0.8566	0.784	4.773	e444 th	0.85489	
LP Turbine	0.88	0.8707	0.24	1.93	WHcl/W2	0.05	
Generator	1				PW_gen	744	kW
HP Spool mech Eff		0.97	Nom Spd	39000	WLcl/W2	0.01	
PT Spool mech Eff		0.97	Nom Spd	1870	eta t-s	0.85483	
hum [%]	war0	FHV	Fuel				
80	0.00312	43.323	JP-4				

En la Tabla se presenta la comparación de los cinco parámetros más importantes analizados en el estudio. Se comparó entre el resultado obtenido en la optimización, y el valor dado por el certificado tipo, la bibliografía revisada o el planteamiento del ciclo inicial.

Tabla 9. Comparación de parámetros principales

Variable	Valor requerido	Valor optimizado	Diferencia [%]
Temperatura de entrada de la turbina [K]	1083.15	1053.28	2.785
Potencia entregada [SHP]	1000	998.9	0.110
Consumo específico de combustible [kg/kW*h]	0.339	0.4066	19.941
Flujo másico de aire [kg/s]	4.309 (ciclo simple)	7.007 (optimizado)	164.315
Flujo másico de combustible [kg/s]	0.02984 (ciclo simple)	0.08414 (ciclo optimizado)	181.971

Se observa que se logró reducir la ITT y mantener la potencia entregada dentro de los márgenes requeridos. Sin embargo, para poder garantizar las condiciones de vuelo requeridas para la aeronave, es necesario un aumento del flujo másico de aire y de combustible en el ciclo. El análisis del ciclo termodinámico del motor en GasTurb permitió determinar también el comportamiento de las emisiones del motor durante la operación de la aeronave en fase de vuelo de crucero. Las aeronaves, debido al proceso de combustión que se da en los motores, producen emisiones como dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua, (H₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos parcialmente quemados y material particulado, entre otros [8].

Las emisiones en una aeronave se componen en un 70 % de CO₂, casi un 30% de H₂O, y el porcentaje restante de los demás compuestos emitidos. De éstos, se hace un mayor énfasis en la reducción de CO₂ y NO_x, por su influencia negativa en la salud humana y en la contaminación atmosférica. El CO₂ es uno de los agentes que más contribuyen al aumento del efecto invernadero, mientras que los NO_x, al reaccionar en la atmósfera, afectan el ozono de la misma. El CO₂ se forma de la combustión completa de los hidrocarburos que conforman el combustible. El carbono se combina con el oxígeno del aire para formar el compuesto. Por otro lado, los óxidos de nitrógeno se forman en una reacción que se da a altas temperaturas, en la que el oxígeno y el nitrógeno se combinan para formar estas moléculas [8].

3.4 Desarrollo de metodología del ciclo térmico

Siguiendo la metodología de diseño propuesta por Antas y Wolanski, se pudo determinar la variación de la presión y la temperatura con respecto a cada etapa del motor, como se muestra en la Figura. Además, los principales parámetros que caracterizan el ciclo térmico del motor PT6A-65B, según ésta metodología, son presentados en la Tabla.

La metodología desarrollada permitió también obtener la relación entre el consumo específico de combustible y la relación de compresión para diferentes temperaturas. Se realizó el modelamiento para la ITT dada por el certificado tipo [2], una temperatura superior (1200 K) y una inferior (1000 K).

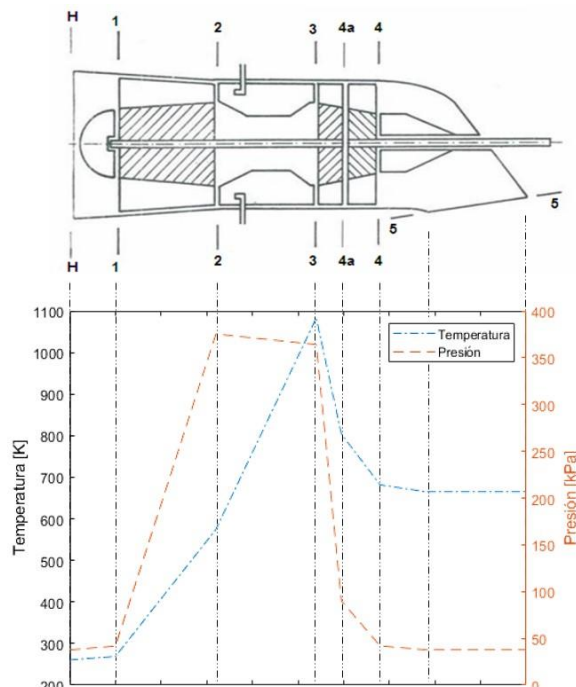


Figura 9. Variación de presión y temperatura por etapa del motor

Tabla 10. Valores de parámetros principales

Parámetro	Unidad	Valor
Relación real aire - combustible		0.014
Flujo másico de aire	kg/s	5.507
Relación de expansión turbina del compresor		4.047
Relación de expansión turbina de potencia		2.147
Relación de expansión tobera		1.111
Potencia específica al rotor	kW*s/kg	135.417
Potencia entregada	kW	723.328
Consumo específico de combustible	kg/kW*h	0.384
Velocidad a la entrada	m/s	129.455
Eficiencia termodinámica		0.223
Eficiencia global		0.216

En la Figura se observa que, a mayor relación de compresión en el motor, menor es el consumo específico de combustible. Además, a mayor temperatura de entrada de la turbina, también el consumo específico de combustible es menor. El fenómeno físico que explica el resultado de la Figura es que a medida que se incrementa la relación de compresión, la temperatura a la entrada de la cámara de combustión aumenta, lo cual, manteniendo la temperatura a la entrada de la turbina constante, requeriría menor flujo másico de combustible para llegar a la ITT deseada.

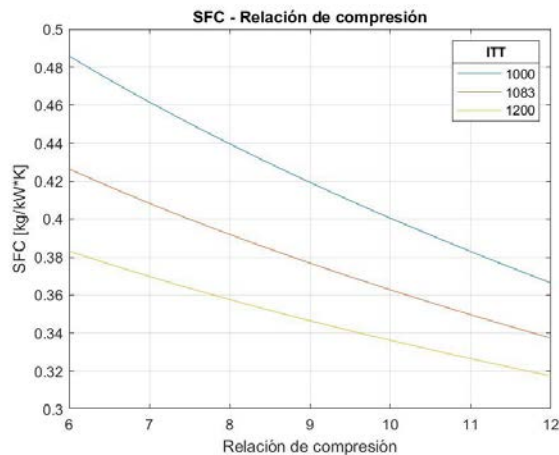


Figura 10. Variación del consumo específico respecto a la relación de compresión

También se obtuvo la curva que compara la potencia específica entregada por el motor para diferentes temperaturas, respecto a la relación de compresión. (Figura) Se determina que, conforme aumenta la relación de compresión, disminuye ligeramente la potencia específica. Además, un aumento en la temperatura de entrada de la turbina permite

obtener mayor potencia específica entregada por el motor, ya que la turbina tendría mayor energía disponible para producir trabajo.

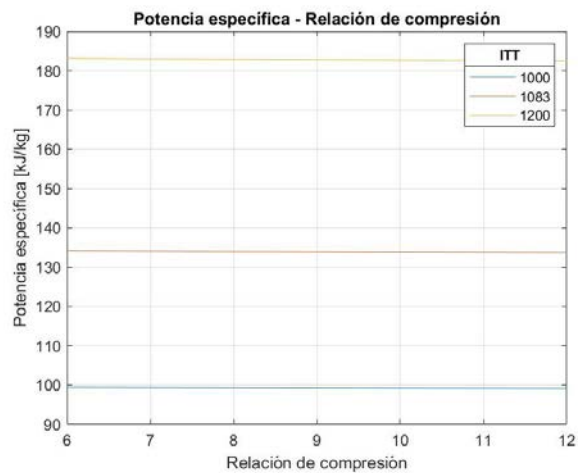


Figura 11. Variación del empuje específico y la relación de compresión

3.5 Comparación de estudio de ciclo térmico

Con los valores obtenidos para caracterizar el ciclo termodinámico del motor según dos métodos, es posible realizar una comparación de los mismos, como se muestra en la Tabla.

Tabla 11. Comparación de resultados de metodologías

Parámetro	Unidad	Valor GasTurb	Valor Metodología	Diferencia [%]
Flujo másico de aire	kg/s	7.007	5.507	21.407
Relación de expansión turbina del compresor		4.774	4.047	15.228
Relación de expansión turbina de potencia		1.930	2.147	11.244
Relación de expansión tobera		1.020	1.111	8.922
Potencia específica al rotor	kW*s/kg	106.308	135.417	27.382
Potencia entregada	kW	744.9	723.328	2.896
Consumo específico de combustible	kg/kW*h	0.4066	0.384	5.558
Velocidad a la entrada	m/s	129.59	129.455	0.104
Eficiencia termodinámica		0.20436	0.223	14.014

Se observa que los valores difieren entre sí hasta un máximo de 27 %; sin embargo, para parámetros como la potencia entregada o el consumo específico de combustible, ambas metodologías permitieron encontrar un valor muy aproximado. Por otro lado, se dibujaron los diagramas Presión-volumen específico y Temperatura-entropía, comparando los dos ciclos obtenidos (Figura 123 y Figura). Se observa en primer lugar, que los dos diagramas de Presión-Volumen específico coinciden en todos los puntos del motor. La diferencia existente se debe a que en la metodología propuesta por Antas y Wolanski no se toma en cuenta la pérdida de presión en la cámara de combustión. Por otro lado, en el diagrama Temperatura-Entropía se tiene un desplazamiento de la curva dada por la metodología de diseño de Antas y Wolanski, ya que no considera una entropía inicial, y se asume que el flujo de aire entra al motor con entropía de cero.

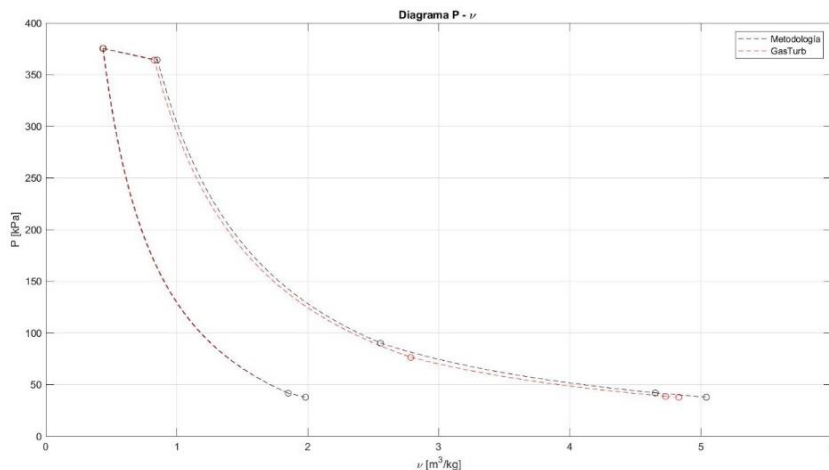


Figura 123. Comparación de diagrama P-v

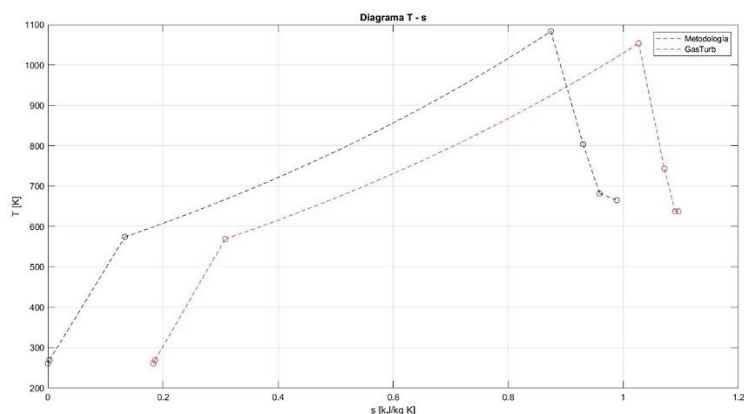


Figura 13. Comparación de diagrama T-s

3.6 Estudio del compresor axial

El primer paso en el diseño del compresor es la determinación de la velocidad rotacional y de las dimensiones de la geometría. Se asumió que el motor tendrá un radio medio constante. Dadas las condiciones iniciales de velocidad axial, velocidad en la punta del álabe, y la relación entre *tip* y *hub* del álabe, se determinaron las condiciones a la entrada y a la salida del compresor, y la geometría del mismo. Los resultados se muestran en la Tabla.

Tabla 12. Geometría del compresor

Parámetro	Entrada del compresor	Salida del compresor
Radio de punta [m]	0.209	0.179
Radio de raíz [m]	0.105	0.136
Radio medio [m]	0.157	0.157

Además, en la Tabla 2 se presentan las condiciones termodinámicas a la entrada y salida del compresor.

Tabla 2. Parámetros termodinámicos del compresor

Parámetro	Entrada del compresor	Salida del compresor
Temperatura total [K]	249,476	387,982
Presión total [kPa]	32.4	132.0
Densidad del aire [kg/m ³]	0.452	1.102
Mach en el <i>tip</i> del álabe a la entrada	1.203	-
Área a la salida [m ²]	-	0.042

Con estos parámetros de diseño ya determinados, se realizaron los cálculos correspondientes a la definición del número de etapas adecuado para el diseño. Para una deflexión adecuada del fluido, es conveniente mantener un número de Haller superior a 0.72 [3]. Se encontró que el cambio de temperaturas en el compresor es de 127 K, para una primera estimación. Además, el caso ideal es un compresor con al menos 5 etapas, y un cambio de temperatura en cada etapa de 27 K. Sin embargo, como dentro de los requerimientos del diseño se tiene que el compresor es de únicamente 3 etapas, el cambio de temperatura en cada una será mayor a lo ideal. Para la primera y segunda etapa se trabajará con un aumento de 40 K, mientras que en la tercera se realizará el incremento que se necesita para asegurar la presión y temperatura de salida requeridas.

La definición de los parámetros generales del compresor y del número de etapas permite realizar el cálculo individual de parámetros para cada etapa. Cada una de las etapas está formada por una sección de álabes rotores, seguida de una de álabes estatores. Para la primera etapa del compresor, se definió un incremento de temperatura de 40 K, y un factor de trabajo de 0.98. El grado de reacción de la etapa es de 0.702. Se observa que el número de Haller (V_2/V_1) es de 0.608. Se recomienda un número de Haller mayor a 0.72, sin embargo, dado que el incremento de temperatura que se debe tener en la etapa es elevado, la deflexión del fluido es mayor y el número de Haller disminuye. Los resultados de diseño de la etapa se presentan en la Tabla 3. Se observa en el triángulo de velocidades (Figura 4) que el fluido entra completamente axial al compresor.

Tabla 3. Resultados de diseño primera etapa

Parámetro	Unidades	Valor
Incremento de temperatura	K	40
Factor de trabajo		0.98
Grado de reacción		0.702
Número de Haller		0.608

Ángulo velocidad entrada rotor (α_1)	°	0.0
Ángulo velocidad relativa rotor (β_1)	°	60.255
Ángulo velocidad entrada estator (α_2)	°	46.172
Ángulo velocidad relativa estator (β_2)	°	35.307
Velocidad tangencial rotor (Cw_1)	m/s	0.0
Velocidad tangencial estator (Cw_2)	m/s	156.268
Relación de compresión de etapa		1.519
Presión total de salida	kPa	0.573
Temperatura total de salida	K	300.670

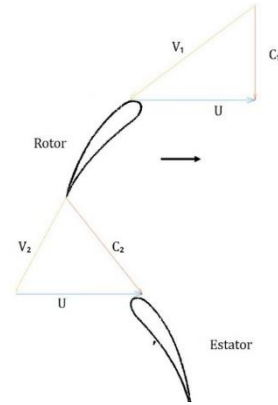


Figura 4. Triángulo de velocidades primera etapa

Para la segunda etapa, se definió un factor de trabajo de 0.93 y un grado de reacción de 0.5. El número de Haller de esta etapa es similar al de la anterior, de 0.593, debido a la alta deflexión del fluido en la etapa. Los resultados de diseño de la segunda etapa se describen en la Tabla 4. En el triángulo de velocidades (Figura 5) se observa un ángulo de entrada del fluido negativo, y una velocidad tangencial también negativa.

Tabla 4. Resultados de diseño segunda etapa

Parámetro	Unidades	Valor
Incremento de temperatura	K	40
Factor de trabajo		0.93
Grado de reacción		0.5
Número de Haller		0.593
Ángulo velocidad entrada rotor (α_1)	°	-1.369
Ángulo velocidad relativa rotor (β_1)	°	60.589
Ángulo velocidad entrada estator (α_2)	°	47.074
Ángulo velocidad relativa estator (β_2)	°	34.063
Velocidad tangencial rotor (Cw_1)	m/s	-3.585
Velocidad tangencial estator (Cw_2)	m/s	161.085
Relación de compresión de etapa		1.441
Presión total de salida	kPa	0.826
Temperatura total de salida	K	340.670

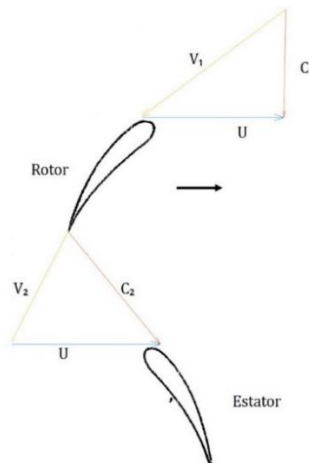


Figura 5. Triángulo de velocidades segunda etapa

Finalmente, en la tercera etapa el incremento de temperatura se calcula en función de la presión requerida al final del compresor. Se definió un factor de trabajo de 0.9, y un grado de reacción de 0.5. Se requiere un incremento en esta etapa de 59 K. Por eso, el número de Haller es de 0.505, y la deflexión del fluido es de aproximadamente 60°, como se indica en la Tabla 5. Por otro lado, en la Figura 6, se muestra el triángulo de velocidades para la etapa.

Tabla 5. Resultados de diseño tercera etapa

Parámetro	Unidades	Valor
Incremento de temperatura	K	59
Factor de trabajo		0.9
Grado de reacción		0.5
Número de Haller		0.505
Ángulo velocidad entrada rotor (α_1)	°	2.159
Ángulo velocidad relativa rotor (β_1)	°	59.715
Ángulo velocidad entrada estator (α_2)	°	59.715
Ángulo velocidad relativa estator (β_2)	°	2.159
Velocidad tangencial rotor (Cw_1)	m/s	5.655
Velocidad tangencial estator (Cw_2)	m/s	256.845
Relación de compresión de etapa		1.598
Presión total de salida	kPa	1.320
Temperatura total de salida	K	387.982

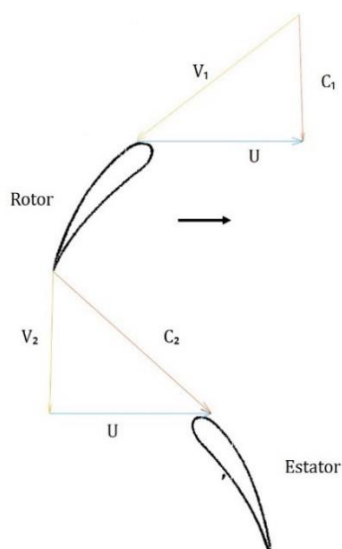


Figura 6. Triángulo de velocidades tercera etapa

Como el análisis del diseño para cada etapa se realiza tomando únicamente las condiciones en el punto medio, se realizó a continuación el análisis en detalle del comportamiento del fluido para la primera y segunda etapa en la raíz, punto medio y punta del álabe. Para la primera etapa, se realiza el análisis según el modelo *free vortex*. Este modelo permite obtener el radio, la velocidad tangencial y los ángulos del fluido para los tres puntos de análisis, a la entrada del rotor, a la salida del rotor (o entrada del estator) y en la salida del estator (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de diseño primera etapa *free vortex*

Parámetro	Raíz	Punto medio	Punta
Entrada del rotor			
Radio [m]	0.105	0.157	0.209
Velocidad tangencial (U) [m/s]	175	262.5	350
Salida del rotor			
Radio [m]	0.111	0.157	0.203
Velocidad tangencial (U) [m/s]	186.025	262.5	338.975
Salida del estator			
Radio [m]	0.118	0.157	0.196
Velocidad tangencial (U) [m/s]	197.051	262.5	327.949
Ángulos			
Ángulo velocidad relativa rotor (β_1) [°]	49.399	60.255	66.801
Ángulo velocidad entrada estator (α_2) [°]	55.775	46.172	38.895
Ángulo velocidad relativa estator (β_2) [°]	-16.878	35.307	56.773
Grado de reacción	0.370	0.702	0.827

Se realizó el análisis de la variación de los ángulos del flujo a través de la altura del álabe, desde la raíz hasta la punta del mismo. Se asumió que el ángulo de entrada de la componente axial (α_1) en esta etapa es cero para todo el recorrido del aire. Los resultados de la variación se muestran en la Figura 7.

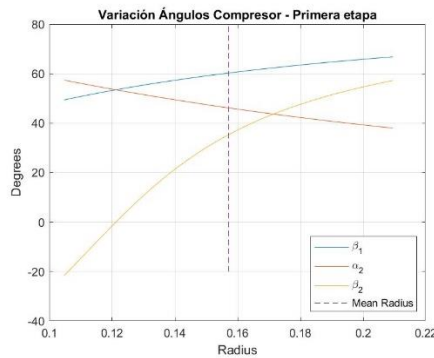


Figura 7. Variación de ángulos del fluido, primera etapa, *free vortex*

Además, se realizó la gráfica de la variación de los triángulos de velocidad para la primera etapa en tres puntos: raíz, punto medio y punta del álabe. Se graficaron las velocidades de rotación (U), absolutas (C_1 y C_2) y relativas (V_1 y V_2) (Figura 8).

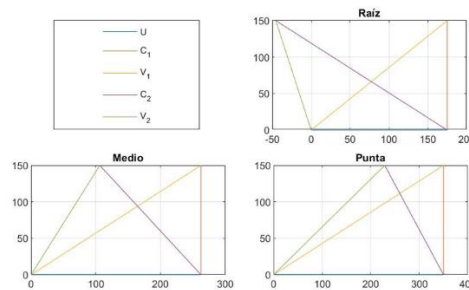


Figura 8. Triángulo de velocidades en tres posiciones, primera etapa

En la segunda etapa del compresor, se realizó el análisis de la variación de velocidades de la raíz a la punta del álabe aplicando tres métodos de diseño: *free vortex*, *constant reaction* y *exponential blading*. Se presenta en la Tabla 7 la comparación de la deflexión del fluido ($\beta_1 - \beta_2$) según los tres métodos de diseño. Se observa que el método *exponential blading* presenta la mayor deflexión en la raíz, mientras que el método *constant reaction* presenta la mayor deflexión en la punta del álabe.

Tabla 7. Comparación de ángulo de deflexión, segunda etapa

Método	Raíz	Punto medio	Punta
<i>Free Vortex</i> [°]	40.015	26.526	18.542
<i>Constant Reaction</i> [°]	53.617	36.859	25.691
<i>Exponential Blading</i> [°]	54.228	36.859	15.905

En la Figura 9 se presenta la variación de los cuatro ángulos del fluido conforme el radio del álabe se incrementa desde la raíz hasta la punta del mismo. Se analizó el ángulo de entrada del aire (α_1), el ángulo de la velocidad relativa (β_1), el ángulo de la componente absoluta del rotor (α_2) y el de la componente relativa de la velocidad del rotor (β_2).

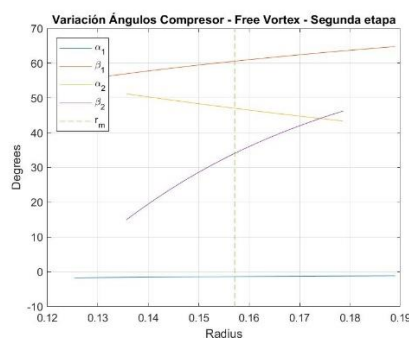


Figura 9. Variación de ángulos del fluido, segunda etapa, *free vortex*

Asimismo, se realizó el análisis de la variación de ángulos según el método de *constant reaction* asumiendo un grado de reacción constante a través de todo el álabe de 0.5. La variación de los ángulos se indica en la Figura 10.

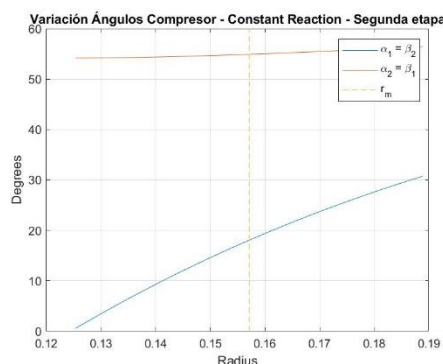


Figura 10. Variación de ángulos del fluido, segunda etapa, *constant reaction*

Por último, se compara en la Figura 11 los tres métodos de diseño empleados para analizar los ángulos de la velocidad relativa del estator (β_1) y del rotor (β_2).

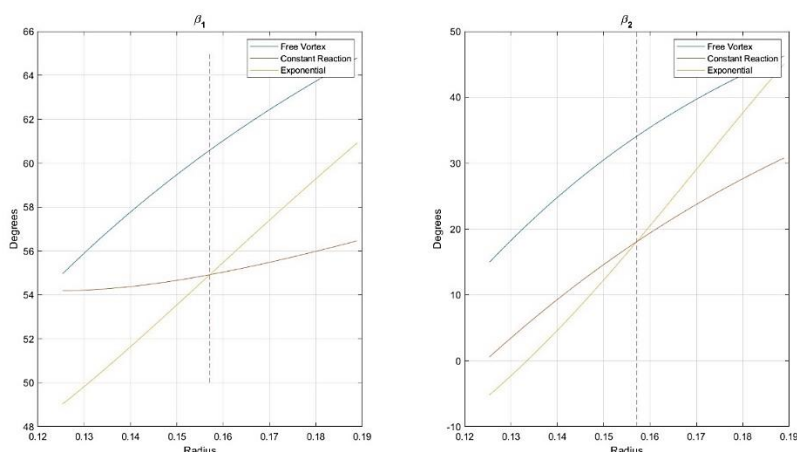


Figura 11. Variación de ángulos de deflexión

La deflexión del fluido y las características geométricas del compresor se emplean también para estimar el número de álabes necesarios en cada etapa del compresor. Para la segunda etapa, en la que se analiza el diseño detallado, se tiene en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de diseño segunda etapa

Rotor	
Número de álabes	93
Espacio entre álabes [m]	0.0106
Cuerda del álabe [m]	0.0212
Relación altura/cuerda	2.9931
Estator	
Número de álabes	138
Espacio entre álabes [m]	0.0072
Cuerda del álabe [m]	0.0143
Relación altura/cuerda	3.0017

Por último, se calculan los coeficientes de pérdida y la eficiencia del rotor y de la segunda etapa. Las pérdidas se pueden dividir en tres: las pérdidas secundarias, relacionadas con los vórtices y el espacio entre el álabe y la pared; las pérdidas en la geometría del compresor, producidas entre los álabes; y las pérdidas por arrastre, generadas por la aerodinámica de los álabes. Los resultados se incluyen en la Tabla 9. Se determinó una eficiencia de la etapa de 0.9, que es un valor bastante adecuado para el diseño.

Tabla 9. Resultados de diseño segunda etapa del compresor

Parámetro	Valor
Coefficiente de pérdidas secundarias	0.0138
Coefficiente de pérdida en la geometría	0.0033
Coefficiente de pérdida de presión	0.0180
Coefficiente de pérdida total	0.0456
Relación de compresión estática	1.4857
Relación de compresión total	1.4856
Eficiencia de la sección del rotor	0.897
Eficiencia de la etapa	0.900

3.7 Estudio de la turbina axial

La turbina seleccionada para el motor es de una sola etapa, compuesta por una sección de estator, y otra de rotor. En primer lugar, se obtuvieron los parámetros termodinámicos en los puntos principales de la turbina: la entrada del estator, la salida del estator (o entrada del rotor) y la salida del rotor. Los resultados se incluyen en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros termodinámicos de la turbina

Parámetro	Entrada del estator	Salida del estator	Salida del rotor
Temperatura estática [K]	1049.298	960.804	899.298
Temperatura total [K]	1083.15	1083.15	933.15
Presión [kPa]	320.554	219.597	169.481
Densidad [kg/m ³]	1.024	0.766	0.632
Área [m ²]	0.0241	0.0327	0.0396
Velocidad axial [m/s]	284.319	280	-

Además, se obtuvo el triángulo de velocidad para la turbina. Se muestra en la Figura 12 la velocidad tangencial (U), la velocidad de entrada al rotor (C_2), la velocidad relativa (V_2), la velocidad relativa de salida (V_3) y la velocidad absoluta de salida (C_3). Se tiene un grado de reacción de 0.41, y se asume que la velocidad axial es constante a lo largo de la etapa.

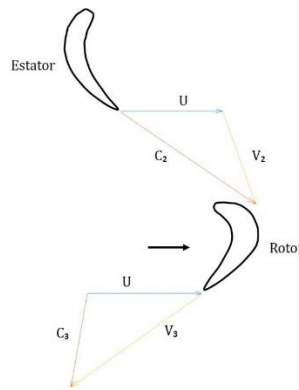


Figura 12. Triángulo de velocidades de la turbina

Asimismo, se analizó la variación de la deflexión de los gases a través de la turbina, respecto a la longitud del álabe en la raíz y en la punta. El análisis se realizó para el rotor. Se obtuvo la variación de los ángulos respecto a los puntos de análisis, mostrado en la Tabla 11.

Tabla 11. Deflexión de los ángulos de turbina.

Posición	α_2	β_2	α_3	β_3
Raíz [°]	68.629	60.225	17.165	45.636
Punta [°]	50.651	-25.300	7.033	62.363

Por otra parte, se modeló la variación de los ángulos respecto al radio, como se muestra en la Figura 13. Se observa que el ángulo que presenta mayor variación es el ángulo de la velocidad relativa a la entrada del rotor (β_2).

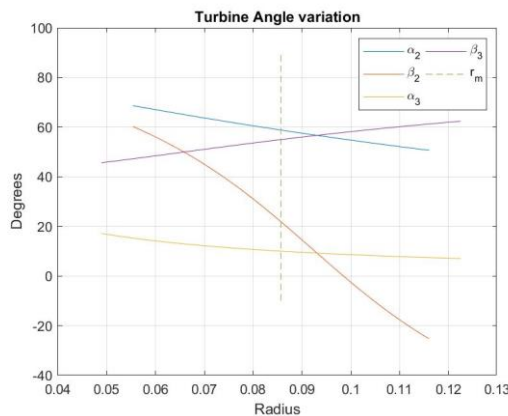


Figura 13. Variación de ángulos respecto al radio

También se graficó en la Figura 14 la variación del triángulo de velocidad comparando el triángulo de velocidad de la raíz con el de la punta del álabe a la entrada y a la salida del rotor.

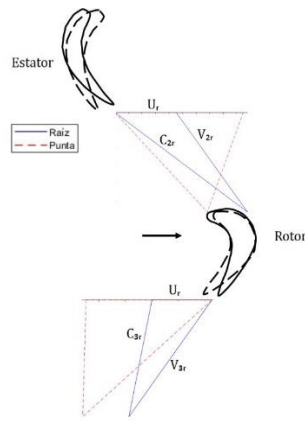


Figura 14. Variación del triángulo de velocidad

En el proceso de estudio de la etapa de turbina se calculó el número de álabes necesarios para la turbina y las características de los mismos (Tabla 12).

Tabla 12. Resultados de diseño turbina

Estator	
Número de álabes	36
Espacio entre álabes [m]	0.0151
Cuerda del álabes [m]	0.0176
Relación altura/cuerda	3.0
Rotor	
Número de álabes	29
Espacio entre álabes [m]	0.0188
Cuerda del álabes [m]	0.0224
Relación altura/cuerda	3.0

En la turbina se presentan esfuerzos elevados en los álabes causados por la rotación del eje, la temperatura, la presión del fluido. Se calcularon los esfuerzos presentes en el rotor, asumiendo como material Acero estructural ($\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$). Se obtuvo un esfuerzo a tensión por fuerza centrífuga de 502 MPa, y un esfuerzo por flexión causado por el gas, de 89 MPa. Como referencia, el esfuerzo de fluencia del acero a tensión es de 400 MPa, por lo que no sería el material adecuado para la fabricación de los álabes.

Por último, se calcularon las pérdidas en la turbina. (Tabla 13) Se tienen las pérdidas asociadas al flujo, así como las pérdidas secundarias causadas por los vórtices y las pérdidas por el espaciamiento entre el álabes y la pared de la turbina. Estas pérdidas asociadas permiten determinar la eficiencia de la etapa. Se calculó una eficiencia de 0.877. El número de Reynolds recomendado en el rotor y el estator está entre $1E5$ y $3E5$. En este caso, se obtuvo un número de Reynolds en el estator de $1.77E5$ y en el rotor de $1.75E5$, lo que indica que el diseño se encuentra dentro de los parámetros recomendados.

Tabla 13. Resultados de diseño etapa de turbina

Rotor	
Pérdidas <i>profile</i>	0.0331
Pérdidas secundarias	0.1237
Pérdida total	0.1568
Estator	
Pérdidas <i>profile</i>	0.0240
Pérdidas secundarias	0.0455
Pérdida total	0.0695
Etapa	
Coefficiente de pérdida estator	0.0613
Coefficiente de pérdida rotor	0.1413
Eficiencia de la etapa	0.877

4. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis en GasTurb 11 del motor PT6A-65B, para ser empleado en la aeronave CESTOL Skyron. Se construyó el análisis paramétrico del motor, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- La altura óptima de operación para conseguir la potencia requerida con el menor consumo específico de combustible es de 25000 ft.

- A nivel del mar, es necesario garantizar un flujo másico de aire a la entrada del motor superior los 16 kg/s a bajas velocidades de rotación del eje.
- El consumo específico de combustible, según el análisis paramétrico, no será menor a 0,4 kg/kW*h. Esto implica un aumento del 18 % en las condiciones propuestas por el certificado tipo del motor.
- Para obtener una operación adecuada con el menor consumo específico de combustible, es recomendado operar en condiciones de atmósfera estándar, en las que $\Delta T_{ISA} = 0$.
- Se concluye del análisis paramétrico que una reducción de la temperatura ITT por debajo de los valores dados por el certificado tipo, implica un mayor consumo específico de combustible.

Se realizó la optimización del ciclo, estableciendo una altura de 25000 ft; se determinaron los parámetros del ciclo que permiten:

- Obtener la potencia requerida, con una diferencia de 0,11 %.
- Garantizar un consumo específico de combustible mínimo de 0,4066 kg/kW*h.
- Lograr una reducción de ITT en un 2,8 %, respecto al valor dado en el certificado tipo.

En la optimización, para alcanzar la potencia solicitada, fue necesario aumentar en un 181 % el flujo másico de combustible, pasando de 0,03 kg/s en el primer ciclo a 0,084 kg/s en el ciclo optimizado. Además, se tiene un incremento del 164 % en el flujo másico de aire a la entrada.

Se pudo determinar que, debido al aumento en el flujo másico de combustible para poder obtener la potencia solicitada, y por la reducción que se logró en la ITT, la generación de CO₂ en el ciclo optimizado será mayor que en el ciclo simple analizado al inicio del trabajo.

Dado que se pudo reducir en un 2,8% la temperatura a la entrada de la turbina, es posible concluir que, según el modelo optimizado del motor, se obtendrá una reducción de NO_x durante la operación de la aeronave en fase de crucero.

Se realizó el diseño del ciclo térmico del motor PT6A-65B siguiendo la metodología propuesta por Antas y Wolanski. Se encontraron los parámetros termodinámicos en los diferentes puntos del motor, se encontró un consumo específico de combustible de 0.384 kg/kW*h; la potencia específica del motor, de 135.417 kW*s/kg; el flujo másico de aire a la entrada de 5.507 kg/s; y la eficiencia termodinámica de 0.223.

Se modeló también la variación de la potencia específica del motor respecto a la relación de compresión para tres valores de ITT. Se comprobó que, a mayor temperatura de entrada de la turbina, mayor será la potencia específica entregada por el motor.

Se determinaron los parámetros termodinámicos principales a la entrada y salida del compresor, para una relación de compresión de 3.5 y un flujo másico de entrada de 7.007 kg/s. Se concluye que, para un aumento de temperatura ideal de 27 K, son necesarias 5 etapas. Sin embargo, en el diseño actual, que solo cuenta con 3 etapas, el aumento de temperatura en cada una será más elevado. Esto influye asimismo en la deflexión necesaria del aire, ya que el ángulo de deflexión aumenta.

Para la segunda etapa de compresor, se analizó la deflexión del fluido empleando los métodos de *free vortex*, *constant reaction* y *exponential blading*. En la raíz del álabe, el método que proporciona un mayor ángulo de deflexión es el de *exponential blading*, con 54.228°. En la punta del álabe, la mayor deflexión la proporciona el método de *constant reaction*, asegurando un ángulo de 25.691°.

Se concluye que el motor PT6A-65B es adecuado para el uso en la operación de la aeronave CESTOL Skyron, ya que entrega la potencia requerida por la aeronave, y cumple con las condiciones óptimas de diseño y funcionamiento para la operación en el techo del vuelo crucero.

REFERENCIAS

- [1] E. L. Chuan-Tau and J. Roskam, *Airplane Aerodynamics and Performance*, Lawrence, Kansas: DARcorporation, 2003.
- [2] EASA, «PT6A-41 series Type-Certificate Data Sheet» 2007.
- [3] H. Cohen, G. Rogers and H. Saravanamuttoo, *Gas Turbine Theory*, Cuarta ed., Padstow, Cornwall: T. J. Press, 1996.
- [4] C. Kong and H. Roh, «Steady-state Performance Simulation of PT6A-62 Turbo Prop Engine Using SIMULINK» *International Journal of Turbo and Jet Engines*, vol. 20, pp. 183-194, 2003.
- [5] Pratt & Whitney Canada, *PT6A-60 Series Training Manual*, Longueuil, Quebec: Customer Training Centre, 2007.
- [6] FAA, «Aviation & Emissions: A Primer,» FAA, 2005.
- [7] J. Kurzke, «GasTurb 11» 2007.
- [8] S. Antas and P. Wolanski, *Obliczenia termogazodynamiczne lotwiczonych silniczych turbinowych*, Varsovia, 1989.

Análisis numérico mediante CFD de la influencia del fuselaje en la aerodinámica interna del módulo de carga de la aeronave Aquila en la medición de gases

Paula V. Barrera H.¹

Sebastián Díaz L.²

Rafael M. Cerpa B.³

Universidad de San Buenaventura - Colombia

Este documento contiene los resultados de la investigación enfocada en el estudio computacional de la influencia aerodinámica del fuselaje de la aeronave Aquila en la entrada de su sección de carga para la medición de gases contaminantes. La Universidad de San Buenaventura Bogotá en conjunto con la Universidad de San Buenaventura Medellín buscan la implementación de nuevos métodos para obtener de manera rápida, precisa y sencilla datos de gases en el ambiente, mostrando las variaciones de los niveles de contaminación a diferentes alturas. La obtención de los datos se realiza por medio de sensores ubicados en un montaje electrónico que se encuentra en el módulo de carga de la aeronave Aquila, por ello, que es importante analizar inicialmente la aerodinámica externa del fuselaje con el fin de determinar la incidencia de los gases a la entrada de la sección de carga para realizar la correcta medición de los mismos. El estudio de la aerodinámica del fuselaje de la sección de carga se realizará a partir de simulaciones mediante el uso del software Computational Fluid Dynamics (CFD), en este caso se utilizará ANSYS – Fluent, donde es necesario tener en cuenta parámetros de vuelo de la aeronave Aquila a la hora de realizar las simulaciones pertinentes, y así obtener la mayor precisión de resultados.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica tiene gran relevancia en la vida cotidiana ya que puede traer grandes repercusiones en los seres humanos y en el medio ambiente. Las emisiones contaminantes generadas a partir de distintas actividades, como el transporte, la industria, la extracción del petróleo y recursos naturales, han aumentado significativamente a través de los años, dejando como consecuencia que más partículas contaminantes se acumulen en el ambiente ocasionando mayores cantidades de gases tóxicos en la atmósfera.

El monitoreo de la contaminación del aire en Colombia se ha convertido en parte fundamental, debido a que, representa uno de los mayores riesgos contra la salud humana, según los estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud [1], una de cada ocho muertes ocurre por la contaminación de la atmósfera. A partir de los últimos estudios acerca de la calidad del aire a nivel nacional han concluido que el material particulado inferior a 2,5 micras de diámetro (PM 2,5) junto con las partículas inferiores a las 10 micras de diámetro (PM 10), son los mayores contaminantes en los entornos urbanos [2]. El área metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín, se encuentra entre los sitios más afectados por la contaminación, el cual supera el umbral de PM 10 fijado por la Organización Mundial de la Salud ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con niveles tan altos ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que ante una exposición prolongada puede causar grandes problemas respiratorios, cardiovasculares hasta llegar a enfermedades cancerígenas [3].

Al tener las mediciones de los gases que se conservan en el aire se podrá crear acciones correctivas y de regulación para mejorar la calidad de vida. Por ello, tomar las muestras de aire de manera correcta permitirá un mejor análisis de los resultados; existen varios métodos de medición como los muestreos pasivos, ellos indican la concentración promedio de contaminación expuesta en un flujo de aire durante un periodo de semanas a meses. El muestreo activo bombea un volumen de aire específico a través de un colector por un tiempo determinado. Estas prácticas se realizan a una altura constante, sin gran variación ya que las limita el equipo con el cual se trabaja [4].

También se realizan mediciones con globos, como, por ejemplo, el globo cautivo, este se encuentra anclado al piso, pero llega a una altura de 1000 metros, durante el proceso de elevación mide la concentración de los elementos contaminantes. El globo piloto a su vez ayuda a la medición de contaminantes, pero este permite el estudio de ver como se mueven y se dispersan las partículas en las capas bajas de la atmósfera observando la posición del globo constantemente. Sin embargo, los costos de estas actividades son bastantes elevados como también se necesita de un espacio amplio para su ejecución [5].

Las aeronaves remotamente tripuladas al ser vehículos aéreos controlados por un piloto en tierra, ligeros, de tamaño reducido y que operan con motor eléctrico, la accesibilidad que tienen para lugares remotos, peligrosos o muy poblados, permiten que sean útiles para varios usos, como la toma de imágenes terrestres, el registro de gases en la atmósfera, y demás [6]. Según FUNDESNAP (Fundación para el Desarrollo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas) el monitoreo del aire es *“una herramienta que sirve para hacer seguimiento a la calidad ambiental de manera periódica, a través de la observación, medición de indicadores, evaluaciones de variaciones de los aspectos y condiciones ambientales producidas por alguna actividad, obra, proyecto y/o servicio”* [7]. Por ello, las aeronaves remotamente tripuladas o drones se empezaron a utilizar en la medición de parámetros atmosféricos al ayudar en la supervisión de

¹ pbarrera@academia.usbbog.edu.co

² sdiazl@academia.usbbog.edu.co

³ ing.decano@usbbog.edu.co

los niveles tan alarmantes de contaminación en el aire, por motivos de eficiencia en la rapidez de la toma de datos en tiempo real de forma más sencilla y menos costosa, ahorrando considerablemente el tiempo operacional y aumentando la precisión, como a su vez tienen la capacidad de adaptabilidad al terreno, ya que sus características son aptas para la medición en distintos puntos de forma rápida.

Los países han implementado aeronaves remotamente tripuladas con sensores que miden la concentración de gases en la atmósfera, buscando mejoras en la calidad del aire. China está dentro de los países que utiliza los drones para el control de su contaminación atmosférica, especialmente en áreas donde operan fábricas de alto impacto, también Estados Unidos, Perú y Colombia, entran entre las naciones que están aplicando este tipo de tecnología [8]. Las sedes de Bogotá y Medellín de la Universidad San Buenaventura, están trabajando en nuevos métodos con los cuales se logre la obtención de los contaminantes presentes en la atmósfera de una manera eficiente, precisa y rápida, es por esto que se han implementado varios sensores de gases en el módulo de carga de la aeronave remotamente tripulada Aquila, para la obtención de los diferentes datos. Por esta razón se pretende analizar numéricamente inicialmente la influencia de la aerodinámica del fuselaje en la entrada de gases al módulo de carga de la aeronave Aquila.

2. MÉTODO

La medición de gases se ha convertido en un aspecto necesario y útil en la cotidianidad por motivos de supervisar la calidad de aire, por lo cual los medios por los que se realizan la toma de datos deben ser los más exactos posibles. Debido a las limitaciones de los diferentes tipos de medición como las del muestreo pasivo y activo realizados en tierra, el globo piloto y cautivo por sus altos costos, se opta por un método de tecnología móvil, en este caso, el uso de una aeronave remotamente tripulada (ART) junto con un montaje electrónico, el cual permite un alto nivel de seguridad, no genera contaminación, no se tiene contacto directo con las partículas pero si se puede registrar los datos en tiempo real a diferentes alturas con el equipo de sensores específicos, los costos son menores y el espacio para su ejecución es menor.

Evaluar la correcta localización de los orificios de entrada de aire para que los sensores midan los contaminantes dentro de la ART es fundamental para la recolección de datos, ya que su precisión, exactitud y asertividad dependerán de como el flujo de aire llega a todo el circuito en la aeronave, por lo que parámetros como la velocidad de vuelo, el ángulo de inclinación, también son factores esenciales a tener en cuenta. Por esta razón se pretende simular por medio del software de dinámica computacional de fluidos (CFD) como el flujo de aire pasa por el fuselaje de la aeronave y poder observar si el flujo alcanza a adaptarse a la geometría del fuselaje y por ende, la sección de carga recibe el flujo necesario para obtener la mejor recolecta de datos acerca de las partículas contaminantes a diferentes alturas. La aeronave Aquila, que se muestra en la Figura 1, será la aeronave remotamente tripulada (ART), que será expuesta a un plan de vuelo en ascenso sostenido en columna de aire que permitirá medir los contaminantes en el aire a diferentes alturas. Esta aeronave es monomotor, con tren de aterrizaje tipo patín, con ciertas características geométricas que se observan en la Tabla 1.



Figura 1. Aeronave Aquila

Tabla 1. Características generales de la aeronave Aquila

Parámetro	Valor	Unidades
Longitud del fuselaje	1.97	m
Envergadura	2.645	m
Superficie alar	0.826	m ²
Cuerda en la raíz	0.38	m
Cuerda en la punta	0.267	m
Cuerda media aerodinámica	0.331	m
Carga alar (W/S)	106.88	N/m ²
Relación de aspecto (AR)	8.08	-
Masa Vacía	3300	g
Peso vacío	32.37	N
Masa máximo peso de despegue (mTOW)	9000	g
Peso máximo de despegue (MTOW)	88.29	N

2.1 Extracción de parámetros de vuelo de la aeronave Aquila

Por medio de un vuelo de prueba realizado en el departamento del Meta específicamente en las instalaciones de UNIPALMA se pudieron determinar los parámetros de vuelo de la aeronave Aquila, los cuales establecerán la posición de la aeronave respecto al flujo de aire en el instante en el cual se están tomando parámetros ambientales y así obtener valores exactos de la dirección y magnitud del flujo entrando al módulo de carga. Para definir los diferentes parámetros de vuelo se utilizó el software Mission Planner, tomando como referencia un vuelo de prueba el cual consistió en realizar un patrón de vuelo en giro sostenido a tres diferentes alturas obteniendo los resultados expuestos en las Figuras 2, 3 y 4, donde se muestra el comportamiento de la aeronave según su alabeo (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw) respecto a la altura correspondiente.

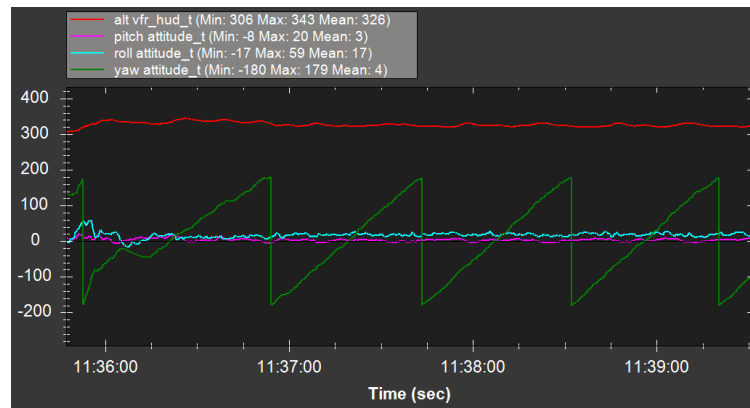


Figura 2. Altura inicial promedio – 326 metros

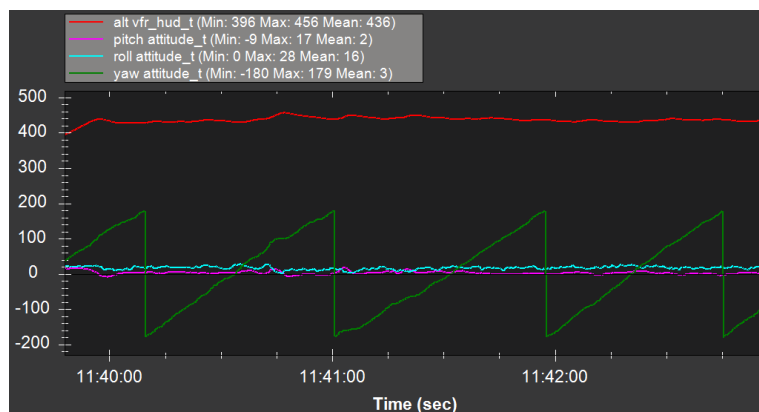


Figura 3. Altura media promedio – 436 metros

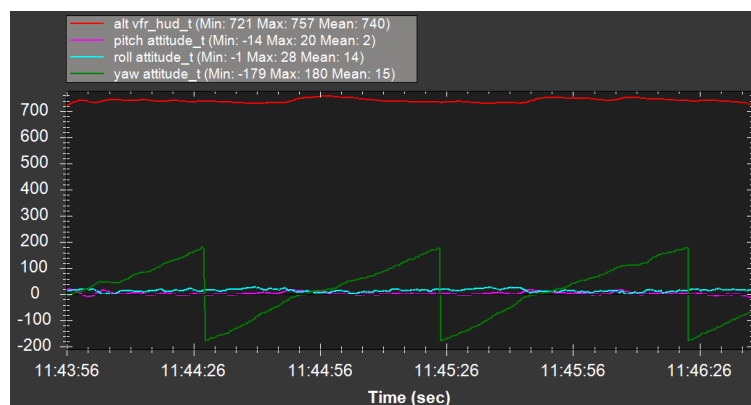


Figura 4. Altura máxima promedio – 740 metros

Los resultados expuestos y obtenidos en un vuelo de prueba de toma de datos, consistió en un plan de vuelo donde se establecieron tres alturas diferentes con el fin de registrar datos operacionales de vuelo, para ser analizados y posteriormente determinar características relevantes de posicionamiento de la aeronave en operación, como lo son los 3 ángulos de la aeronave, es decir, el cabeceo, guiñada y alabeo. Para la simulación es importante conocer dichos parámetros ya que indican la posición en la cual el fuselaje está teniendo contacto con el flujo de aire cuando está en vuelo, y así determinar si las líneas de corriente se adaptan a la geometría del fuselaje garantizando el paso de flujo por la sección de carga. En la Tabla 2, se muestran los valores correspondientes al promedio de cada ángulo.

Tabla 2. Parámetros de Vuelo

ALTURA [m]	CABECEO [°]	GUIÑADA [°]	ALABEO [°]
326	3	4	17
436	2	3	16
740	2	15	14
Promedio	2,33	7,33	15,67

A continuación, en las Figuras 5 y 6 se observa la velocidad del aire y la velocidad respecto al suelo respectivamente del vuelo realizado, el cual tuvo una duración aproximada de 26 minutos, donde se observa los valores máximos y mínimos de vuelo, de los cuales se calculará un promedio.

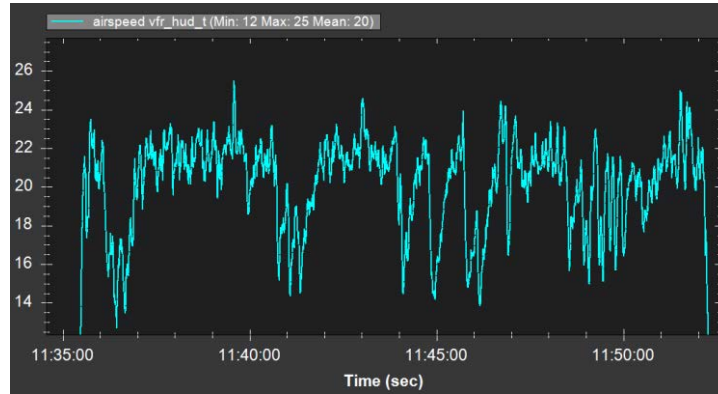


Figura 5. Velocidad del aire promedio

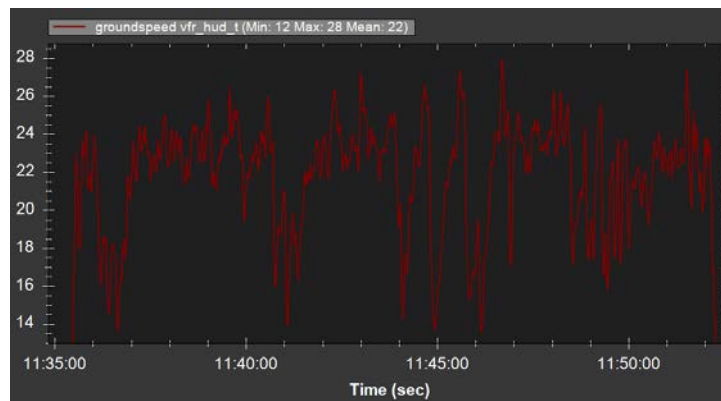


Figura 6. Velocidad respecto al vuelo

En la Tabla 3 se puede observar los valores de las distintas velocidades que se obtuvieron durante el vuelo respectivamente, donde el valor promedio será la velocidad a la cual estará expuesta el objeto de estudio durante la simulación, en este caso, se tendrá en cuenta la velocidad de aire promedio.

Tabla 3. Velocidades de Vuelo

Velocidad [m/s]	Mínimo	Máximo	Promedio
Aire	12	25	20
Res. al Suelo	12	28	22

2.2 Desarrollo del volumen de control

Una de las principales cosas a tener en cuenta al momento de realizar una simulación en ANSYS – Fluent es crear un dominio o volumen de control, el cual restringe la zona en la que circulará el aire, a este se le determina una entrada y una salida correspondiente, teniendo presente que el objeto de estudio se encontrará en el interior. Para definir el tamaño adecuado para un volumen de control se necesita analizar el espacio suficiente en el cual se puedan llegar a reflejar completamente las características del fluido luego de haber interactuado con el elemento puesto a prueba permitiendo observar la igualdad de la cantidad de flujo másico, es decir, que sea la misma tanto a la entrada como a la salida.

En esta simulación se utilizará un volumen de control en 3D tipo prisma recto como se muestra en la Figura 7, con dimensiones referentes a una longitud característica, en este caso será 1,20 metros del fuselaje de la aeronave Aquila, es decir, de 15 metros de largo, de alto 1,68 metros y de ancho 0,72 metros. Las características principales del volumen de control se basaron en el artículo de la Escuela Politécnica Nacional [9].

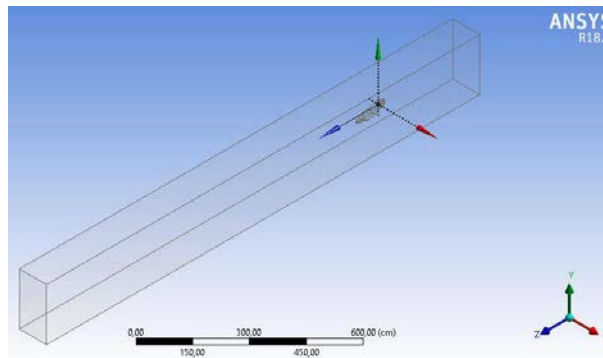


Figura 7. Volumen de Control

2.3 Desarrollo de la simulación

Entre los factores más relevantes para tener una simulación correcta y lo más precisa posible se encuentra el tipo de malla generada, es por ello que en su proceso de desarrollo hay que tener en cuenta ciertas características que permitan obtener los resultados más allegados a la realidad, no obstante, es necesario saber que entre más fina la malla, más capacidad computacional se requiere, por lo cual se importante determinar el tipo de malla dependiendo de los recursos a su alcance.

En este caso, se implementaron dos tipos de mallas diferentes: para la sección del fuselaje se seleccionó una malla en forma triangular, debido a la geometría compleja que tiene el componente, y por otro lado, para el volumen de control, se aplicó una malla tetraédrica la cual facilita la adaptabilidad con la geometría, siendo más densa en las zonas cercanas al fuselaje y menos densa en las demás zonas del volumen de control, con el fin de disminuir la capacidad computacional requerida ya que su tamaño influye bastante en el tiempo de simulación.

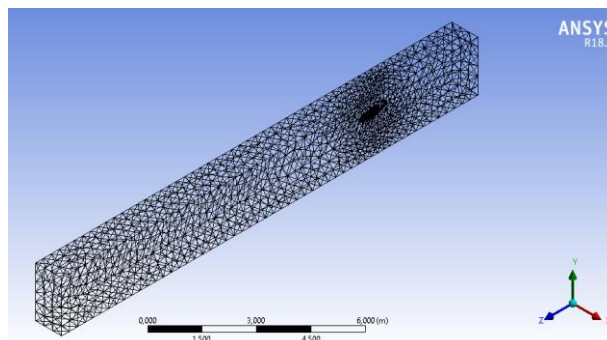


Figura 8. Enmallado

Luego del desarrollo de la malla (Figura 8), fue necesario conocer si la velocidad de vuelo de la aeronave influiría en el tipo de flujo de aire, siendo este laminar o turbulento, al entrar en contacto con el fuselaje, para ello se aplica la ecuación del número de Reynolds. Teniendo en cuenta los vuelos de prueba explicados en el presente estudio, se obtuvieron acorde con la altura de operación, la densidad, viscosidad del aire, y la velocidad de vuelo respecto al aire (ecuación (1)); tomando como base que la longitud característica es el largo del fuselaje.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{(1,225 \text{ kg/m}^3)(20 \text{ m/s})(1,5 \text{ m})}{(1,802 \times 10^{-5} \text{ kg/(m*s)})} = 2,039 \times 10^6 \quad (1)$$

Al conocer que el número de Reynolds es mayor a $5 \cdot 10^5$ y como se asumió que el fuselaje era una placa plana, se deduce que el flujo será turbulento, por consiguiente se procede a realizar la simulación iterativa bajo el modelo Spalart - Allmaras que permite un análisis de un flujo turbulento teniendo en cuenta las recomendaciones encontradas en el libro *Diseño de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible* [10]. Este modelo de turbulencia de una ecuación es acertado para el análisis de fluidos cercanos a las paredes y ha sido probado para capas límites con gradientes de presión adversos [10].

3. RESULTADOS

Luego de realizar el proceso de simulación en el software ANSYS - Fluent se obtuvieron los resultados del comportamiento aerodinámico del fuselaje al realizar vuelos en ascenso sostenido dando giros alrededor de un "waypoint" con el fin de realizar el monitoreo de gases. Dichos resultados permitirán realizar el análisis del flujo de aire al momento de tener contacto con el fuselaje. En la Figura 9 se puede observar la entrada de la sección de carga paga y, en la Figura 10, la respectiva salida.

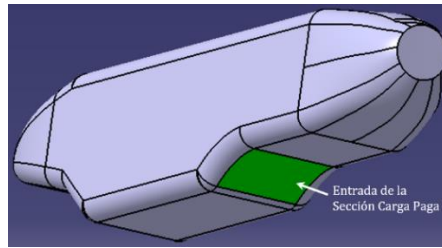


Figura 9. Entrada la sección de carga paga

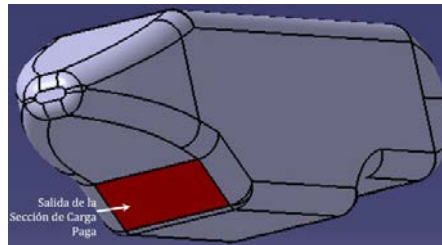


Figura 10. Salida de la sección de carga paga

3.1 Contornos de presión

En la Figura 11, se puede apreciar la variación de presión a lo largo del fuselaje de la aeronave, detallando que en la parte frontal se obtienen los puntos de presión máximos, ya que es la sección que impacta de frente con el flujo de aire como también en la parte frontal de la sección de carga, además se observa que las curvas del fuselaje ayudan a distribuir de mejor forma la presión e impedir puntos de concentración de esta.

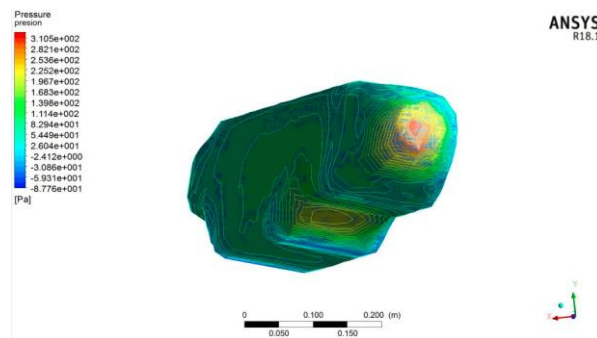


Figura 11. Contornos de Presión sobre el fuselaje de la aeronave Aquila

3.2 Vectores de velocidad

Los vectores de velocidad permiten ver donde se encuentran los mayores rangos de velocidad en toda la superficie y como la sobrepasan, es por ello que en la Figura 12 se observa que en las esquinas o las superficies donde ocurren cambios de geometría relevante, es donde se encuentran los máximos valores de velocidad, sin embargo, los cambios de geometría permiten que el flujo se adapte al fuselaje y este pueda rodearlo de la manera más uniforme posible. Por ejemplo, en la sección de carga, se puede ver que en los bordes la velocidad es máxima, pero da la certeza que el flujo si sobrepasa la sección de carga y, por ende, el flujo llega a la parte frontal. Adicionalmente, en la Figura 12, los contornos de velocidad indican que el flujo de aire se adapta completamente al fuselaje, permitiendo que el aire ingrese a la sección de carga para la medición de gases contaminantes en el mismo, además es posible calcular y conocer a partir de la simulación la dirección y magnitud de la velocidad a través del fuselaje.

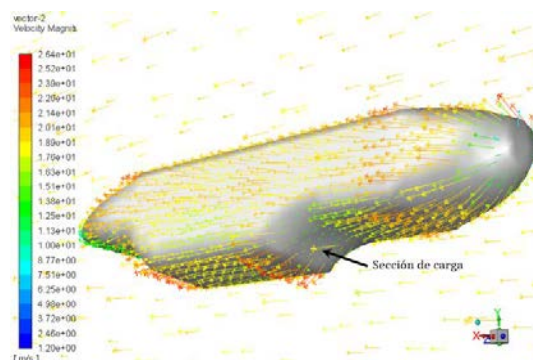


Figura 12. Vectores de velocidad fuselaje y volumen de control

3.3 Líneas de corriente de velocidad

Teniendo en cuenta la aplicabilidad de la aeronave en la toma de datos es de gran relevancia tener la certeza que el flujo de aire entra en contacto con la sección de carga, ya que es el lugar donde se instala el circuito con los diferentes sensores para la medición de gases. En la Figura 13 se puede observar como la configuración aerodinámica del fuselaje de la aeronave Aquila ayuda a la adaptabilidad del flujo a lo largo de este, confirmando que el flujo si llega a tocar la sección de carga en la parte frontal y de paso, a que el flujo sobrepase el fuselaje de la forma menos abrupta.

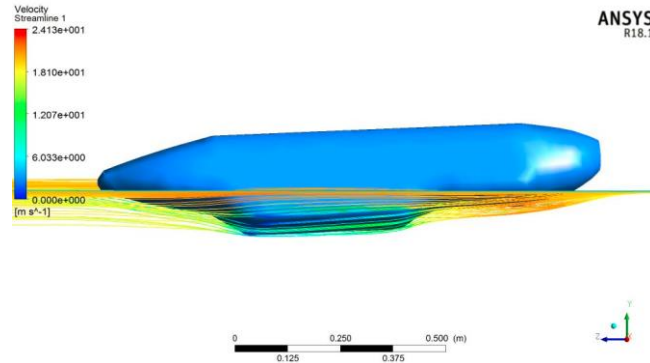


Figura 13. Líneas de corriente de velocidad del fuselaje de la aeronave Aquila

En la Figura 14 se puede apreciar el mismo fenómeno de las líneas de corriente, pero en este caso, se resaltan los vectores de velocidad, los cuales confirman como el flujo ingresa a la sección de carga de manera uniforme, sin cambios abruptos de dirección y de velocidad.

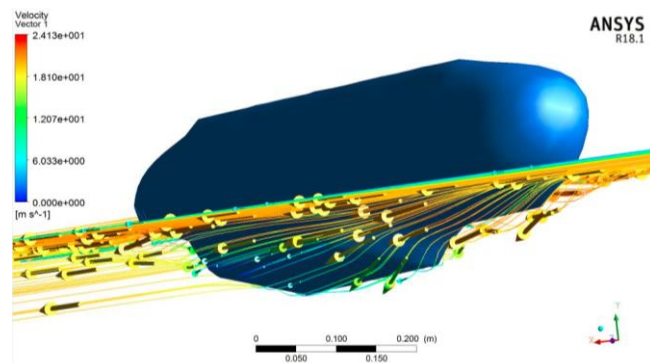


Figura 14. Líneas de corriente con vectores de velocidad del fuselaje de la aeronave Aquila

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los resultados obtenidos de la simulación realizada en ANSYS – Fluent se pudo observar que es factible posicionar los agujeros en la sección de carga del fuselaje de la aeronave Aquila, ya que tanto las líneas de corriente como los vectores de velocidad demuestran que el flujo que atraviesa la aeronave, si alcanza a llegar de manera viable a la entrada de la sección de carga, como también la adaptabilidad del flujo a la geometría es prudente por lo cual la velocidad no cambia.

Por otro lado, se evidenció que los valores máximos de presión se encuentran en la parte delantera del fuselaje, donde el flujo de aire impacta la aeronave por el viraje en ascenso sostenido con los respectivos ángulos de posicionamiento, cabeceo, guiñada y alabeo.

5. CONCLUSIONES

- En este estudio se observó que los puntos de presión máximos se encuentran en la parte frontal del fuselaje, con mayores valores en las zonas donde el aire impacta la aeronave debido al viraje en ascenso sostenido.
- La localización de la entrada de flujo en la sección de carga es correcta, debido a que a partir de los resultados de los vectores de velocidad y líneas de corriente se pudo comprobar que el aire no cambia abruptamente su velocidad, dirección y magnitud.
- El plan de vuelo propuesto en ascenso sostenido en columna de aire, requiere que la aeronave tenga ángulos de cabeceo, guiñada y alabeo. Los cuales no afectarán la toma de datos del aire en la sección de carga, ya que el aire se adapta totalmente a la aerodinámica externa del fuselaje.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud, «Calidad del aire y salud,» 2018.
- [2] C. Arciniégas, «Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10,» Manizales, 2012.
- [3] Medellín cómo vamos, «Medio ambiente en Medellín,» Medellín, 2017.
- [4] Salud ambiental, «Métodos de medición de la calidad del aire,» 2014.
- [5] MCE2, «Predicción de meteorología: Mediciones y modelos,» 2006.
- [6] C. Cuerno, L. García y A. Carrio, «Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad,» 2015.
- [7] FUNDESNA, «¿Qué es el monitoreo ambiental?,» 2011.
- [8] J. Luque, «Uso de drones para el monitoreo ambiental,» 2017.
- [9] E. Valencia y Y. Castro, «Estudio paramétrico y simulación dinámica de fluidos computacionales (CFD) de los efectos de integración aerodinámicos entre el sistema de propulsión y fuselaje para un vehículo aéreo no tripulado (UAV) utilizado en la agricultura,» Quito, 2017.
- [10] R. C. Bernal, Diseño de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible, Bogotá: Bonaventuriana, 2017.

Modelamiento y diseño de estrategias para la mitigación del ruido en el centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero teniendo en cuenta la caracterización de la flora en el sector

Hernán D. García S.¹

María C. Mendoza G.²

Tatiana Pérez G.³

Universidad La Gran Colombia – Colombia

En Colombia, el ruido está legislado desde el 2006 con la resolución 0627. Esta resolución determina las regulaciones de carácter general aplicables a todas las actividades que puedan producir de manera directa o indirecta daños ambientales. Debido a que el área de estudio tiene condiciones ambientales, como el estar a una distancia muy corta de la vía principal y no poseer la suficiente vegetación que pueda ser un agente de mitigación a este fenómeno, surge el objetivo: diseñar estrategias para la mitigación del ruido en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero, teniendo en cuenta la caracterización de la flora en el sector. Por consiguiente, se realiza una investigación exploratoria que permita la experimentación del comportamiento del ruido con respecto a la flora presente en el área de estudio, así, finalmente realizar el modelamiento del comportamiento del ruido y el diseño de mitigación del mismo en esta zona. Como resultado parcial se obtiene un modelo de comportamiento inicial y datos de referencia para continuar con el proceso de investigación.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido es reconocido como agente contaminante por primera vez en el Congreso del Medio Ambiente de la Naciones Unidas, en Estocolmo en 1972; también por Scientific Comité on Problems Environment (SCOPE). En ese siglo, se percibió a los automotores como los autores principales de esta contaminación, la cual se define como una sensación auditiva inarticulada, generalmente desagradable al oírlo; es por esta razón que Alemania fue el primer país que legisló sobre el control de ruidos producidos por vehículos en 1953.

Asimismo, en la actualidad existen restricciones en cuanto al uso permitido de decibeles (dB), que varía según la zona, el horario y las actividades realizadas; por consiguiente, la normatividad varía dependiendo de lo permitido en cada ciudad por medio del ente regulador. En Ginebra en 1974, se hicieron diferentes tipos de restricciones respecto a los niveles de ruido producidos por automotores en las principales ciudades. Sin embargo, los niveles de dicha variable se encontraban en aumento a 1 dB por año, esto debido a un incremento vertiginoso del uso de automóviles y otras actividades humanas. En consecuencia, al unificar los elementos que integran el ruido se pueden distinguir tres variables que corresponden a la causa u objeto productor del sonido, la transmisión de la vibración, y el efecto o reacción fisiológica y psicológica que se produce en la audición, esto corresponde al dato registrado en el 2013 por fundación La Caixa [1]. A causa de la determinación de estas variables, en 1964, Chocolle [2] afirma que el ruido es un fenómeno acústico productor de una sensación auditiva desagradable, las circunstancias subjetivas de los receptores son quienes determinan la clasificación de un sonido como un ruido. Por lo tanto, en 1985 Harris [3] afirma que vivimos en un ambiente sonoro en donde radica que el ruido es toda perturbación aleatoria, generalmente se denota como un sonido inarticulado, considerado molesto a nivel auditivo y que produce vibraciones incómodas que dependen de la generación del mismo.

En Colombia, en el 2006 se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental que es la resolución 0627 [4]. Esta resolución determina las regulaciones de carácter general aplicables a todas las actividades que puedan producir de manera directa o indirecta daños ambientales, permite tener la normatividad de manejo de ruido y reducir la contaminación en el territorio nacional. Con el fin de identificar la importancia de conocer la reglamentación relacionada con el ruido y sus efectos, se plantea este proyecto que permite no sólo identificar las fuentes que producen el ruido cercano a la zona de estudio, sino generar una alternativa amigable con el ambiente y el bienestar de las personas.

Por causa del desconocimiento o el no cumplimiento de la normativa, los niveles de ruido han ido aumentando, generando una mayor contaminación, lo que produce consecuencias negativas en el ser humano y en el entorno en sí; estos efectos, no son visibles, ni tan perceptibles como ocurre con otro tipo de contaminación, pero sus consecuencias a mediano y largo plazo pueden ser irreversibles, por consiguiente, debido a los cambios generados a nivel global, se han determinado normativas de manejo del ruido, que permiten identificar los mayores focos que lo producen y establecer normas para el control del mismo, que permitan disminuir el impacto negativo que genera esta variable. Asumiendo que, el ruido es considerado como un contaminante atmosférico debido a que se propaga a través del aire, además produce vibraciones con efectos nocivos en los tipos de construcciones que intervienen. Por este motivo, se ha hecho conveniente la implementación de estudios y evaluaciones que comprenden el análisis de los niveles del ruido que afectan a cierta comunidad en específico, estos análisis han permitido gestionar propósitos claves como el diseño de estándares encaminados a su control y mitigación.

¹ garciasanhernan@miugca.edu.co

² mendezagarmaria@miugca.edu.co

³ perezgostatiana@miugca.edu.co

Con base en lo anteriormente expuesto, la gestión del ruido tiene como propósito fundamental desarrollar criterios para la deducción, evaluación y control de los decibeles como parte de procedimientos que permitan la ejecución de alternativas de mitigación analizadas y representadas en mapas de ruido, que corresponden a una estrategia que permite la evaluación de una zona determinada, estos mapas establecen las zonas en donde el factor contaminante es más probable y sus rangos de afectación al ambiente; al tener estos mapas sustentados mediante pruebas estadísticas y resultados verificados por diferentes métodos de estudio, se pueden obtener zonas de mayor influencia de la contaminación acústica, además de permitir la observación del comportamiento de la zona, a fin de proporcionar información significativa en la toma de decisiones que incluyen la manipulación de estos datos para utilizarlos de manera activa en investigaciones académicas y en el planteamiento de estrategias para su mitigación o control.

Concorde con lo expuesto, al ser el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero un espacio de educación y esparcimiento estudiantil, se debe tener especial atención a este tipo de contaminación, los niveles que se manejan en esta zona y las afectaciones que el mismo produce; dado que el lugar tiene condiciones ambientales como encontrarse a una distancia muy corta de la vía principal, que en este caso es parte de una vía de segundo orden que comunica la capital del departamento del Quindío con el municipio de La Tebaida y por ende el manejo de tráfico es concurrente, además no posee la suficiente vegetación para mitigar este fenómeno. Por lo tanto, se plantea la pregunta de investigación que permite identificar una problemática actual de gran impacto y en consecuencia se establece: ¿Cuáles son las estrategias para la mitigación del ruido en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero, teniendo en cuenta la caracterización de la flora de este sector?

En consecuencia con lo anteriormente descrito, se analiza que a comienzos de este siglo, el ruido se ha convertido en un factor contaminante en la mayoría de las ciudades, en especial las que poseen mayor densidad de tráfico y población; produciendo de esta forma efectos negativos tanto sociales, como económicos, psicológicos y fisiológicos en las personas, a causa de que solo es percibido en mayor rango por el oído, por esta razón sus efectos son subestimados, pero adicionalmente se tiene que el ruido produce vibraciones que también generan un agente contaminante. No obstante, el ruido es tratado de forma equivocada, dado que es una variable complicada para la realización de su caracterización específica, a diferencia de otros tipos de contaminantes, por lo tanto su percepción no es tan notoria, debido a que no afecta como una amenaza visible para las personas, ni tampoco degrada el ambiente como otros tipos de contaminantes que se encuentran más visibles y tangibles, pero esto no es un indicador de que sea un contaminante leve, por el contrario es un agente invisible que produce repercusiones y efectos nocivos en la salud de las personas [5] y estas afectaciones en ocasiones generan consecuencias irreversibles y que requieren de atención médica.

Asimismo, estudios realizados en diferentes países han demostrado que cerca del 80% de la contaminación acústica es producida por el tráfico vehicular en las ciudades. El ruido generado por este tráfico es una sucesión temporal de la suma de niveles sonoros, los cuales son variables dependiendo del tipo de vehículo que transita. Este contaminante es generado especialmente por los automotores y procede de la fricción provocada por el contacto de los neumáticos con el asfalto y el aire, generando un aumento considerable en los niveles sonoros relacionados directamente con el aumento de la velocidad. Según Lara et al. [6] estas variables proceden del sistema del vehículo (motor, escapes y transmisiones); de la fricción causada por el contacto de la llanta del vehículo con el suelo y el aire. Todos estos factores tienden a aumentar el nivel sonoro con el incremento de la velocidad, además es importante identificar aspectos como el tipo del automotor, el pavimento, el tipo de vialidad y el manejo de diferentes variables que hacen parte de los vehículos, generando una mayor contaminación auditiva. Si no se cumplen con las reglamentaciones propias de cada vehículo, como el silenciador en las motos, el mal estado del vehículo, el manejo del sonido al interior del mismo, se generará un aumento de ruido (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de niveles según la Comisión Nacional del medio ambiente Chile [7]

Velocidad (km/h)	Categoría del vehículo	Ruido de rodadura (dB)	Ruido por potencia (dB)	Ruido Total dB
20	Pesado	61	78	78
	Liviano	58	64	65
80	Pesado	79	85	86
	Liviano	76	74	78

Para ambos tipos de ruido el nivel por rodadura aumenta 9 dB al doblar la velocidad del automóvil. Por esta razón, es que se tienen en cuenta tanto el ruido por rodadura como el ruido en la potencia del vehículo, además, de su peso que ejerce el mismo sobre el pavimento. También se debe tener en cuenta la superficie y la pendiente de la vía por donde transita el vehículo, esta puede afectar el aumento o disminución de los niveles de ruido.

2. MÉTODO

El método de investigación que se formula en el proyecto es empírico- analítico, que permite la experimentación del comportamiento del ruido con respecto a la flora presente en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero. El enfoque del proyecto es un enfoque mixto debido al análisis cuantitativo y cualitativo del mismo. En consecuencia, el tipo de investigación planteada es exploratoria – evaluativa. En la planeación y obtención de datos primarios es

necesario conocer las condiciones topográficas, bióticas y físicas del lugar de estudio, haciendo una relación de las variables para obtener un modelamiento con respecto al comportamiento del ruido. Del mismo modo, se realiza un planteamiento mediante fases que permiten identificar las variables, determinar los componentes de estudio y el impacto de estos, además de generar las pautas para la realización del proyecto y la determinación de las aplicaciones del mismo.

2.1 Fase 1

En el proceso de análisis de datos que indican las condiciones físicas del lugar, la impedancia es la variable principal a analizar, por lo tanto, según modelos electrónicos modelados y simulados en el 2006 por Gonzales et al. [8], lograron obtener resultados de impedancia acústica en materiales, lo que se puede adecuar para adquirir impedancias individuales en cada una de las plantas presentes en la zona. Al tener en cuenta potencia y distancia se debe calcular la impedancia de las plantas para poder generar el modelamiento del comportamiento. La impedancia se define como la capacidad de un material en alterar el recorrido de una onda, es decir, es la variable que permite medir la eficiencia con que la señal se propaga en un material. En este sentido, al tener una alta presencia de vegetación en el lugar de estudio se debe determinar la impedancia y mediante una validación estadística se generarán procesos de corrección de datos.

De manera que estos datos se obtendrán con un multímetro de referencia y el ruido será inducido mediante parlantes ubicado a cierta distancia; la planta que se va a analizar estará en medio del punto de incidencia y el receptor, en este caso el multímetro. Se realizará un muestreo a cada planta de 5 tomas cada 10 segundos medidos en dB, y así relacionar los parámetros de nivel de ruido y tiempo de exposición propuestos por el instituto de salud pública de Chile en el 2014 [9] que tienen como objetivo expresar la exposición que tienen las plantas; Después, con ruido blanco inducido por un computador y separados a un metro de distancia en el caso de las plantas, para el caso del gradual ubicado en la zona de estudio, se tomarán datos a 5 metros de distancia por condiciones de difícil acceso. Además, se tendrá un dato de referencia obtenido bajo condiciones ideales, el cual servirá para calcular la impedancia mediante el teorema propuesto por Graham Bell, y se generalizarán los datos obtenidos para las plantas concurrentes de una misma especie en diferentes ubicaciones de la zona de estudio.

La caracterización de la flora en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero se realiza como un insumo, por medio de fichas técnicas donde se presenta la información morfológica de interés, este insumo será procesado por medio de una base de datos espacial mediante el software ArcGIS 10.5; adicionalmente, la localización de cada planta se relaciona con la base de datos suministrada, mediante un levantamiento topográfico realizado por el método de cerros, propuesto en la octava edición del año 2000 por Wolf & Ghilani, [10]. Aclarando que es el método más preciso de obtención de datos, con relación al área de la zona de estudio planteada, delimitada por un estudio posterior de análisis estadístico de ruido por García & Mendoza, [11] usando el algoritmo Kriging indicador.

2.2 Fase 2

Alexander Graham Bell, fue el primero en hablar de la relación de potencia que tiene una onda acústica en relación con la distancia, por medio del álgebra lineal y las matrices, se determina una matriz logarítmica en base 10, tomando como referencia la teoría de Graham Bell y la dirección perpendicular de la vía, hacia donde está situada el área de estudio. Teniendo las curvas de nivel del área de estudio se puede traslapar la matriz generada con las alturas de nivel, dando como resultado la dispersión teórica del ruido. De los pocos métodos de modelamiento de sonido que se han realizado [12], han comparado dos métodos de interpolación de datos que son Distancia Inversa Ponderada (IDW) y Kriging ordinario; estos métodos indican la relación que existe entre la variable de punto a punto sin tener en cuenta la relación de potencia. En relación con las interpolaciones, se va a generar una interpolación que tenga en cuenta la propagación de la onda en relación con potencia y distancia, como lo menciona Graham Bell en su teorema. Para el caso de estudio se calculará por medio de álgebra de matrices y el resultado será el modelo aproximado del comportamiento del ruido.

El modelamiento final del comportamiento del ruido, se define como la relación entre las variables obtenidas y el uso de sistemas de información geográfica, permite interpolar los datos como se recomienda [13], con el objetivo de mostrar la aproximación del comportamiento del ruido en las zonas aledañas en donde este fenómeno puede propagarse, esta propagación depende de los factores que influyen directamente en el aumento de los dB, y este modelo 3D, con la intención de conocer el comportamiento de este fenómeno con respecto a la vía cercana al Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural cafetero en donde el tránsito vehicular es permanente.

2.3 Fase 3

Finalmente, el método de mitigación se diseñará en base a [14], al tener el modelamiento del ruido en cualquier ciudad, proponen métodos de mitigación mediante el uso de plantas; el método depende de la distancia del foco del ruido, la densidad en las hojas de la planta y la altura total de la planta. Este método permite disminuir el ruido






generado por tráfico vehicular, en un rango de 9 a 11 dB. Por otro lado, las barreras vivas de mitigación de ruido, producen efectos positivos en el ambiente, además de que son modelos económicos debido a que el mantenimiento de estos no es costoso en comparación a las barreras acústicas convencionales. Por esa razón, se analizan las características propias de las plantas como refracción del sonido o absorción del mismo, para la construcción de la barrera. En consecuencia, se asumirá el prototipo del diseño propuesto por la arquitecta Juliana Ramos Herrera, quién realiza un modelo de barrera viva, para adaptarlo a la zona y generar la mitigación del ruido. Este diseño se analiza como primera instancia de un sistema propuesto para disminuir el nivel de ruido, determinando mediante pruebas su viabilidad, y así, establecer la mitigación del ruido en la zona de estudio, teniendo un espacio agradable generado por la estructura planteada.

3. RESULTADOS ESPERADOS

3.1 Fase 1

En el proceso de cálculo de impedancias, se obtuvieron los resultados de seis especies de plantas más representativas del Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero, cada una de estas especies tienen sus respectivas características morfológicas que han sido determinadas por medio de fichas técnicas, realizadas con anterioridad en procesos de experimentación de la morfología que pueda absorber ruido. De modo que estas características morfológicas se conjugaron con los decibeles obtenidos en el proceso realizado en el campo con cada una de las plantas, así de esta forma se puede obtener una tabla que relacione ambos aspectos, tanto las características como la reacción en decibeles que tienen las especies frente al ruido producido por el computador y los parlantes a un metro de distancia, con excepción del guadual que fueron a 5 metros, por la zona donde se encuentra ubicado, en el área de estudio.

Tabla 2. Impedancia obtenida de las especies observadas en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero

Especies	Impedancia (%)	Características	Imagen
<i>Duranta erecta L</i>	13	Arbusto Flor en primavera y verano Fruto indehiscente Diámetro de cobertura: 1m	
<i>Gymnocladus dioicus</i>	24	Arbóreo Florescencia Fruto dehiscente Diámetro de cobertura: 4m	
<i>Codiaeum variegatum</i>	15	Arbusto Flores pequeñas y estacionales Fruto indehiscente Diámetro de cobertura: 1m	
<i>Dracaena deremensis</i>	18	Arbusto Flor en primavera y verano No tiene frutos Diámetro de cobertura: 1m	
<i>Musa paradisiaca</i>	24	Herbácea Florescencia Fruto indehiscente Diámetro de cobertura: área del cultivo	
<i>Guadua angustifolia</i>	15	Gramínea Florescencia Sin fruto Diámetro de cobertura: área de crecimiento	

Por consiguiente, teniendo la información del levantamiento topográfico realizado en campo por medio de los métodos mencionados anteriormente, se procede a consolidarla en el software ArcGIS 10.5, en donde se crea un DEM (modelo digital de elevación) por medio del método TIN (Triangulated Irregular Network), el cual permite ejecutar la sobre posición de los elementos bases para construir el diseño que componen las características morfológicas con los respectivos niveles de ruido y posteriormente la matriz teórica y la impedancia acústica. Asimismo, se realizó una prueba de detección y cuantificación al multímetro que es el instrumento de medición que se usó para obtener los porcentajes de impedancia de cada especie (Tabla 2). Esta prueba se efectuó por el método de mediciones repetitivas, en este procedimiento se usaron todos los multímetros existentes en el laboratorio de ingeniería, de la facultad de Ingenierías de la universidad La Gran Colombia, en condiciones de ruido y silencio absoluto, con el fin de definir estadísticamente cuales podrían ser los equipos que se encontraban en el intervalo de confianza.

Mediante el software Statgraphics, se realizó un análisis de las variables y se obtuvo el intervalo de confianza en ambas situaciones. De esta forma, se logró encontrar dos equipos aptos para la captura de datos en campo en relación al ruido, estos equipos fueron utilizados en las mediciones de los niveles del ruido con el fin de que no existiera ninguna incongruencia al usar otros equipos, es de aclarar que estos multímetros usados son solo de referencia y en ellos incide el ruido ambiental de la zona, no solo el producido por los vehículos que transitan la vía que comunica a Armenia con el municipio de La Tebaida, sino que tienen en cuenta cualquier tipo de sonido que esté presente en el momento de hacer la muestra. Las impedancias se generalizaron para plantas con características similares a las anteriores, es decir, a las analizadas en el proceso experimental. De esta forma se retroalimenta la base de datos espacial en el software realizada en ArcGis versión 10.5.

3.2 Fase 2

En cuanto a la dispersión teórica del ruido, se habla de una matriz teórica propuesta por Graham Bell, que permite relacionar los decibeles máximos obtenidos en la vía y posteriormente traslaparlos con la información recolectada en campo, por medio del levantamiento topográfico especialmente con las alturas de nivel. La matriz de Graham Bell tiene la ecuación (1).

$$dB = k + 20 \log\left(\frac{k_i}{d}\right) \text{ dB} \quad (1)$$

Donde:

k : Son los decibeles obtenidos a una distancia de referencia k_i

d : Distancia a la que se quieren obtener los decibeles

El dato de referencia es 110 dB a un metro de la fuente emisora de ruido (vía principal), dato obtenido en el 2018 por García & Mendoza, [10]. De esta manera, la matriz teórica que se generó en Excel tiene un número total de 200 filas y 135 columnas, donde cada casilla representa una coordenada espacial separada cada metro, que permite dimensionar la matriz en tres dimensiones. Teniendo como referencia esta matriz, en total se obtuvieron 26533 coordenadas con los dB teóricamente obtenidos. Con el fin de modelar los datos, se tiene como base el proceso anteriormente descrito. Los datos obtenidos se agregaron al software ArcGis, se ubicaron y orientaron con respecto a una imagen satelital tomada de google Earth (Figura 1), para realizar posteriormente el proceso de interpolación por el método de IDW.

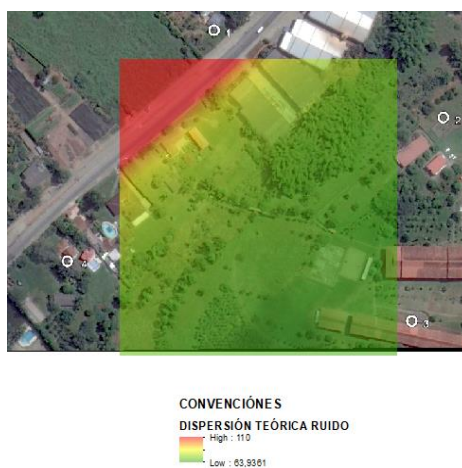


Figura 3. Proceso de interpolación de la matriz teórica

Los datos obtenidos del levantamiento topográfico se clasificaron para generar el diseño del mapa, usando ArcGis y AutoCAD. Por lo tanto, para todas las especies vegetales que se encontraran en el área de estudio, la clasificación dependía de la medida que tuviera el DAP (Diámetro de altura de pecho), es decir, para árboles grandes cuyo DAP es mayor a 70cm, árboles medianos entre 40cm y 70cm, árboles pequeños entre 10cm y 20cm y arbustos menores a 10cm; se estandarizó un área de influencia que tuviera relación con la cobertura de cada especie de la siguiente forma:

- Árboles grandes 4m
- Árboles medianos 2m
- Árboles pequeños 1m
- Arbustos 1m

En consecuencia el resultado que se obtiene después de unirlo con el área de estudio e instalaciones, fue una capa con todos los objetos que puedan tener impedancia acústica (Figura 2). En el proceso de rasterización, se genera una matriz con todas las impedancias dependiendo la forma de cada objeto como lo son las instalaciones educativas y la vegetación representativa ubicada en el área de estudio.

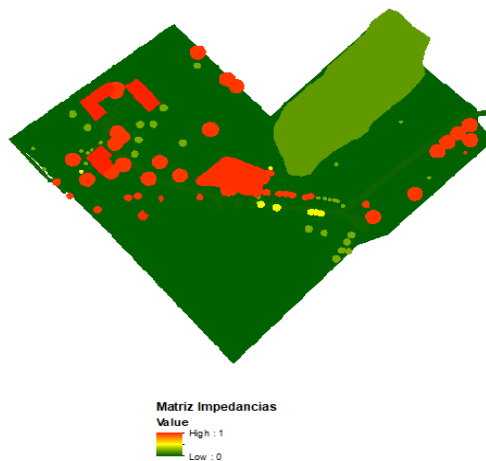


Figura 4. Matriz gráfica de impedancias

Al tener los polígonos de impedancias rasterizados, se usó la herramienta de sombras denominada *Hillshade*, que permite tener la proyección de las sombras de una forma, teniendo en cuenta el azimut y el ángulo, en este caso el azimut fue 320° y el ángulo de 10°. Con esta herramienta se calcula el área de cobertura que pueda alcanzar la impedancia de los objetos, de esta forma, se hizo un primer acercamiento al modelo realizando el cálculo por medio de la herramienta *raster calculator* (ecuación (2)).

$$\text{Modelo} = (\text{matriz teórica}) - (\text{matriz teórica} * \text{matriz impedancia}) \quad (2)$$

Por medio de la ecuación (2), se clasificó las sombras obtenidas como impedancias del 50% y los demás objetos sin impedancias, esto quiere decir, que se recalculó el modelo ya obtenido. Asimismo, con la implementación de la ecuación (3), el resultado obtenido se observa en la Figura 3.

$$\text{Modelo Plano} = (\text{Modelo}) - (\text{Modelo} * \text{Sombras}) \quad (3)$$

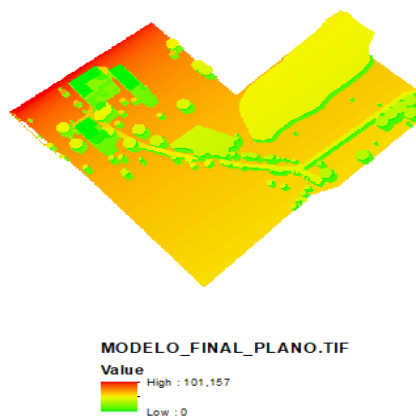


Figura 5. Modelo plano del ruido

A partir del modelo generado, se puede visualizar que en la zona de colores cálidos muestra niveles en dB de ruido altos y medios, las zonas entre amarillos y verdes muestran niveles de ruido apenas perceptibles. Con el fin de generar un mapa de sombras del DEM, con los mismos parámetros de la herramienta *Hillshade*, se realiza el proceso aplicado anteriormente. Además, se relativizó y se invirtieron los valores obtenidos con el fin de alcanzar los niveles de impedancia, según el relieve del área de estudio. Finalmente, se calcula el modelamiento mediante la ecuación (4).

$$\text{Modelo 3D} = (\text{Modelo plano}) - (\text{Modelo plano} * \text{Impedancia relieve}) \quad (4)$$

Llevando a cabo la ejecución del modelo final y al tener en cuenta el comportamiento lineal del ruido, además del relieve; se puede deducir como se comportarán los niveles del ruido dependiendo de la pendiente, si es negativa o positiva, el resultado de los niveles puede verse afectado por la variación de la misma. El resultado se visualiza en la Figura 4. En este sentido, se observa la ilustración del mapa de la zona de estudio que hace referencia al posible comportamiento del ruido con respecto a la presencia del tráfico vehicular en la vía principal ubicada entre la Tebaida – Armenia, en el departamento del Quindío. Estos mapas de ruido se convierten en poderosas fuentes de información para la planificación urbana [15], donde radica la importancia de contar con estos instrumentos que permiten asociar este contaminante a posteriores evaluaciones de impactos ambientales que tendrán en cuenta todo tipo de contaminación.



Figura 4. Modelo 3D Comportamiento del ruido

3.3 Fase 3

Al tener el modelamiento del ruido, se propone una forma de mitigación del mismo, por medio del uso de plantas que por sus características morfológicas puedan absorber o disipar el ruido de manera considerable, especialmente en la zona del Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero. Por este motivo, se tiene como modelo de referencia el diseño propuesto por la arquitecta Juliana Ramos Herrera (Figura 5). Este prototipo será analizado y puesto a prueba para determinar una ubicación asertiva del mismo y de las plantas que según sus características morfológicas se adapten mejor al diseño y a la zona de estudio. Mediante pruebas que se realizaran con el sistema planteado, se puede proponer un diseño que se adapte a diversas condiciones, permitiendo su implementación en zonas urbanas que presenten niveles de ruido altos, con el fin de mitigarlos.



Figura 5. Piel de fachada

4. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de impedancia individuales para cada planta han permitido identificar, cuál puede adaptarse a un modelo de mitigación del ruido dependiendo de sus características morfológicas, por lo tanto, se determinó con las variables iniciales por medio de las fichas técnicas que las plantas con tronco herbáceo y con mayor densidad de hojas tienden a absorber el ruido de una mejor manera, en cambio las plantas con características de tronco leñoso, tienen la cualidad de reflejar el ruido. Estos dos cambios que sufre la onda, pueden ser estudiados con otros tipos de plantas que no se presentan en la zona y así definir en evaluaciones futuras cual es el que mejor se adapta a una situación como la que se presenta en el Centro Grancolombiano del Paisaje Cultural Cafetero, dependiendo del tipo de planta que en este caso actúa como agente mitigante y por el cual se reducirían los niveles de ruido considerablemente con la implementación de barreras vivas con estratificación en la vegetación.

Los mapas de ruido modelados, permiten realizar un análisis para determinar el proceso de la gestión y manejo del ruido, además proporcionan las herramientas para determinar los puntos donde se encuentran los niveles más altos de ruido. Así, se logra estipular la comunidad que está siendo afectada por este fenómeno. Estos modelos generan las pautas para identificar las alternativas de control y mitigación, con el fin de evitar afectaciones en la salud de las personas expuestas.

REFERENCIAS

- [1] Fundación La Caixa. Contaminación acústica en las ciudades. [En línea]. Disponible: https://prensa.lacaixa.es/obrasocial/show_annex.html?id=2419, 2003.
- [2] R. Chocolle. Colección Que sais je? *Le Bruit*, pp 2-7, N° 1048, 1964.
- [3] C. Harris. *Manual de medidas acústicas y control de ruido*. McGraw-Hill, 1985.
- [4] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 del 2006. [En línea] Disponible: <http://corponarino.gov.co/expedientes/jurídica/2006resolucion627.pdf>, 2006.
- [5] M. López, J. Mendoza, R. Téllez. Desarrollo de una propuesta de modelo e indicador de ruido generado por la operación del transporte carretero en México. [En línea]. Disponible: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt324.pdf>, 2009.
- [6] L. Gómez, J. Mendoza, M. López, R. Téllez, W. Martínez, & E. Alonso. Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la república de México. [En línea]. Disponible: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt322.pdf>, 2009.
- [7] Norma Chilena Oficial, NCh2785. Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción. [En línea]. Disponible: https://www.normativaconstruccion.cl/index.php?option=com_nch&view=nch&tipo=1&Itemid=284&limitstart=120, 2003.
- [8] H. González, G. Vásquez, & D. Arroyave. "Modelo, simulación y diseño de un filtro resonador de Helmholtz para un sistema de ventilación mecánico". *Scientia et technica*, pp. 167-172, 2006.
- [9] Instituto de salud pública Gobierno de Chile. Metodologías para obtener la dosis de ruido diaria. [En línea]. Disponible: <http://ingenieriaacustica.cl/blog/wp-content/uploads/2014/12/metodologiasparaobtenerladosisderuidodiariardr.pdf>, 2014.
- [10] P. Wolf, & C. Ghilani. *Topografía*. Octava ed. España: Alfaomega, 2000.
- [11] M. Mendoza, & H. García. Análisis de la dinámica de la contaminación acústica del Campus La Santa María, Universidad La Gran Colombia, 2014.
- [12] D. Murillo, I. Ortega, J. Carrillo, A. Pardo, & J. Rendón. "Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos". *USBMed*, pp. 63-68, 2012.
- [13] M. Ortega, J. Cardona. Metodología para la evaluación del ruido urbano en la ciudad de Medellín. [En línea]. Disponible: <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/fnsp/article/view/482/418>, 2005.
- [14] L. Ow, S. Ghosh. "Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation". *Applied Acoustics*, pp. 15-20, mayo 2017.
- [15] E. Muscar. "Anales de Geografía de la Universidad Complutense", El ruido nos mata en silencio. pp. 149-161, 2000.

Educación ambiental en Colombia y en el mundo

Pedro L. Blanco J.¹

Adriana L. Torres S.²

Jorge L. Rodríguez M.³

Angie de los M. Castillo M.⁴

Ricardo de la Hoz L.⁵

Universidad Libre seccional Barranquilla – Colombia

Ante la problemática ambiental que se vive en la actualidad a nivel mundial, la educación ambiental juega un papel fundamental como mecanismo de prevención, formando a los estudiantes desde edades tempranas con el propósito de que estos comprendan la importancia del cuidado del medio ambiente y cómo sus acciones tienen un impacto directo en este. En este sentido, la educación ambiental debe constituir un espacio en el cual los estudiantes de distintos niveles estos no solo aprendan conceptos básicos del tema, sino que, además, desarrollen valores que generen una genuina preocupación por el ambiente. Las instituciones y profesores tienen que saber que el fin de la educación ambiental es generar aptitudes y actitudes ambientales y conductas sostenibles en los estudiantes, es decir, que estos consideren el ambiente como factor fundamental en sus acciones, sensibilizándolos para asumir su cuidado. Para que esto sea posible, el estudiante no debe ver la problemática ambiental como un problema general, sino que también debe saber que cada acción personal o social tiene repercusiones en el medio ambiente. Dada la importancia de la educación ambiental como pieza fundamental en la generación de bases para el desarrollo sostenible, en el presente escrito se explora el estado actual y tendencias sobre el tema encontradas en Colombia y otros países. En general, se encontraron distintos enfoques y filosofías sobre el tema, aunque prevalece el concepto de desarrollo sostenible en distintos niveles de formación.

1. INTRODUCCIÓN

La educación ambiental cada vez más juega un papel fundamental en la formación de niños, jóvenes y adolescentes de todo el mundo. Conocer cómo funcionan los diferentes ecosistemas y seres vivos, al igual que la preservación de los mismos, es de vital importancia. No se puede desconocer la problemática global que existe con relación a la contaminación, y la prevención es una de las mejores herramientas a enseñar si se pretende lograr un cambio en el comportamiento humano, con respecto al trato al medio ambiente.

La contaminación ambiental es un problema que causa cada vez más preocupación a nivel global; por ello tratados como el protocolo de Kioto, la Carta Mundial de la Naturaleza (*World Charter for Nature*) o la conferencia de Estocolmo fueron desarrolladas para preservar el medio ambiente y disminuir los niveles de contaminación. En particular en Colombia, la contaminación y sus efectos se hacen cada vez más evidentes. Según el DNP (Departamento nacional de Planeación) la contaminación en el aire es un problema ambiental cada vez más percibido por los habitantes de las principales ciudades del país. A su vez, el periódico El País ha develado estudios en los cuales afirman que:

En el mundo, el 87% de la población vive en lugares donde los niveles de calidad del aire son perjudiciales para la salud. La realidad en Colombia no es ajena, pues en el 76 % de los municipios que realizan vigilancia de la calidad del aire se registran niveles de contaminación por encima a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud y que serían perjudiciales para su población [1].

Estos datos son alarmantes, debido a que está demostrado que la contaminación en el aire puede conllevar a problemas serios en la salud del ser humano. Este capítulo surge de una revisión a la literatura, donde se muestran todos los conceptos asociados a la educación ambiental en Colombia y el mundo, con el fin de conocer las diferentes metodologías y corrientes existentes en esta materia.

2. EDUCACIÓN AMBIENTAL

La educación ambiental se define como un proceso en el cual un individuo o comunidad adquiere conciencia de su ambiente, es decir, aprende conceptos y valores que le permitan desarrollar destrezas y experiencias con el fin de actuar en la resolución de problemas ambientales, presentes y futuros, además de lograr mantener un nivel de desarrollo, sin poner en riesgo el bienestar del ambiente [2]. Sin embargo, es necesario mencionar que este proceso es dinámico, es decir, debe adaptarse según la situación social, geográfica, cultural, económica y política del lugar en que sea impartida. UNESCO define 4 objetivos de la educación ambiental [3]:

- Comprender la naturaleza compleja del ambiente resultante de la interacción de sus aspectos biológicos, físicos, sociales y culturales
- Percibir la importancia del ambiente en las actividades de desarrollo económico, social y cultural.

¹ pedrol-blancoj@unilibre.edu.co

² adriana-l-torress@unilibre.edu.co

³ jorgel-rodriguez-m@unilibre.edu.co

⁴ angied-castillom@unilibre.edu.co

⁵ ricardo.delahozl@unilibre.edu.co

- Mostrar las interdependencias económicas, políticas y ecológicas del mundo moderno en el que las decisiones y los comportamientos de todos los países pueden tener consecuencias de alcance internacional.
- Comprender la relación entre los factores físicos, biológicos y socioeconómicos del ambiente, así como su evolución y su modificación en el tiempo.

Según Priotto [4] la educación ambiental en América Latina y el Caribe fue introducida e implementada en la década de los 90. Al realizar un diagnóstico se evidenció que en los planes de educación en todos los niveles (Básico, Medio y Medio Vocacional) existe una elevada saturación de contenidos de forma enciclopédica, que no dan como resultado una buena conciencia ambiental entre los estudiantes. Además, indica “casi no se mencionan problemas como el consumo, la globalización, la pobreza, la agricultura sustentable, el cambio climático y la biodiversidad”.

Es importante mencionar que la educación ambiental, tal y como se explicó previamente, se imparte de diferente manera dependiendo de dónde se realice, esto con el fin de buscar la solución de problemas locales que ayuden a crear un impacto ambiental positivo en la comunidad. Tal y como indica Espejel [5], esto será posible si la educación ambiental no solo se enfoca a la decisión y aprendizaje de conceptos, sino que, además, desarrolla en los estudiantes aptitudes que le permitan tener participación y pensamiento crítico, con lo cual puedan identificar problemas ambientales, plantear posibles soluciones y generar una conciencia ambiental en la comunidad.

La educación ambiental no debe limitarse a la explicación y búsqueda de soluciones de los problemas ambientales, sino que debe mantener un enfoque holístico, entendiendo que problemas económicos, sociales y políticos pueden derivar en el deterioro del medio ambiente, por lo cual poder entender estos problemas también es de vital importancia si se busca crear una conciencia ambiental. Además, Burgos [6] menciona que la educación ambiental, independientemente de la metodología usada, requiere de un compromiso por parte de estudiantes y profesores, los cuales deben entender que lo que se busca es generar un cambio social a partir de un cambio de conciencia personal, cambio que debe encaminarse en lograr un interés genuino por el medio ambiente y la preservación de este.

2.1 Contenidos de la educación ambiental

Cuello [14] indica que los contenidos de la educación ambiental desempeñan un rol fundamental en la pedagogía, por ello su correcta elaboración determinará la calidad del proceso de formación. Es por ello por lo que un contenido de educación ambiental debe cumplir con los ítems explicados a continuación:

- El contenido de la educación ambiental no debe limitarse a temas ambientales, sino que, además, debe profundizar temas sociales y urbanos que permitan a los estudiantes comprender la relación que existe entre el comportamiento de su comunidad y el medio ambiente.
- Establecer la relación que existen entre hechos o sucesos que puedan parecer aislados o pertenecientes a otras asignaturas con el medio ambiente.
- Estudiar conceptos que permitan al estudiante tener una noción real de la problemática ambiental actual.
- Acentuar la figura del hombre como un elemento más del medio ambiente, con capacidad de tomar acciones que le impacten de manera directa.
- Considerar la interconexión espacial, es decir, lograr que el estudiante comprenda que por muy pequeña que sean las acciones que este tome para preservar el medio ambiente, estas tienen consecuencias globales.
- Enseñar al estudiante que el cuidado del medio ambiente es un problema global en el que no todos están interesados, existiendo grupos de personas que por causas económicas o políticas no quieren que medidas proambientales necesarias sean llevadas a cabo.
- Lograr que el estudiante desarrolle conductas y comportamientos ambientales en las instituciones educativas, aptitudes que el estudiante adoptara progresivamente en su vida cotidiana logrando un cambio social real.

2.2 Principios metodológicos de la educación ambiental

Según Galiano [15] la educación ambiental debe basarse en ciertos principios metodológicos que ayuden al profesor a transmitir de manera más efectiva los conocimientos y, a la vez, ayude al estudiante a comprender la importancia de adoptar conductas que promuevan la conservación del medio ambiente. Galiano define los siguientes principios metodológicos como los principales para una correcta pedagogía de la educación ambiental.

1. *Propiciar contacto con la realidad ambiental.* Un problema común de la educación ambiental es enfocar completamente la pedagogía en lo reflejado en libros de texto, sustituyendo la realidad actual. Aunque los conocimientos y conceptos descritos en libros son importantes, también es necesario que el profesor les muestre a los estudiantes la realidad actual de su localidad y del mundo, involucrando a los estudiantes en la problemática ambiental y haciendo posible que estos desarrollen una preocupación genuina por el cuidado medioambiental.

Para esto, el profesor debe incentivar a los jóvenes a sensibilizarse con su entorno, identificar los conceptos y situaciones estudiadas en el aula en su diario vivir y partir de esta realidad para plantear posibles soluciones. Esta metodología se apoya en muchos casos con el trabajo de campo, donde el profesor desarrolla clases en un entorno fuera del aula, brindando un contacto directo entre el estudiante y el medio ambiente.

2. *Abordar la educación ambiental a partir de problemas medioambientales.* A partir del contacto entre el alumno y el medio ambiente propiciado en el punto anterior, el estudiante pudo percatarse de algunos problemas ambientales que se presentan en su realidad, a partir de los cuales la educación ambiental debe desarrollar su proceso de formación, es decir, se debe aprovechar el interés de los estudiantes en estos problemas, para realizar un estudio sobre sus causas y posibles soluciones. Esto es de vital importancia, debido a que el estudiante percibe lo estudiado como una solución a un problema de su comunidad, otorgándole a este un objetivo claro y por tanto una motivación para desarrollar el curso.
3. *Impulsar la interdisciplinariedad durante el estudio de la educación ambiental.* Es muy común que se trate la educación ambiental como una rama de las ciencias naturales solamente, lo cual es un error. La educación ambiental y los problemas medioambientales de la actualidad son causados por una gran variedad de factores; para el estudio de estos factores es necesario que la educación ambiental se apoye en el estudio de otras ciencias. La economía, cultura, política o geografía son algunas de las disciplinas que el estudiante debe conocer, ya que estas tienen un impacto directo en la realidad medioambiental actual, por lo cual, la educación ambiental debe ayudarse de ciencias que estudien estas disciplinas con el propósito de que el estudiante pueda comprender la relación que existe entre ellas y el medio ambiente, y sea capaz de brindar soluciones que tengan el menor impacto social y ambiental.
4. *Fomentar la investigación como medio importante en la educación ambiental.* El fomentar la investigación es un factor importante durante el Desarrollo de la educación ambiental, incentivar al estudiante a desarrollar un comportamiento exploratorio de manera espontánea, en el cual los estudiantes sean capaces de obtener conocimientos fuera del aula por interés propio, jugará un papel fundamental durante el desarrollo de un pensamiento crítico y evaluativo del estudiante
5. *Incentivar el trabajo en equipo.* La educación ambiental debe lograr que el estudiante comprenda que los problemas ambientales son problemas sociales, por lo cual el trabajar en equipo juega un papel fundamental si se pretende generar un cambio generalizado en las conductas proambientales. Es por ello que el profesor debe desarrollar actividades que propicien que los estudiantes conozcan las diferentes opiniones de sus compañeros y, mediante un intercambio de ideas, planteen soluciones que ayuden a conservar el medio ambiente.

2.3 Evolución de la educación ambiental

Tal y como explica Núñez [16], la educación ambiental ha ido evolucionando a lo largo del tiempo sus conceptos, metodologías e importancia. Dicha evolución ha ido de la mano junto con el desarrollo mismo del ser humano, debido a que cada vez son más perceptibles los problemas ambientales causados por el descuido generalizado respecto al cuidado ambiental, anteponiendo en muchos casos el desarrollo económico, político y social sobre el bienestar del medio ambiente. A continuación, se detallan las diferentes etapas que ha tenido la educación ambiental a lo largo de los años [16].

- *Educación Ambiental antes de los años 70.* Durante este periodo, la educación ambiental era concebida como el estudio de la naturaleza, impartándose desde edades tempranas. Al estudio de la naturaleza y su cuidado se le da un enfoque conservacionista, es decir, se tenía como uno de sus objetivos que los estudiantes comprendieran que la conservación de esta era importante. Sin embargo, no se hacía el énfasis necesario, lo cual es comprensible si se tiene en cuenta la época; cabe recordar que en los 60's el mundo estaba atravesando situaciones como la Guerra Fría o un auge económico sin precedentes, promoviendo un pensamiento de consumismo generalizado. Temas como emisiones, calentamiento global o deforestación no generaban gran interés para la época. Durante estos años, "las experiencias pioneras se relacionan con itinerarios y actividades en la naturaleza, salidas al campo etc., impulsadas por grupos de maestros y profesores innovadores e inquietos" tal y como lo indica Gonzales [17, p. 14].
- *Educación Ambiental en los años 70.* Esta época es de gran importancia debido a que se sientan los pilares de la actual Educación ambiental. En esta década nacería una preocupación mundial con respecto al ambiente, celebrándose pactos y tratados importantes en busca de la preservación medioambiental. En 1970 la UNESCO y UICN definen por primera vez la educación ambiental como "Un proceso que consiste en reconocer valores y aclarar conceptos relacionados con el medio ambiente". Un año más tarde, en 1971, la OEA realizaría la *Conferencia de educación ambiental y el medio ambiente de las Américas*, donde se afirmaría que la educación ambiental brinda habilidades al estudiante que le permitan razonar con criterio propio, emitiendo juicios de valor sobre problemas del medio (político, ambiental, económico y filosófico). En 1972 se creó el *Programa de Naciones Unidas para el*

Medio Ambiente (PNUMA), el cual, por primera vez, plantea la educación ambiental como una necesidad, proclamándola una asignatura vital en la formación de jóvenes con la intención de hacer que las nuevas generaciones contemplen el cuidado del medio ambiente como una acción necesaria para la vida, iniciando una transición en el enfoque de la educación ambiental, pasando de la protección de la naturaleza a la protección del medio ambiente. En 1975, durante el seminario internacional de educación ambiental celebrado por la UNESCO, se reafirmaría la necesidad de incluir en el proceso de formación académica de jóvenes, la educación ambiental, aludiendo que esta propiciaría el despertar de la conciencia proambiental, derivado de la adquisición de conocimientos y dando como resultados aptitudes y conductas que velarían por el cuidado del medio ambiente. Dos años más tarde, en 1997, se celebraría la primera conferencia intergubernamental sobre educación ambiental en Tiflis, en la cual, se establecen las principales directrices para el cuidado del medio ambiente en el sistema educativo.

- *Educación Ambiental en los años 80.* Durante este periodo, los asuntos ambientales juegan un papel fundamental a nivel mundial, siendo incluidos en las políticas de gobiernos de muchos países, convirtiéndose la educación ambiental en un medio para lograr en cambio global en pro del cuidado ambiental. Es necesario mencionar, que en esta época comenzarían a realizarse estudios que demostrarían el daño ambiental que ha causado el desarrollo del ser humano, por lo cual la situación ambiental actual, pasaba de ser una preocupación a un problema real. También, se definiría el Desarrollo Sostenible en 1987 como aquel desarrollo capaz de satisfacer las necesidades de recursos presentes sin poner en riesgo la capacidad de generar nuevos recursos que serán usados por las futuras generaciones [18]. Este concepto (desarrollo sostenible), sería introducido de manera activa en la educación ambiental.
- *Educación Ambiental en los años 90.* A inicios de los años 90, la percepción de los problemas ambientales era cada vez más grande, problemas como la deforestación, calentamiento global, contaminación en el aire y en las fuentes hídricas eran cada vez más evidentes, lo cual le da a la educación ambiental un papel aún más importante. Ante esta problemática, tal y como explica Núñez [16], se le da especial cuidado a la metodología empleada en la educación ambiental, comprendiendo que la adquisición de conocimientos académicos no es lo único importante en la formación de la educación ambiental. Además, durante esta década, la educación ambiental comienza a aparecer en planes de estudio de instituciones de educación superior, con el propósito de que los futuros profesionales, tengan la preservación del medio ambiente y sus recursos naturales como factor fundamental en el desempeño de sus actividades.
- *Educación Ambiental en el siglo XXI.* A partir del año 2000, la educación ambiental comienza a ser percibida como una asignatura de estudio indispensable en el proceso formativo de los estudiantes. En este sentido, la UNESCO desarrollaría en el año 2003 un esquema de implantación internacional, aprobado en su conferencia general. Este esquema surge como respuesta a la emergencia medioambiental global actual y de él se derivaría la denominada “década de la educación para el desarrollo sostenible 2005-2014”, en la cual, como su nombre lo indica, tiene como meta que los estudiantes tengan claridad en 3 conceptos fundamentales: el desarrollo socioeconómico global, la explotación de recursos naturales necesarios para este desarrollo y la importancia de la preservación de los mismos. Que los estudiantes sean capaces de comprender estos conceptos es de gran importancia, a causa de que la profesionalización brindada a la educación ambiental en los años 90 se busca que los futuros profesionales tengan capacidad de hacer uso de los recursos para un desarrollo continuo sin comprometer los recursos de futuras generaciones. De esta forma, conceptos como sostenibilidad o desarrollo sostenible toman gran importancia durante este periodo hasta el presente.

2.4 Normativa de la educación ambiental en Colombia

Paz [7] menciona que “El salto social, hacia el desarrollo humano sostenible” fue el Plan Nacional de Desarrollo Ambiental creado en el año de 1997, el cual define las políticas y acciones de la educación ambiental en Colombia. En este documento se consideraron variables como la pobreza y la violencia para tratar la educación ambiental, siendo estas variantes realidades del país que influyen en gran medida el cuidado del medio ambiente al ser elementos interrelacionados dentro del sistema general. El Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Educación Nacional [8] indicaron que:

para obtener un nuevo ciudadano, se requiere de la construcción de un proceso de sensibilización, concientización y participación y propende porque mediante la educación el hombre mejore su actuación sobre la naturaleza, haciendo un aprovechamiento sostenible de los recursos de que dispone y a los cuales tiene acceso (p.7).

Es decir, el Plan Nacional de Desarrollo busca que, mediante la educación ambiental, las próximas generaciones puedan comprender el impacto de sus acciones sobre el ambiente y se preocupen por la preservación del mismo, esto sin impedir un desarrollo económico y social que sea sostenible en todo momento.

No se puede desconocer la relación que tiene el conflicto armado con la preservación del medio ambiente en Colombia, por lo cual el Gobierno siempre ha tenido en cuenta este aspecto al momento de realizar los planes de educación ambiental, buscando promover la ética, responsabilidad, conocimiento y respeto que ayuden a los ciudadanos a tomar

acciones individuales y grupales con el fin de que la sociedad colombiana tenga una conciencia ambiental muy ligada a la búsqueda y preservación de la paz. Además, Paz [7] indica que los lineamientos curriculares para el área de ciencias naturales y educación ambiental de 1995 definen 5 grandes objetivos, los cuales son:

- Despertar *conciencia* por el cuidado del ambiente y la problemática actual del mismo
- Impartir los *conocimientos* medioambientales definidos en la comunidad científica
- Construir *Valores* que creen una mayor preocupación dando como resultado una mejora en las conductas ambientales y la protección del medio ambiente.
- Desarrollar las *competencias* que permitan a los estudiantes identificar, anticipar y resolver problemas medioambientales
- Buscar que los estudiantes *participen* al implicarse de manera dinámica en la solución de los problemas medioambientales

En su artículo, Paz [7] recuerda que la educación ambiental en Colombia busca que los estudiantes sean capaces de asociar los problemas ambientales a factores naturales, sociales, económicos políticos, culturales, filosóficos, entre otros, ejerciendo una reflexión crítica del papel que juega la ciencia y la naturaleza en el hombre y la sociedad colombiana. Con el fin de entender la complejidad del asunto y la repercusión que tendrán cualquiera de estos factores en un apropiado comportamiento proambiental. Todo esto, sin dejar de recordar los compromisos internacionales que tiene el estado por medio de acuerdos o tratados que buscan la preservación del medio ambiente global.

2.5 Relación e implicación de la educación ambiental con las conductas y aptitudes proambientales

Tal y como se ha explicado previamente, la educación ambiental, en el mejor de los casos, podrá hacer que los estudiantes tengan conocimiento acerca del ambiente, sus problemas y estrategias para su protección. Sin embargo, este debe estar enfocado en desarrollar aptitudes y conductas en el cuerpo estudiantil que le permitan actuar en pro de la protección del medio ambiente y la solución de los problemas ambientales. Por ello, Sauv  (citado por  lvarez [9]) explica que la educación ambiental debe realizar un esfuerzo que proporcione los siguientes saberes al estudiante:

- *Saber-Hacer*, tal y como su nombre lo indica, busque hacer que los estudiantes tengan conocimiento acerca de la información relacionada con el ambiente tanto a nivel local como a nivel mundial, así como todas las implicaciones del mismo.
- *Saber-Ser*, el cual busque crear un interés genuino en los estudiantes en el cuidado y conservación del ambiente, haciendo que este desarrolle valores que le permitan comprender la importancia de un desarrollo sostenible y de una conciencia proambiental.
- *Saber-Actuar*, quizás el más importante de todos, debido a que este se enfoca en desarrollar habilidades, un pensamiento crítico y autónomo en los estudiantes, que les permita estudiar situaciones, identificar los problemas ambientales presentados, y tomar decisiones y acciones individuales o grupales que busquen la reducción, control o eliminación de los mismos.

Sin embargo, la enseñanza de estos saberes supone grandes desafíos tanto para el cuerpo profesor como para los estudiantes. Por un lado, tal y como explica Orr (citado por  lvarez [9]) se desarrollará una *lección de Hipocresía*, en la cual los estudiantes conocerán los errores que se comenten y que provocan un deterioro progresivo de los recursos naturales y del ambiente mismo, sin sentirse responsables en absoluto. Y, por otro lado, existe la denominada *Frustración de conciencia* por parte de Dunlap citado por  lvarez [9], la cual, describe el desaliento desarrollado en muchos estudiantes al notar el poco interés de la sociedad en la conservación y cuidado del medio ambiente.

2.6 Corrientes de la educación ambiental

Sauv , citado por Paz [7], señala que la educación ambiental puede seguir cualquiera de las siguientes 14 corrientes, dependiendo de factores tales como contexto, enfoque y metodología:

1. *Naturalista*. Esta corriente de la educación ambiental se caracteriza por contar con un enfoque cognitivo, es decir, se enfoca en procesos mentales tales como la memoria, el pensamiento, la inteligencia, el lenguaje, el raciocinio y la resolución de problemas planteados. Esta corriente tal y como lo indica su nombre, se enfoca en la concepción de naturaleza como lo más importante, aprendiendo cuanto se pueda de la misma y a convivir con ella, por lo cual, la metodología más comúnmente usada al desarrollar dicha corriente es la educación al aire libre o natural, que les permita a los estudiantes sensibilizarse con su entorno natural y conocer cómo funciona. Sin embargo, esta corriente tiene como principal desventaja el ignorar en muchos casos factores externos, como la necesidad de extracción de recursos naturales y cómo esto contribuye al desarrollo socioeconómico.

2. *Conservacionista*. Esta concibe la naturaleza como un recurso, por lo cual incentiva a los estudiantes a conservar los recursos (agua, suelo, animales, etc.) con el fin de obtener una mayor calidad al momento de su extracción para el consumo humano, es decir, incentiva a los estudiantes a conservar la naturaleza con el propósito de maximizar los recursos extraíbles futuros. Sigue el modelo pedagógico conocido como las 3 R (*reducción, reutilización y reciclado*). Esta corriente siempre prioriza el bienestar social sobre cualquier otro factor, lo que le impide, en algunos casos, tomar decisiones más ambientalmente responsables.
3. *Resolutiva*. Esta corriente busca estudiar todos los problemas medioambientales, locales y mundiales, con el fin de buscar soluciones óptimas mediante la construcción de proyectos colectivos. Esta corriente tiene un enfoque cognitivo y social, debido a que parte de los conocimientos académicos acerca de los problemas ambientales, y a través de estrategias como la modificación del comportamiento humano, busca brindar soluciones que ayuden a un mejoramiento de las condiciones de la sociedad con respecto a su entorno.
4. *Sistémica*. La corriente sistémica tiene un enfoque cognitivo, en el cual se concibe el medio ambiente como un conjunto de factores sociales y biológicos interrelacionados entre sí. Y esta es precisamente su intención, desarrollar en el estudiante las habilidades conceptuales que le permitan identificar dichos factores, por lo cual este tipo de educación ambiental suele utilizar metodologías como la educación al aire libre. Esta corriente tiene como principal ventaja el hacer posible que los estudiantes puedan identificar los problemas ambientales de su entorno, conociendo los factores que lo producen y pudiendo plantear soluciones. Sin embargo, no logra en muchos casos desarrollar la conciencia proambiental en los estudiantes, quienes verán los problemas medioambientales como cualquier otro, no prestándole la debida atención.
5. *Científica*. Esta corriente se caracteriza por denominar el medio ambiente como un problema a resolver mediante un proceso cognitivo en los estudiantes, el cual, al igual que en muchas ciencias, se estudiarán sus causas y posibles soluciones, a partir de hipótesis obtenidas por observación para su posterior verificación experimental. Esta corriente, si bien desarrolla en el estudiante habilidades de observación y obtención de conocimiento, resulta un tanto tediosa debido a que los estudiantes en muchas ocasiones no se motivarán al concebir el estudio del medio ambiente como una ciencia.
6. *Humanista*. Esta corriente de la educación ambiental considera al medio ambiente como una fuente de vida, lo cual debe ser preservada por su influencia histórica, cultural y socioeconómica. Aunque tiene un enfoque cognitivo, esta corriente además de los conocimientos académicos, busca que los estudiantes comprendan el valor del medio ambiente y la importancia que representa su conservación. La metodología pedagógica de esta corriente consiste en el conocimiento de conceptos por medio de lecturas que se combinarán con salidas de campo, donde entrarán en contacto con grupos poblacionales que les permitirá observar la influencia del medio ambiente.
7. *Moral/Ética*. La corriente moral, también conocida como la corriente ética, basa su pedagogía siguiendo un enfoque afectivo, es decir, un enfoque basado en las emociones del estudiante, ya que esta es precisamente la intención de esta corriente, buscar sensibilizar al estudiante acerca de la importancia del cuidado del medio ambiente, desarrollan valores que le impulsen a tomar decisiones proambientales. La educación de esta corriente se divide en tres etapas, sentir, pensar y actuar. En la primera parte, el estudiante aprende del entorno, observa los problemas ambientales, se sensibiliza con el ambiente, desarrolla un interés genuino en su preservación; en la segunda etapa, piensa en posibles soluciones para estos problemas, las cuales pueden ser llevadas a cabo por él mismo y el entorno que le rodea; por último, toma acciones alineadas a las soluciones previamente pensadas. Esta corriente busca crear conciencia en el estudiante, enseñándole que todas sus decisiones tienen un impacto ambiental, desarrollando y definiendo su moralidad ambiental.
8. *Holística*. Esta corriente de la Educación ambiental estudia el medio ambiente como un todo, es decir, comprende el medio ambiente como el producto de la interacción de factores. Comprende que las personas, ideologías, estudios, sociedades, economías, etc. afectan el medio ambiente ya que se encuentran relacionados, y es precisamente el estudio de estas relaciones lo que busca esta corriente, comprender cómo cada decisión personal, social, económica, etc. afecta directamente la actualidad medioambiental. Siguiendo un enfoque cognitivo, busca brindar los conocimientos adecuados en el estudiante para identificar la relación existente entre cualquier factor externo y el medio ambiente, y con base en dicha relación poder plantear las soluciones adecuadas.
9. *Bio-regionalista*. Esta corriente tiene como intención que el estudiante comprenda la realidad ambiental de su comunidad, producto de la industrialización, economía, políticas y decisiones locales. Y gracias a su enfoque participativo, encontrar soluciones como comunidad a los problemas ambientales que allí se presenten. Con un enfoque social, lo que precisamente busca esta corriente es que el estudiante tenga un pensamiento crítico acerca del comportamiento de su comunidad, lo cual le permita identificar en qué se está equivocando y cómo dejar de hacerlo. Los profesores que imparten la educación ambiental bajo esta corriente a menudo crean actividades que involucren a los padres o allegados de los estudiantes, buscando extender el mensaje para lograr mayor impacto.

10. *Práxica*. Esta corriente concibe al medio ambiente como una variable de las acciones llevadas a cabo por el ser humano, por ello se enfoca en generar un sentimiento de reflexión en el estudiante para, posteriormente, actuar. Siguiendo un enfoque sociocognitivo, incentiva al estudiante a investigar acerca de la problemática ambiental actual, identificar qué acciones propias y sociales que han causado dichos problemas y generar un cambio de actitud personal y social que permita generar un cambio favorable a la situación medioambiental.
11. *Crítica-social*. Bajo el enfoque de esta corriente se busca que el estudiante desarrolle un pensamiento crítico, comprendiendo que todas las acciones llevadas a cabo por la sociedad tienen un impacto ambiental y, por lo tanto, es necesario la concientización general. Para esto, es necesario que el estudiante no solo identifique cuáles son las conductas sociales que atentan contra la preservación del medio ambiente, sino que, además, entienda que, si bien el Desarrollo socioeconómico es necesario, el logro de la sostenibilidad es fundamental, permitiendo una adecuada relación entre la sociedad y el ambiente que le rodea.
12. *Etnográfica*. Esta corriente de la educación ambiental, impartida con un enfoque social, busca que el estudiante comprenda el impacto que tiene la cultura sobre el medio ambiente; para ello, el conocimiento de elementos culturales como la lengua, tradición, costumbres y leyendas de ciertas culturas y, en específico, la propia es fundamental. La pedagogía en esta corriente se caracteriza por hacer una adaptación de la realidad cultural que rodea a sus estudiantes, permitiéndoles sentirse involucrados en el proceso desde el punto de vista de sus creencias y costumbres, lo cual hace que se genere un interés en él estudiante.
13. *Eco-educación*. El objetivo principal de esta corriente de la educación ambiental es formar al estudiante de manera integral, manteniéndolo siempre en contacto con el medio ambiente, para que de esta manera comprenda su importancia en su propia vida y desarrolle valores que le permitan velar por su cuidado, buscando solución a los problemas que se presentan y generan, por ejemplo, la contaminación. Esta corriente, se caracteriza por no desarrollar profundamente el aprendizaje conceptual, sino que busca que el estudiante sienta que su crecimiento como persona depende en gran medida del medio ambiente y de su cuidado.
14. *De Sostenibilidad*. Esta corriente de la educación ambiental tiene como característica fundamental el estudio de la relación existente entre la economía y el cuidado del medio ambiente, por lo cual el estudiante debe ser capaz de comprender que el desarrollo económico juega un papel fundamental en la sociedad; sin embargo, este desarrollo debe ser sostenible, es decir, la sociedad debe encontrar un equilibrio en el consumo de recursos naturales que le permita hacer uso de ellos para desarrollarse económicamente, sin comprometer el acceso a dichos recursos en el futuro. Los estudiantes de esta corriente tendrán la capacidad de comprender la importancia que tienen los recursos en la sociedad y su propia vida, teniendo siempre en mente que se puede hacer un uso responsable de los mismos sin provocar su futura escasez. Para el estudio de esta corriente, los estudiantes deben tener muy en claro la situación política, económica, tecnológica y social de su comunidad que les permita avanzar cada vez más a un desarrollo totalmente sostenible, haciendo uso de energías renovables y del menor número de productos contaminantes, sin poner en riesgo su desarrollo económico.

2.7 Papel del profesorado y de las instituciones en la educación ambiental

Al igual que la concepción del medio ambiente, la educación ambiental y su metodología ha ido evolucionando a lo largo del tiempo. Los profesores, juegan un papel fundamental en este proceso de aprendizaje, siendo ellos los encargados de formar a los jóvenes con las metodologías que consideren acertadas, con el fin de lograr que estos no solo obtengan conocimientos académicos, sino que se preocupen realmente por el cuidado y conservación del medio ambiente. Fernández [11] señala que el profesor responsable de la educación ambiental tiene 5 funciones fundamentales que debe realizar:

- *Concienciar*. El profesor debe ser capaz de lograr que el estudiante comprenda tanto los problemas medioambientales de la actualidad como el reconocimiento de los efectos de su comportamiento en el medio ambiente. En este sentido, debe emplear metodologías que le ayuden al estudiante a aprender conceptos importantes y entrar en contacto con el ambiente que le rodea, donde pueda identificar cuáles conductas debe mejorar con el fin de lograr una conservación del medio ambiente.
- *Sensibilizar*. El estudiante debe comprender acerca de la importancia de los recursos naturales para la sociedad, por lo que su uso debe ser responsable y su cuidado fundamental, en adición a la comprensión de que no todos los países están en igualdad de condiciones para el acceso a dichos recursos. Para ello, el profesor debe lograr que el estudiante comprenda que el uso de recursos es inevitable, pero puede ser llevado a cabo de manera sostenible.
- *Educar*. El profesor debe lograr que los estudiantes adopten medidas responsables y respetuosas con su entorno, de manera lleven a cabo actividades en su vida cotidiana que ayuden a la conservación del medio ambiente.
- *Formar*. Para que la educación ambiental pueda llevarse a cabo de manera integral, es necesario que el estudiante conozca conceptos que le permitan comprender cómo funciona el planeta, de dónde provienen los recursos y qué

procesos son posibles gracias a ellos. Con este fin, el profesor debe apoyarse de conocimientos químicos, biológicos, físicos, genéticos, geológicos, entre otros, que le permitan al estudiante entender el porqué de la situación actual.

- *Entretener.* La educación ambiental debe iniciarse desde edades tempranas en el estudiante, lo que debe llevar al profesor a apoyarse en diferentes metodologías que incentiven al estudiante a tomar parte en ellas, fomentando su curiosidad y brindándoles un espacio en el cual puedan divertirse mientras obtienen los conocimientos; actividades que les permitan relacionarse con su entorno son de vital importancia, por lo que el profesor debe hallar la forma de dinamizar la clase para evitar el desinterés de los estudiantes.

Aunque en muchas ocasiones, los profesionales designados para impartir esta asignatura provienen de distintas disciplinas, todos ellos deben tener un gran sentido de responsabilidad, dándole el valor que dicha asignatura se merece y comprendiendo su importancia. Esto es un aspecto clave en la enseñanza pues los estudiantes deben percibir este sentido de responsabilidad por parte del profesor para dar la importancia al cuidado del ambiente. De otra parte, la gran variedad de disciplinas ayuda a que la educación ambiental sea impartida desde varios enfoques y factores, permitiendo una transversalidad en el conocimiento y la formación ambiental de los estudiantes. Sin embargo, tal y como indica Ramos [13], los profesores asignados para impartir educación ambiental necesitan una formación apropiada que les permita desempeñar la labor pedagógica de manera eficiente; también se requieren conocimientos en ciencias sociales para comprender la importancia que juega la cultura y la sociedad en el comportamiento ambiental de sus estudiantes. Además, una formación práctica es necesaria para tener un mayor abanico de metodologías disponibles a utilizar.

2.8 Incidencia de las TIC en la educación ambiental

La educación, en general, evoluciona a través del tiempo. La implementación de nuevas tecnologías durante los procesos de enseñanza-aprendizaje es de vital importancia, y más si se tiene en cuenta su uso diario por parte de los jóvenes. Por ello, hacer uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) para lograr una mejor comunicación y acceso al conocimiento por parte de los estudiantes es fundamental durante el desarrollo de la educación ambiental. Estas herramientas, utilizadas dentro y fuera del aula, no deben ser consideradas elementos técnicos, sino ayudas didácticas que facilitan la pedagogía, en el sentido que lo explica Cabero [12]. Hoy en día, los estudiantes tienen acceso a herramientas y desarrollos tecnológicos con mayor facilidad; el uso de dispositivos inteligentes (*smartphones* y *tablets*), computadores, internet y redes sociales se hace desde edades cada vez más tempranas, por lo que sacar provecho de estas herramientas y ponerlas a favor de la educación juega un papel fundamental.

Explicar la problemática ambiental actual puede ser un poco tedioso para el profesor y los estudiantes si se trata de manera convencional. No obstante, si se hace uso de documentales, imágenes y videos se logra transmitir el mensaje de manera más efectiva. Además, al estimular el uso de tecnologías se desarrollan las habilidades de investigación en el estudiante. Es importante mencionar que usar muchas herramientas no garantiza el éxito, pero saber seleccionar las TIC es igual o más importante que su mismo uso; conocer cuáles son los objetivos y contenidos que se desean lograr es de vital importancia para la selección de estos medios, al igual que la predisposición existente por parte del cuerpo profesor y estudiantil. Cabero [12] menciona 7 consideraciones fundamentales que deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar las TIC a utilizar durante el curso de educación ambiental representados en la Tabla 1.

Tabla 1. Consideraciones para selección de TIC en educación ambiental [12]

Información	La información conceptual ofrecida por la herramienta acerca del medio ambiente, su problemática y su cuidado debe ser preparada por grupos interdisciplinarios que certifiquen su veracidad
Trabajo en equipo	La herramienta debe facilitar la ejecución de actividades grupales, permitiendo a los estudiantes disponer de diferentes puntos de vista.
Adaptación	El medio seleccionado debe contar con la capacidad de adaptarse con facilidad a diferentes contextos, situaciones y factores tales como edad, religión o condición socioeconómica.
Contaminación	Evidentemente, la herramienta seleccionada no debe ser una fuente de contaminación, ya que iría en contra del propósito del uso de esta.
Accesibilidad	La obtención de la herramienta debe ser obtenida con cierto nivel de facilidad, bien sea por parte del profesor, estudiante o institución. Hacer uso de herramientas con problemas de accesibilidad, desestimulará a los estudiantes.
Reutilización	La reutilización de las herramientas es fundamental, permitiendo hacer uso de ellas en tantas ocasiones como sea posible.
Costo	La herramienta no debe representar un costo elevado para la institución, profesor o estudiante, ya que esto daría como resultado el que muchos estudiantes no pudieran acceder a ella, descuidando el objetivo principal.

La cantidad de medios disponibles para la educación, y específicamente la educación ambiental ha aumentado en los últimos años con relativa rapidez, por lo cual, Cabero [12] realizó un estudio donde indica cuáles son los medios más utilizados por profesores, estudiantes e instituciones para la formación integral de jóvenes en lo que a educación ambiental respecta. En la Tabla 2 se muestran dichos medios, así como las ventajas que conlleva su utilización.

Tabla 2. TIC más utilizadas en la educación ambiental [12]

Medio	Ventajas Objetivos
Videos y Documentales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran variedad de información de educación ambiental disponible en este formato ▪ Los gráficos de los videos ayudan a los estudiantes a comprender conceptos estudiados de la educación ambiental ▪ Conocer la actualidad ambiental, tanto local como global, le permitirá al estudiante saber la magnitud del problema ambiental actual. ▪ Conocer esfuerzos que se están llevando a cabo a nivel mundial con el fin de mejorar los problemas ambientales, viendo los avances realizados de primera mano. ▪ Conocer la concepción del medio ambiente de diferentes culturas.
Multimedia (DVD, CD-ROM, USB)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite un control por parte del profesor e institución el flujo de información que está recibiendo el estudiante de educación ambiental. ▪ La información almacenada es de fácil acceso y tiene una gran durabilidad ▪ El estudiante controla en gran parte del proceso de formación el ritmo de información obtenida, personalizándolo hasta cierta medida. ▪ Estudiantes pueden intercambiar información obtenida, haciendo más dinámico el proceso de aprendizaje.
Internet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acceso instantáneo a gran cantidad de información académica como libros, revistas, artículos entre otros ▪ Los estudiantes pueden estudiar desde su casa, de manera individual o grupal. ▪ Posibilidad de leer periódicos o revistas electrónicas que le permita mantenerse informado acerca de la actualidad ambiental

3. EDUCACIÓN AMBIENTAL Y POLÍTICA

Martínez [19] recuerda que el proceso de educación por sí solo no es suficiente para afrontar los problemas medioambientales actuales; si bien la interdisciplinariedad de la educación ambiental permite que el estudiante contemple el problema desde aspectos diferentes, la política juega un papel fundamental. La UNESCO, citada por Martínez indica que, “para contribuir con eficacia a mejorar el medio ambiente, la acción de la educación debe vincularse con la legislación, las políticas, las medidas de control y las decisiones que los gobiernos adopten en relación al medio ambiente humano” [19, p. 18], es decir, la educación ambiental y la política deben trabajar conjuntamente si se desea obtener un verdadero cambio social que garantice una mejora en las conductas pro ambientales.

Los gobiernos deben legislar en pro del cuidado del medio ambiente, esto causará que los estudiantes se incentiven al percatar que se está haciendo un esfuerzo social en busca del mismo objetivo. Para lograr un verdadero cambio en las conductas, la educación ambiental no debe limitarse solo a las aulas de clase, es por ello que el gobierno debe brindar apoyo incondicional a actividades que busquen una mejora en la problemática ambiental.

Políticas de protección de hábitats, usos de energías renovables, control en la explotación de recursos naturales y en el uso de combustibles fósiles, son solo algunas de las acciones que pueden llevar los gobiernos a cabo, a fin de alinearse con los objetivos buscados en la educación ambiental. Los estudiantes deben contar con la capacidad de obtener una visión política en busca de soluciones factibles que realmente generen un cambio. Algunas de las razones por las cuales la política juega un papel fundamental en la educación ambiental, según Martínez [19], son:

- Muchas de las soluciones planteadas en clases por los estudiantes, con el fin de lograr un cambio positivo en la situación actual del medio ambiente, requieren de una concientización social que derive en un cambio de conducta. Sin embargo, el lograr que una sociedad trabaje como un equipo, a pesar de las diferencias que puedan existir (religiosas, culturales, ideológicas, etc.), se puede lograr si se realizan políticas que ayuden a conseguir dicho resultado.
- Los sectores populares representan, en algunos casos, un verdadero reto al momento de cambiar sus conductas; discutir y llegar a acuerdos de manera política es una de las mejores soluciones para lograrlo.
- El estudiante debe ser consciente que el cambio no se logrará de manera efectiva, imponiéndolo mediante leyes, sino que se debe buscar que las personas desarrollen un interés real en el cuidado del medio ambiente.

4. EDUCACIÓN AMBIENTAL EN LOS DIFERENTES NIVELES DE EDUCACIÓN

Como se ha explicado previamente, la educación ambiental debe estar presente durante todo o la mayor parte del proceso de formación del estudiante, siendo un proceso continuo y permanente que le permita adquirir conocimientos, desarrollar habilidades, valores y hábitos desde edades tempranas que busquen generar un cambio a la actual crisis medioambiental. En la Tabla 3 se muestran los objetivos y habilidades que, de acuerdo a Miranda [20], el estudiante adquirirá según el nivel académico en el cual se imparta.

5. CONCLUSIONES

La educación ambiental es la rama de la educación que busca desarrollar en los jóvenes conductas y hábitos para la preservación del medio ambiente, esto por medio del estudio de conceptos importantes y el desarrollo del

pensamiento crítico del estudiante con miras a evaluar el estado del medio ambiente a nivel local y global. Esta educación ha ido evolucionando su concepto a lo largo de los años, pasando de una etapa conservacionista en sus inicios a incentivar a los estudiantes a tomar un rol principal mediante acciones que permitan un mejoramiento en el medio ambiente.

Con la introducción del término “Desarrollo sostenible”, la educación ambiental tuvo uno de sus mayores cambios, permitiendo a los estudiantes estudiar y valorar la naturaleza, así como adquirir la capacidad de identificar aquellos factores externos (p.ej. la economía, cultura, religión o política) que influyen en ella. Esto ha permitido ver la problemática ambiental como lo que realmente es, un problema social, el cual debe ser solucionado con esfuerzos conjuntos para poder lograr un cambio positivo, no limitándose solamente a lo enseñado en las aulas.

Las metodologías empleadas en la educación ambiental, al igual que en cualquier otra rama de la educación, juegan un papel fundamental ya que logran brindar una motivación al estudiante, despertando en él un interés genuino en el cuidado medioambiental. La selección de estas metodologías es una de las funciones principales tanto del profesor como de la institución educativa, quienes deben tener en cuenta la situación actual de la comunidad local, los recursos disponibles y el grupo de jóvenes a quien se enfocará la enseñanza.

Otro punto importante que destacar es la claridad que debe existir en que no todas las clases de educación ambiental son iguales, estas pueden tener una gran cantidad de enfoques (Social, económico, político, cognitivo, etc.) y pueden concebir la naturaleza de manera diferente, esto dependerá del lugar en el cual se pretenda llevar a cabo el proceso de educación. Así mismo, la incorporación de las TIC como herramienta en el proceso de enseñanza-aprendizaje, puede dinamizar y facilitar la apropiación de los conceptos, problemática y soluciones por parte de los estudiantes en torno al medio ambiente. La educación ambiental es una de las herramientas principales a nivel mundial para conseguir un cambio que derive en una mejora de los problemas ambientales de la actualidad, por lo cual, se le debe brindar la debida importancia por parte de estudiantes, profesores, instituciones educativas y gobiernos.

Tabla 3. Objetivos, temática y habilidades obtenidas de la educación superior según el nivel de educación académica [20]

Nivel	Objetivos	Temáticas	Habilidades obtenidas
Básica Primaria	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desarrollar en el estudiante valores como amor y respeto hacia el medio ambiente y los recursos naturales. ▪ Lograr que el estudiante tenga una noción básica que le permita explicar la importancia que tiene el medio ambiente en la vida del ser humano. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escases de agua ▪ Contaminación hídrica, de suelos y de aire. ▪ Degradación de la biodiversidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensibilizarse con la biodiversidad del medio ambiente mediante la observación. ▪ Conocer y explicar la importancia del aire y la atmosfera. ▪ Argumentar la importancia del agua para la vida.
Educación Media	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudiar el medio ambiente, la biodiversidad y los recursos energéticos del mundo y la región. ▪ Fomentar que el estudiante investigue y asocie los conceptos estudiados en su comunidad. ▪ Lograr que el estudiante tenga un sentido de responsabilidad con respecto al cuidado del medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impacto ambiental ▪ Papel del medio ambiente en la alimentación humana ▪ Calidad de vida ▪ Crecimiento demográfico ▪ Gases de efecto invernadero ▪ Combustibles fósiles y biocombustibles ▪ Lluvias ácidas ▪ Energías renovables ▪ Cambio climático 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificar los componentes del medio ambiente. ▪ Dictaminar el estado actual de un ecosistema, identificando especies y organismos que se encuentren en peligro. ▪ Conocer cuáles son los principales problemas medioambientales del mundo y plantear posibles soluciones.
Media Vocacional	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lograr que el estudiante adopte conductas responsables y sostenibles. ▪ Organizar actividades en las cuales se promueva un cambio social en pro de la preservación medioambiental ▪ Explicar la incidencia de factores económicos, sociales y políticos en el medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desarrollo económico y social del ser humano y su relación con el medio ambiente ▪ Origen de la vida ▪ Recursos naturales necesarios para la vida ▪ Papel del medio ambiente en la salud humana 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reconocer el impacto del desarrollo socioeconómico humano en el medio ambiente ▪ Identificar problemas ambientales de su localidad ▪ Reconocer los recursos naturales, su importancia para el ser humano y la necesidad de hacer un uso sostenible de los mismos. ▪ Reconocer las consecuencias sobre el medio ambiente causadas por conductas sociales actuales

REFERENCIAS

- [1] Colprensa, "La contaminación del aire es el mayor problema ambiental en Colombia": encuesta, *El País*, 14 Febrero 2018.
- [2] C. Labrador y Á. Del Valle, "La educación medioambiental en los documentos internacionales. Notas para un estudio comparado", *Revista complutense de educación*, vol. VI, nº 2, pp. 75-94, 1995. [Accedido: 4-Feb-2019]. [En Línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=150176>.
- [3] UNESCO, "La educación ambiental", de *Las grandes orientaciones de la Conferencia de Tbilisi*, Tbilisi, 1980.
- [4] G. Priotto, "Educación Ambiental para el desarrollo sustentable", Buenos Aires: Mino y Davila, 2006.
- [5] A. Espejel Rodriguez y A. Flores Hernández, "Educación ambiental escolar y comunitaria en el nivel medio superior", *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, vol. XVII, nº 55, pp. 1173-1199, 2012. [En Línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-66662012000400008. [Accedido: 4-Feb-2019].

- [6] A. Burgos, "La educación ambiental: impacto y conocimiento de sus fines y formas", *Cultura Científica*, pp. 20-31, 2013. [En Línea]. Disponible en: https://www.jdc.edu.co/revistas/index.php/Cult_cient/article/view/168. [Accedido: 10-Feb-2019].
- [7] L. S. Paz, W. C. Avendaño y A. E. Parada Trujillo, "Desarrollo conceptual de la educación ambiental en el contexto colombiano", *Luna Azul*, n° 39, pp. 250-270, 2014. [En Línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n39/n39a15.pdf>. [Accedido: 11-Feb-2019].
- [8] Ministerio del medio ambiente; Ministerio de Educación Nacional;, "Política nacional de educación ambiental SINA", Ministerio del medio ambiente; Ministerio de Educación Nacional;, Bogotá, 2002. [En Línea]. Disponible en: <http://cort.as/-Hgnq>. [Accedido: 11-Feb-2019].
- [9] P. Álvarez y P. Vega, "Actitudes ambientales y conductas sostenibles. Implicaciones para la educación ambiental.", *Revista de Psicodidáctica*, vol. XIV, n° 2, pp. 245-260, 2009. [En Línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/175/17512724006.pdf>. [Accedido: 11-Feb-2019].
- [10] SED Barranquilla, "Boletín estadístico", Barranquilla, 2017.
- [11] B. Fernández, "Las funciones del educador ambiental", *Ecoavant*, 2016, [En Línea]. Disponible en: <http://www.ecoavant.com/es/notices/2016/01/las-funciones-del-educador-ambiental-2495.php>. [Accedido: Feb-2019].
- [12] J. Cabero y M. Llorente, "Las TIC y la educación ambiental", *revista latinoamericana de tecnología educativa*, Vol. 4(2), pp. 9-26, 2005. [En Línea]. Disponible en: http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/1452/1695288X_4_2_9.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Accedido: 11-Feb-2019].
- [13] F. Ramos, "Educadores y educadoras ambientales: nuevos perfiles para viejas creencias", *Reflexiones sobre educación ambiental II*, pp. 51-54, 2006. [En Línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ca/ceneam/recursos/documentos/reflexiones-educacion-ambiental-carpeta-ceneam_tcm34-167571.pdf#page=89. [Accedido: 16-Feb-2019]
- [14] A. Cuello, "Problemas ambientales y educación ambiental en la escuela", *Reflexiones sobre educación ambiental II*, pp. 91-113, 2006. [En Línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/ca/ceneam/recursos/documentos/reflexiones-educacion-ambiental-carpeta-ceneam_tcm34-167571.pdf#page=89. [Accedido: 01-Mar-2019]
- [15] M. Galiano y C. García, "Métodos y estrategias para la educación ambiental", *Eúphoros*, N° 6, pp. 249-260, 2003. [En Línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1181332>. [Accedido: 02-Mar-2019]
- [16] M. Nuñez, A. Torres y N. Alvarez, "Evolución e importancia de la educación medioambiental: su implicación en la educación superior", *revista de investigación aplicada y experiencias educativas*, pp. 155-174, 2012. [En Línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3923982>. [Accedido: 02-Abr-2019].
- [17] M. González, "Principales tendencias y modelos de la educación ambiental en el sistema escolar", *revista Iberoamericana de educación*, n° 11, pp. 13-74, 1996. [En Línea]. Disponible en: <http://www.rieoei.org/oeivirt/rie11a01.pdf>. [Accedido: 02-Abr-2019].
- [18] F. Moreno, "Origen, concepto y evolución de la educación ambiental", *Revista digital innovación y experiencia educativa*. N° 13, 2008. [En Línea]. Disponible en: https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csif/revista/pdf/Numero_13/Francisco_Moreno_1.pdf. [Accedido: 02-Abr-2019].
- [19] R. Martínez, "Aspectos políticos de la educación ambiental", *Actualidades investigativas en educación*, Vol. 7, N° 3, 2007. [En Línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2484887>. [Accedido: 13-Abr-2019]
- [20] D. Miranda, "Educación ambiental en el proceso de enseñanza-aprendizaje en primaria, secundaria y preuniversitario", *revista vinculando*, 2014. [En Línea]. Disponible en: <http://cort.as/-HgZh>. [Accedido: 27-Abr-2019].

De la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración

Olga L. Vanegas A.¹

John S. Martínez M.²

Jessica A. Poveda J.³

Universidad La Gran Colombia – Colombia

Este trabajo de investigación busca determinar las propiedades mecánicas obtenidas en concreto reforzados con fibras de guadua. Para lo cual se realizará un comparativo entre diferentes tipos de concreto como son: concreto sin adición de fibras, concreto con adición de fibras de vidrio y concreto con adición de fibras de guadua. La proporción de fibra de guadua utilizada corresponde al 1% con respecto a la cantidad de la mezcla del concreto. Esta dosificación se basó en el referente de la tesis comportamiento del concreto con adición de fibras de cáñamo en una proporción de 2 % [1], en el cual se concluye que la dosificación y la dimensión de las fibras naturales deberían ser menores a las trabajadas. Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto investigativo se elaboraron 27 cilindros, 9 de ellos elaborados en concreto sin adición de fibras, 9 con adición de fibras de vidrio y 9 con adición de fibras de guadua, los especímenes fueron sometidos a pruebas de tracción indirecta, dicho ensayo se rige bajo la norma colombiana NTC 722 método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción indirecta de los cilindros de concreto.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales que más se utiliza en el campo de la construcción debido a sus propiedades físico mecánicas es un material que posee excelente resistencia a la compresión, pero una muy baja resistencia a la tracción, en la actualidad se hace uso de fibras sintéticas, metálicas y algunas naturales. Estudios realizados por Sika [2] determinan la viabilidad de la incorporación de fibras al concreto con el fin de reforzarlo y aportando mayor resistencia a la tensión y de esta manera disminuir el proceso de fisuración en las estructuras.

Se ha buscado implementar de forma continua el uso de fibras naturales debido a su facilidad de obtención y su bajo índice de contaminación con respecto a otro tipo de fibras que se usan actualmente [3] la guadua, en especial el tipo angustifolia kunt, es considerada la más resistente ya que cuenta con las mejores propiedades físico-mecánicas del mundo de las bambúceas, además de su durabilidad.

El fin de esta investigación es realizar un comparativo entre el concreto sin adición de fibras, con adición de fibras de vidrio y adición de fibras de guadua para realizar dicho estudio se utilizará una mezcla de cemento portland tipo I, agua potable, agregado grueso, arena de río, fibras de vidrio y fibras de guadua se usa un 1% de adición de fibras con respecto a la cantidad de cemento usada con el fin de determinar su manejabilidad y resistencia.

2. MÉTODO

Partiendo de la recolección de toda la información, desarrollo del marco teórico y antecedentes sobre concreto reforzado con diversos tipos de fibra natural de esta manera se podrá determinar el diseño de la mezcla, dosificaciones y futuras aplicaciones para el concreto reforzado con fibras de guadua.

2.1 Diseño de la mezcla

Se elabora un diseño de mezcla para 27 cilindros de concreto portland tipo I 9 cilindros sin adición de fibras, 9 con fibras de vidrio y 9 con fibras de guadua en una adición de 1% de fibras con respecto al peso del cemento (Figura 1), los 27 cilindros deben tener el mismo diseño de mezcla y de esta manera se podrá realizar el comparativo entre los tres tipos. Los especímenes se fallarán a los 7, 14 y 28 días posteriores al fraguado (Figura 2).



Figura 1. Cilindros en concreto elaborados con los tres tipos de mezcla

¹ olga.vanegas@ugc.edu.co

² jmartinez4@ulagrancolombia.edu.co

³ jessicaalejandra.poveda@ulagrancolombia.edu.co



Figura 2. Ensayos a tracción indirecta cilindros en concreto

Debido a que las fibras pueden presentar agentes biológicos y químicos que afecten la mezcla se debe realizar un proceso de inmunizado [4] por este motivo se sumergieron las fibras en agua con cal hidratada por 12 horas aproximadamente, se utilizaron 10 gr de cal por cada litro de agua. Pasadas las 12 horas se lavan las fibras con abundante agua hasta dejarlas libres de cualquier residuo de cal, posterior a esto se dejan secar durante 72 horas aproximadamente todo este proceso se realiza con el fin de evitar la presencia de alcalinidad en la mezcla.

2.2 Ejecución de ensayos

Se realizaron pruebas de laboratorio con el fin de determinar si la proporción de fibras agregadas a la mezcla contribuyen de buena manera a la resistencia a tracción del concreto. El ensayo se regula por la norma NTC 1377 elaboración y curado de muestras de concreto en el laboratorio (Norma técnica colombiana 1994), NTC 722 ensayo a tracción indirecta de cilindros de concreto (Norma técnica colombiana 1994), NTC 1000 metodología sistema internacional de unidades (Norma técnica colombiana 1994). El uso de estas normativas tiene como fin determinar el proceso indicado para la elaboración de la mezcla, los testigos y las pruebas a tracción (Figura 3).



Figura 3. Proceso de ensayo a tracción indirecta

2.3 Análisis y comparación de los resultados

Al terminar los ensayos en el laboratorio, se realizaron los análisis comparativos entre los resultados extraídos del concreto sin adición de fibras, con adición de fibras de vidrio y adición de fibras de guadua, de esta manera se determinó la resistencia alcanzada por los cilindros en concreto con guadua y la viabilidad de la utilización del material natural como refuerzo del concreto.

2.4 Alcance

Se realizó un estudio investigativo con el fin de determinar si es útil emplear las fibras de guadua en el concreto, realizando pruebas de tracción indirecta. En la comparación se realizarán ensayos sin adición de fibras con adición de fibras sintéticas 'vidrio' y adición de fibras naturales 'guadua'. Para determinar la viabilidad se realizarán 27 testigos los cuales serán fallados a 7, 14 y 28 días mediante el ensayo de tracción indirecta, una vez obtenidos los resultados se para elaborar la gráfica de curva y analizar y comparar los resultados, teniendo en cuenta estos resultados diagnosticar si es factible o no la implementación de estas fibras naturales en el concreto.

2.5 Diseño de la mezcla

El trabajo investigativo se realizó con el objetivo de determinar que la resistencia del concreto con fibras de guadua es mayor y el proceso de fisuración es menor a comparación de un concreto simple o un concreto con fibras de vidrio. Para determinar esta resistencia se realizaron pruebas de tracción a los 7, 14 y 28 días, se realizó una adición de 1% de fibras con respecto a la mezcla de concreto total. Se define como diseño de mezcla al proceso de selección de los materiales que componen la mezcla determinando las cantidades de los mismos, se deben tener en cuenta las propiedades que se han mencionado anteriormente para elegir adecuadamente los componentes de la mezcla. Para la elaboración de la mezcla es determinante tener en cuenta los materiales que serán usados a continuación, se muestra la (Tabla 1) donde se determina la especificación de los agregados.

Tabla 1. Especificación de los agregados

	Agregado	Especificaciones
<i>Agregado Fino (arena de río)</i>		
1	Peso Especifico	2.72 g/cm ³
2	Peso Unitario Suelto Seco	2.56 g/cm ³
3	Peso Unitario Seco Compacto	2.62 g/cm ³
4	Humedad Natural	4.53 %
5	Absorción	2.25 g/cm ³
6	Módulo de Finura	2.23
<i>Agregado Grueso (Grava)</i>		
1	Perfil	Angular
2	Tamaño Max. Nominal	2.54 cm
3	Peso Especifico	2.73 g/cm ³
4	Peso Unitario Suelto Seco	2.66 g/cm ³
5	Peso Unitario Seco Compacto	2.68 g/cm ³
6	Humedad Natural	1.03 %
7	Absorción	1.03%
8	Módulo de Finura	7.78

El proceso de extracción se realizó de manera manual, lo que garantizo que las fibras no se alteraran con ningún agente químico ni biológico en la (Figura 4) se puede visibilizar el método de extracción.



Figura 4. Extracción fibras de guadua

Las fibras se cortaron a una longitud de 3cm lo que garantiza su mejor trabajabilidad y adherencia al resto de la mezcla [2] SIKA determina que las fibras de 5 cm o menos aportan una mejor resistencia a la tracción en elementos en concreto (Figura 5).



Figura 15. Proceso de corte de fibras

Antes de realizar la mezcla es necesario llevar a cabo el proceso de inmunización de las fibras, al ser de origen naturas estas contienen agentes contaminantes que alteran la mezcla y generan alcalinidad, en la (Figura 6) se refleja la cantidad de cal utilizada para llevar a cabo este proceso.



Figura 16. Proceso de inmunización con cal

Pasadas 12 horas se extraen las fibras de la cal se enjuagan con abundante agua y se someten a un proceso de secado durante aproximadamente 48 horas lo que garantizara una gran pérdida de humedad como se puede observar en la (Figura 7).



Figura 17. Proceso de secado de las fibras

Al realizar el proceso de inmunización se puede proceder a realizar la mezcla, se debe tener en cuenta que cada uno de los agregados (Figuras 8 a 11) debe estar en una temperatura entre 20° y 30°C en un espacio seco, sin humedad e independiente.



Figura 8. Agregado grueso



Figura 9. Agregado fino



Figura 10. Fibras de vidrio



Figura 11. Fibras de guadua

Se realizó un diseño de mezcla semi seca con un asentamiento de (1 ½") como se muestra en la Figura 12, Para llevar a cabo correctamente el ensayo de asentamiento se siguió la norma NTC 396.



Figura 12. Ensayo de asentamiento concreto simple 1 1/2"

Se evidencio un cambio en el asentamiento con el concreto con adición de fibras debido a un aumento en el índice de absorción de agua lo que hizo la mezcla más seca, en el ensayo de cono de Abrams realizado a estas dos mezclas se obtuvo un asentamiento de 1" respectivamente como se puede observar en las (Figuras 13 y 14).



Figura 13. Ensayo de asentamiento concreto con fibras de vidrio 1"



Figura 14. Ensayo de asentamiento concreto con fibras de guadua 1"

Al obtener el asentamiento se vierte la mezcla de concreto en los moldes que deben estar limpios y engrasados para evitar que la mezcla se pegue según lo estipulado en la norma NTC 1377 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio (Figura 15).



Figura 15. Llenado de moldes cilindros concreto simple

En dicha norma se especifica que cada cilindro debe ser llenado en tres capas, cada capa equivale a un tercio del cilindro, se debe apisonar 25 veces y luego dar 10 golpes con el chipote de caucho para eliminar los vacíos de aire que se presenten en la mezcla, en la (Figura 16) se evidencia el proceso de llenado de los cilindros.



Figura 18. Llenado de moldes concreto con fibras de vidrio

Trascurridas 24 horas se lleva a cabo el desencofrado de los cilindros, se codifican y se inicia el proceso de curado, para lo cual se hace uso de una piscina con agua potable la cual debe estar en un rango de temperatura aproximado a los 23 °C (Figura 17) según lo indica la (NTC 550). El tiempo de curado de los cilindros es de 28 días para que los mismos logren su resistencia máxima (Tabla 2).



Figura 17. Curado cilindros en concreto

Tabla 2. Tiempo curado de cilindros

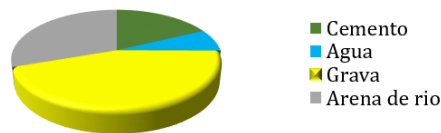
Tiempo de curado de los especímenes cilíndricos	
Ensayo de tracción indirecta	tiempo de curado
concreto simple C.S.1	7 Días
concreto simple C.S.2	7 Días
concreto simple C.S.3	7 Días
concreto simple C.S.4	14 Días
concreto simple C.S.5	14 Días
concreto simple C.S.6	14 Días
concreto simple C.S.7	28 Días
concreto simple C.S.8	28 Días
concreto simple C.S.9	28 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.1	7 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.2	7 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.3	7 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.4	14 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.5	14 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.6	14 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.7	28 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.8	28 Días
concreto 1% fibras de vidrio C.V.9	28 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.1	7 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.2	7 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.3	7 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.4	14 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.5	14 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.6	14 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.7	28 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.8	28 Días
concreto 1% fibras de guadua C.G.9	28 Días

Los cilindros en concreto tienen una dimensión aproximada de 103 mm * 204mm, después de establecer esta dimensión se calcula en desperdicio de 10% del total de la mezcla. Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente sobre los agregados y el diseño de la mezcla se indica en la (Tabla 3) el diseño de mezcla de los 9 cilindros de concreto convencional.

Tabla 3. Diseño de mezcla para 9 cilindros en concreto convencional [1]

Diseño mezcla 9 cilindros concreto convencional			
material	peso en (kg)	densidad(kg/m ³)	vol (m ³)
cemento	6,409	2681,4	0.00239
agua	2,628	1000	0.00263
grava	16,05	2520	0.00637
arena de rio	10,92	2430	0.00449
aire	0.0001556
total:			0.01604

Porcentajes de los componentes del concreto convencional



El diseño de mezcla empleado en los cilindros con fibra de vidrio y de guadua es el mismo su única variante es la adición de 1% de cada tipo de fibra (Tabla 4 y 5).

Tabla 4. Diseño de mezcla concreto con adición 1% de fibras de vidrio

Diseño mezcla 9 cilindros concreto con fibras vidrio.			
material	peso en (kg)	densidad(kg/m ³)	vol (m ³)
cemento	6,409	2681,4	0.00239
agua	2,628	1000	0.00263
grava	16,05	2520	0.00637
arena de rio	10,92	2430	0.00449
aire	0.0001556
fibras de vidrio	0.361		0,00058962
total:			0,01662

Porcentajes de los componentes del concreto con fibras de vidrio

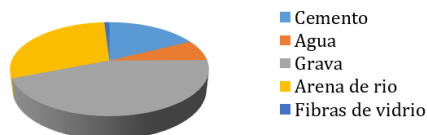
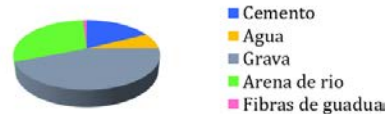


Tabla 14. Diseño de mezcla concreto con adición 1% de fibras de guadua

Diseño mezcla 9 cilindros concreto con fibras de guadua			
material	peso en (kg)	densidad(kg/m ³)	vol (m ³)
cemento	6,409	2681,4	0.00239
agua	2,628	1000	0.00263
grava	16,05	2520	0.00637
arena de rio	10,92	2430	0.00449
aire	0.0001556
fibras de guadua	0.361		0,00058962
total:			0,01662

Porcentajes de los componentes del concreto con fibras de guadua



2.6 Desarrollo experimental

Se realizaron pruebas de tracción indirecta teniendo en cuenta las especificaciones dadas por la norma I.N.V.E- 411-07 (ensayo de tracción indirecta de cilindros normales de concreto), este ensayo tiene como finalidad determinar la resistencia máxima a tracción indirecta de los cilindros en concreto convencional y con adición de fibras. Para ello se hizo uso de una prensa hidráulica convencional que debe cumplir con una velocidad de carga de 0.25 Mpa/s y dos patinas de apoyo con un ancho no menos a 51 mm, estas patinas deben tener la misma longitud del cilindro o superarla. Los cilindros en concreto se extraen del tanque de curado se secan, miden y pesan para posteriormente realizar una línea para garantizar que el cilindro quede centrado en las patinas, y de esta manera se podrá proceder a realizar la falla.

3. RESULTADOS

Pasados los 7, 14 y 28 días posteriores al proceso de fundición, los cilindros fueron sometidos a tracción indirecta, siguiendo con los pasos planteados anteriormente para llevar a cabo dichos ensayos. Como resultado de los ensayos se obtuvieron los datos expuestos en las Tablas 6, 7 y 8, y las Figuras 18, 19 y 20, que corresponden a los 3 tipos de mezcla elaborados. Teniendo presentes los datos extraídos de determinar la resistencia alcanzada por los cilindros en los diferentes tipos de mezcla y de esta manera se procede a determinar las conclusiones arrojadas tras dicho análisis.

Tabla 6. Resultados ensayo a tracción indirecta concreto convencional

CONCRETO CONVENCIONAL						
cod	Edad concreto	peso (kg)	diametro (mm)	altura (mm)	carga max(Kn)	Ensayo a tracción en (Mpa)
C.S.1	7Días	3,708	100	200	59,9	1,90
C.S.2	7 Días	3,697	100	200	57,9	1,84
C.S.3	7 Días	3,694	100	200	53,8	1,71
C.S.4	14 Días	3,982	101	201	72,2	2,26
C.S.5	14 Días	3,901	98	199	70,1	2,28
C.S.6	14 Días	3,950	102	203	84,6	2,60
C.S.7	28 Días	3,950	101	203	93,7	2,90
C.S.8	28 Días	3,918	100	204	78,1	2,43
C.S.9	28 Días	4,005	103	203	97,3	2,96

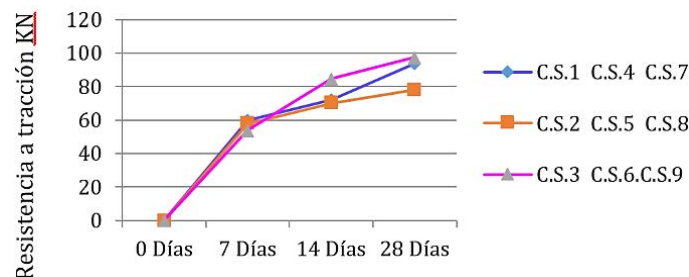


Figura 18. Gráfica línea resistencia a tracción indirecta cilindros de concreto convencional

Tabla 7. Resultados ensayo a tracción indirecta concreto con fibras de vidrio

CONCRETO CON ADICION 1% FIBRAS DE VIDRIO						
cod	Edad concreto	peso (kg)	diametro (mm)	altura (mm)	carga max(Kn)	Ensayo a tracción en (Mpa)
C.V.1	7Días	3,696	101	201	49,2	1,54
C.V.2	7 Días	3,639	100	203	59,7	1,76
C.V.3	7 Días	3,667	103	198	47,5	1,48
C.V.4	14 Días	3,641	101	202	45,8	1,42
C.V.5	14 Días	3,763	101	203	53,0	1,64
C.V.6	14 Días	3,775	101	200	59,2	1,85
C.V.7	28 Días	3700	100	202	61,1	1,92
C.V.8	28 Días	3731	100	204	68,2	2,12
C.V.9	28 Días	3783	101	202	61,2	1,90

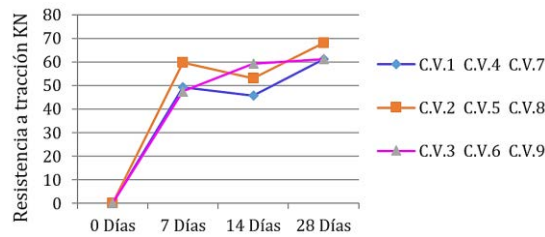


Figura 19. Gráfica lineal resistencia a tracción indirecta cilindros de concreto con fibras de vidrio

Tabla 8. Resultados ensayo a tracción indirecta concreto con fibras de guadua

CONCRETO CON ADICION 1% FIBRAS DE GUADUA						
cod	Edad concreto	peso (kg)	diametro (mm)	altura (mm)	carga max(Kn)	Ensayo a tracción en (Mpa)
C.G.1	7Días	3.708	99	200	54.4	1.74
C.G.2	7 Días	3.697	101	199	60.5	1.91
C.G.3	7 Días	3.694	100	201	59.6	1.88
C.G.4	14 Días	3.697	101	203	70.5	2.18
C.G.5	14 Días	3.772	103	202	73.7	2.24
C.G.6	14 Días	3.752	103	203	70.5	2.14
C.G.7	28 Días	3.673	101	201	75.8	2.37
C.G.8	28 Días	3.654	102	203	74.9	2.30
C.G.9	28 Días	3.811	101	203	79.3	2.46

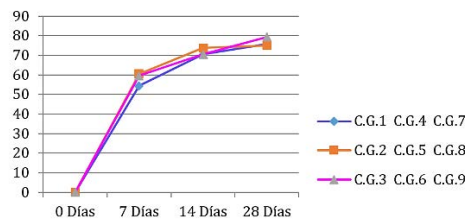


Figura 20. Gráfica lineal resistencia a tracción indirecta cilindros de concreto con fibras de guadua

Teniendo presentes las convenciones dadas en las gráficas lineales expuestas anteriormente se pueden evidenciar las resistencias de carga máxima para cada tipo de concreto elaborado, para ello se indica su resistencia en KN, debido a que la prensa hidráulica arroja este dato en dicha unidad de medida. Para hallar la tracción indirecta se hace uso de la ecuación (1).

$$T. I = \frac{C.M*2}{\pi*L*D} \quad (1)$$

Una vez realizadas todas las conversiones de KN a MPA que es la unidad de medida de tracción indirecta se realizó un gráfico de barras (Figura 21) en el cual se determina la resistencia mayor de los cilindros fallados y puede evidenciar el comparativo entre los tres tipos de mezcla.

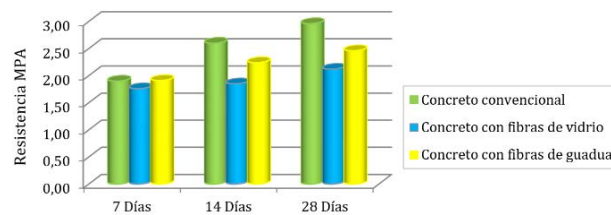


Figura 21. Resistencia cilindros a tracción indirecta MPA

3.1 Resultado resistencia tracción indirecta concreto sin adición de fibras

Para este proyecto investigativo se elaboraron 9 cilindros de concreto simple, todos con el mismo diseño de mezcla, al realizar las pruebas de tracción indirecta se determinó que la resistencia es mayor en estos especímenes, pero de igual manera se pudo evidenciar que el desplazamiento de las fisuras fue mayor en los cilindros realizados con concreto sin adición de fibras (Figura 22).



Figura 22. Resultados cilindros concreto convencional

3.2 Resultado resistencia a la tracción indirecta cilindros en concreto con fibras de vidrio 1%

Para realizar el comparativo planteado en la formulación del proyecto fue necesario hacer una mezcla de concreto con adición de fibras de vidrio en un porcentaje de 1% respecto al peso total del concreto, al igual que con el concreto convencional se realizaron 9 cilindros que fueron sometidos a el ensayo de tracción indirecta a los 7, 14 y 28 días posteriores al proceso de fundición. Se determinó que en el comparativo el concreto que menor resistencia a tracción indirecta obtuvo fue el realizado con fibras de vidrio (Figura 23), teniendo presente que debido a las características de dicho material durante el proceso de realización de la mezcla se evidencio que las fibras se enredaban lo cual no permitía una distribución uniforme.



Figura 23. Resultados cilindros concreto con fibras de vidrio

3.3 Resultados resistencia a la tracción indirecta cilindros en concreto con fibras de guadua 1%

Luego de realizar las pruebas de tracción indirecta al concreto con fibras de guadua se determina que, si bien la resistencia alcanzada es menor que la obtenida por el concreto sin adición de fibras, gracias a las dimensiones de las fibras de guadua utilizadas se logró una distribución uniforme en la mezcla, la manejabilidad de la misma fue buena a comparación del concreto con fibras de vidrio en este caso las fibras formaban unos nudos que dificultaban el proceso de fundición y no tuvieron buena adherencia con la mezcla de concreto (Figura 24).



Figura 24. Resultados cilindros concreto con fibras de guadua

Las fisuras que se presentaron en el concreto con adición de fibras de guadua fueron menores a comparación de los otros dos diseños de mezcla de igual el tamaño de las fisuras no fue mayor a 3 mm y su desplazamiento fue menor de 2 cm.

3.4 Comparación de resultados

Para realizar el comparativo planteado en este trabajo investigativo se utilizó el diseño de mezcla planteado por Mora [1] en el cual formula la utilización de fibras de cáñamo en un porcentaje de 2% respecto al peso total de la mezcla de concreto, se adaptó este tipo de mezcla realizando variaciones en dosificación y tipo de fibras agregadas.

Para ello se elaboraron 27 cilindros de concreto, 9 de concreto convencional, 9 con fibras de vidrio y 9 con fibras de guadua, las fibras se agregaron en una proporción de 1% respecto al peso total de las mezclas, los cilindros elaborados se sometieron a falla a los 7, 14 y 28 días. Posterior al proceso de desencoframiento se evidenciaron vacíos significativos en los cilindros con fibras debido a que el índice de absorción fue mayor lo que dificultó su trabajabilidad.

En el caso de las fibras de vidrio no se logró tener una adherencia adecuada con el concreto debido a la presencia de nudos en la mezcla generados por las fibras (Figura 25). Por ende, la resistencia obtenida en los ensayos a tracción indirecta realizados a los cilindros elaborados con este tipo de mezcla fue menor.



Figura 25. Formación de nudos fibra de vidrio

El tamaño de las fibras de guadua influyo de manera positiva en la mezcla se obtuvo una buena adherencia del concreto con las fibras como se observa en la (Figura 26), también se logró determinar que si bien su trabajabilidad es buena el índice de absorción es mayor lo que género que en algunos de los cilindros se presentaran vacíos más significativos que en otros como se muestra en la (Figura 27).



Figura 26. Mezcla de concreto con fibras de guadua



Figura 27. Cilindros en concreto con fibras de guadua

Como se menciona anteriormente el tamaño de las fibras incidió de manera adecuada en la mezcla con fibras de guadua caso contrario ocurrió en el concreto con fibras de vidrio, se logró determinar que aunque el concreto que obtuvo mayor resistencia a la tracción indirecta fue el concreto convencional, el concreto con fibras de guadua tubo un índice de fisuración menor como se puede evidenciar en las (Figuras 28, 29 y 30) donde se ve de manera clara la dimensión de las fisuras presentadas en los cilindros.



Figura 28. Fisuras de cilindros en concreto convencional



Figura 29. Fisuras concreto con 1% de adición de fibras de vidrio



Figura 30. Fisuras concreto con 1% de adición de fibras de guadua

4. CONCLUSIONES

- Para llevar a cabo el comparativo entre los tres tipos de mezcla se utilizó la misma cantidad de material para la realización de cada una de ellas, la adición de fibras correspondió a 1% con respecto al peso total del concreto, se logró evidenciar que el concreto con adición de fibras tuvo un índice de absorción de agua mayor.

- El concreto realizado con adición de fibras de vidrio obtuvo la resistencia a la tracción indirecta más baja a comparación de los otros dos tipos de mezcla, durante el proceso de fundición se evidenció la presencia de nudos generados por dichas fibras los cuales generaron la mala adherencia de este material con el concreto.
- Tras obtener las resistencias máximas de los cilindros con adición de fibras de guadua se concluye que la proporción y dimensiones de fibras fue adecuada, teniendo presente que para futuras investigaciones se debe calcular una mayor cantidad de agua lo cual permita una mejor manejabilidad de la mezcla, también se determinó que si bien la resistencia fue menor que la obtenida en cilindros de concreto convencional el índice de fisuración de los testigos guadua fue menor en comparación con los otros diseños.
- En los cilindros de concreto con fibras de guadua se observó un mal aspecto físico por tal motivo es necesario el uso de un material de recubrimiento para dar el acabado planteado al elemento que se elabore.

REFERENCIAS

- [1] Mora, J. (2017). Análisis mecánico de un concreto con adición del 2% de fibra natural de cáñamo. Trabajo de grado. Universidad Católica de Colombia.
- [2] Sika (2017). Concreto reforzado con fibras. Consultado en: <https://col.sika.com/es/produccion-de-concreto/sika-concrete-technology/noticias/concreto-reforzado-con-fibras.html> [Sep 2017].
- [3] Juárez, C. (2002). Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (agave lechuguilla), como materiales para construcción en México. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [4] Terreros, L. & Carvajal, I. (2016). Análisis de las propiedades mecánicas de un hormigón convencional adicionando fibra de cáñamo. Trabajo de grado. Universidad Católica de Colombia.

Evaluación del esfuerzo último de dos uniones con acoples de diferentes diámetros, adheridos con una mezcla de mortero, para determinar su posible aplicación a construcciones en guadua *Angustifolia Kunth*

Olga L. Vanegas A.¹

Flor N. Díaz P.²

Leidy K. Cubides A.³

Henry Y. Gamba G.⁴

Universidad Católica de Colombia – Colombia

En este capítulo se presentan los resultados del estudio de dos modelos de uniones con guadua de la especie *Angustifolia Kunth* de diferentes diámetros, se estudiaron dos prototipos de unión usando tallos de 5 cm, 10 cm y 20 cm, construyendo 24 uniones, 12 por cada modelo de unión, sometiendo estos a ensayos de compresión y corte perpendicular a la fibra, con la máquina MTS. Los resultados obtenidos, se cotejaron con estudios realizados a las probetas sin ninguna modificación por el Semillero SiGesCo (Sistema de Gestión en Construcción) de la Universidad Católica de Colombia con articulación de la Universidad Nacional de Colombia, concluyendo que los resultados obtenidos en los dos modelos de unión son favorables con base en los resultados de las probetas solas.

1. INTRODUCCIÓN

La guadua *Angustifolia Kunth*, es una especie leñosa que se destaca dentro de las 1000 que existen en el mundo por sus propiedades mecánicas comparables a las del acero; conocido hoy en día como el acero vegetal. En sus propiedades físicas, destacan su forma tubular, su gran esbeltez, su bajo peso y un radio de giro muy favorable con respecto a las secciones de madera o acero. Además, según el estudio realizado en Países Bajos [1] al puente de Ámsterdam se concluye que construir con guadua puede ser económico, pero lo más importante es que mitiga el impacto ambiental que generan las construcciones tradicionales, y que por ser una fibra ecológica vegetal solo tarda entre cinco o seis años en alcanzar su estado adulto.

Por ende, se pueden tener lotes de guadua en tiempos sustentables cuya calidad depende del tratamiento de corte, secado e inmunización que se le proporcione a la guadua, los cuales garantizan la vida útil y la resistencia de la misma, lo anterior es comprobable en los cultivos de Indonesia [2], es posible tener lotes de guadua con calidad y tiempo sustentables para la aplicación de material constructivo. Allí estudian la guadua como material de construcción y construyen edificaciones a base de guadua. A partir de estas cualidades se han realizado investigaciones alrededor del mundo con el fin de poner a prueba la guadua *Angustifolia Kunth* como material de construcción en edificaciones sismo resistente, pero se observa que las ya mencionadas investigaciones recomiendan ampliar el estudio de las uniones. Por ejemplo, en su investigación, Jules Janssen afirma: *si se resuelve adecuadamente el problema de las uniones con guadua se desarrollarían más construcciones con dicho material*" [3], aplicándolo a nuestro concepto constructivo, en la norma técnica colombiana (NSR-10) en el título (G.12.11.1) queda abierta la posibilidad de estudiar otras maneras de aprovechar la guadua. Se han efectuado estudios de diferentes tipos de uniones, cabe resaltar que una de las conclusiones a las que llegaron en varios de los estudios, es que es imposible hacer una comparación de la resistencia entre diferentes estudios esto por la anisotropía del material, condiciones ambientales, % de humedad y temperatura que varían las propiedades mecánicas de la guadua.

Con base en lo anterior, este proyecto se centrará en la modificación de dos diseños actuales y los analizara por medio de la unión con guadua de diferentes diámetros, buscando una posible solución a la articulación de los elementos estructurales diseñando las uniones con diámetros mayores de guadua adheridos con una mezcla de mortero 1-3 y agregando una varilla corrugada para transmitir las fuerzas a través del nodo, esto con la finalidad que el culmo no pierda la resistencia debido a las perforaciones o el aplastamiento de la guadua por las abrazaderas. El objetivo es encontrar una posible solución a la articulación de los elementos estructurales para mejorar la pérdida de resistencia o el aplastamiento y ver la viabilidad de proponerla para el reglamento por medio del análisis numérico de los ensayos de laboratorio de compresión y corte perpendicular a las fibras, para establecer si los modelos estudiados pueden llegar a implementarse en la norma NSR-10.

2. ANTECEDENTES

La guadua se ha utilizado he estudiado desde 1918 y los chinos estudiaron la guadua y construyeron con este material empleando varetas cuadradas de bambú para la construcción de cuartos fríos [4]; además en la segunda guerra mundial los Estados Unidos y Japón emplearon el bambú para reforzar el concreto de construcciones en las islas del

¹ olvanegas@ucatolica.edu.co

² fndiaz@ucatolica.edu.co

³ lkubides09@ucatolica.edu.co

⁴ hygamba83@ucatolica.edu.co

Pacífico. Como se observa la guadua se ha utilizado como material de construcción y se han efectuado diferentes investigaciones en cuanto a uniones, plantaciones, materia prima y demás en países como: en China, Japón, Filipinas, Estados Unidos, México, Colombia [3] - [6].

Las construcciones a base de guadua generan menor impacto ambiental, además, que los costos anuales del puente a base de guadua son 20 veces más favorables que los de una construcción tradicional, adicionalmente, se evidenció que la mala aplicación y la mala articulación de los elementos generan costos adicionales, causando que se vea como una construcción desfavorable, evidenciando problemas en la manipulación y articulación que todavía falta resolver [1]. *“Investigue y aprenda sobre las nociones de estructuras y sobre la forma correcta de hacer las uniones. Yo desarrollé un sistema en el que pongo cemento en las uniones, pero esto no es en todas, por eso es necesario investigar bien”* [7]. Igualmente, en la norma NSR-10, en el título G-12, publicada con la participación de Simón Vélez y el comité de la normalización de la guadua CCNG [8] especifican la manera de implementar la guadua como material constructivo en edificaciones sismoresistentes. La norma deja abierta la posibilidad de estudiar e implementar otras uniones como se cita a continuación: G.12.11.1 — Otras Uniones — Se permitirán otros tipos de uniones, siempre y cuando estas sean verificadas por un estudio científico con no menos de 30 ensayos, que permita verificar que la capacidad de la unión propuesta es equivalente o superior a las expuestas en la presente norma [8].

Por ello es relevante la investigación de otras uniones que puedan garantizar la adecuada articulación estructural para la disipación de las cargas y la transferencia, como afirma Janssen [3]: *“si se resuelve adecuadamente el problema de las uniones con guadua se desarrollarían más construcciones con dicho material.* En el estudio del estado del arte se encuentran investigaciones de uniones pernadas con aplicación de concreto, con abrazaderas metálicas o con diferentes ángulos de inclinación con el objetivo de restringir el giro en las articulaciones y disipar mejor las fuerzas estructurales, en estos estudios se presenta variaciones de resultados debido a la condiciones antrópicas de la guadua como se determinó en el estudio titulado: Determinación experimental de valores característicos de resistencia para guadua *Angustifolia* Kunth. Dejo como conclusión que no es posible hacer comparaciones directas con los valores reportados en la literatura pues estos corresponden a contenidos de humedad más bajos a los implementados para ese estudio [9].

3. MÉTODO

3.1 Diseño de dos uniones

Diseño experimental y análisis de dos uniones, una de continuidad y la otra de unión en ángulo de 90°. Modelo 1: Continuidad de guadua. La guadua que realizará el encofrado va a ser fija de 20cm, y la que hace la continuidad varía de 5cm a 10cm. Estas se adhieren con una mezcla de mortero 1-3 y se les agrega una varilla corrugada de ½” en el centro del nudo, para poder transferir las cargas de la unión, como se evidencia en la (Figura 1).

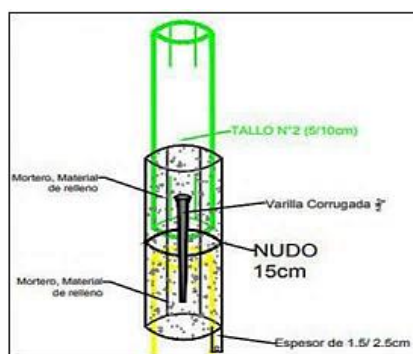


Figura 1. Esquema primer prototipo

3.2 Modelo 2

Unión a 90°. La guadua que realizará el encofrado va a ser fija de 20cm y quedara a 90° del tallo a unir, el tallo a 90° varía de 5cm a 10cm. Se adhieren con una mezcla de mortero 1-3 y se les agrega una varilla corrugada de ½”; perpendicular a la guadua de 20cm y paralela al tallo a 90°; con el propósito de transferir las cargas del tallo 1 al tallo 2, como se evidencia en la (Figura 2).

3.3 Construcción

Materiales Guadua (Figura 3), material proveniente de la ciudad de Armenia del departamento del Quindío, Este elemento es cosechado bajo el cumplimiento de lo dispuesto en el código nacional de los recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente, bajo el art 62. Este elemento fue suministrado por el grupo de investigación de la Universidad Católica de Colombia.

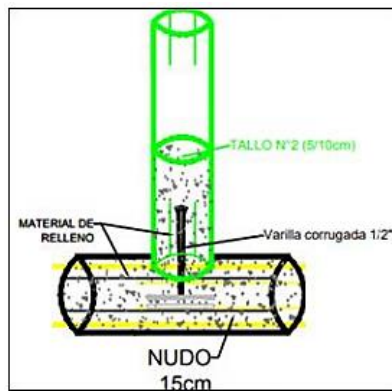


Figura 2. Esquema segundo prototipo



Figura 3. Guadua material

Mortero (Figura 4) que se utilizó en la elaboración de las probetas de unión en guadua fue un mortero de piso con una resistencia de 140 Kg/cm².



Figura 4. Mortero usado en la construcción

Varilla de acero, con diámetro de ½ pulgada y varilla corrugada con el fin de garantizar el agarre del mortero y la guadua. Esta varilla tiene como función asumir el cortante y los posibles esfuerzos a flexión en la unión de guadua. Agua, se utilizó la dosificación recomendada por el fabricante del mortero con el fin de obtener los más altos resultados de resistencia a los 28 días de fraguado en el mortero.

3.4 Elaboración: Armado probetas modelo 1 y modelo 2

1. Se realiza la selección y clasificación de las probetas a utilizar para las uniones de diámetros de 10 y 5 cm.
2. Se realiza la perforación de las guaduas (Figura 5), en los nudos, para la introducción de los refuerzos en acero.



Figura 5. Perforación modelo 2

3. Se instalaron los refuerzos de acero.
4. Se realizó la mezcla de mortero (Figura 6) y agua con la dosificación adecuada hasta obtener mezcla homogénea.



Figura 6. Realización de la mezcla

5. Se realizó el llenado de mortero en las probetas de mayor diámetro (20cm) (Figura 7) apisonando el mortero con una varilla a 25 golpes, el proceso de llenado se realizó en dos etapas.



Figura 7. Llenado de probetas modelo 2

6. Se dio por terminado el proceso de elaboración de las uniones a los 28 días de fraguado de la última probeta elaborada (Figura 8).



Figura 8. Fraguado de las uniones modelo 2

7. Por último, se fallan las probetas en la máquina MTS de laboratorio de mecánica de la Universidad Católica de Colombia (Figura 9)



Figura 9. Ensayos en máquina MTS

4. RESULTADOS

4.1 Ensayo de compresión

Los datos encontrados entre el modelo de unión número 1 y el modelo número 2, superan los valores obtenidos en estudios anteriores de la resistencia de probetas en guadua (Tabla 1 y Figura 10).

Tabla 1. Promedio ensayo compresión; resultados del modelo 1 con unión de 5cm.

Resultados modelo 1 - 5cm	
Promedio carga	49.818kN
Desviación estándar	7.313kN

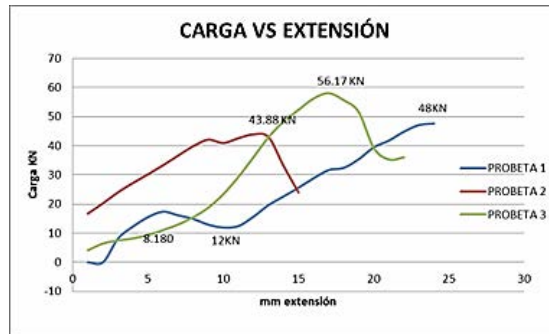


Figura 10. Carga vs extensión modelo 1 con unión a 5cm ensayo a compresión

Los datos encontrados en el modelo 1 no están alejados uno del otro; aunque hay que aclarar que la probeta 1 identificada con rojo en el gráfico, presentó fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto, pero presentó buena resistencia (Tabla 2, Figura 11).

Tabla 2. Promedio ensayo compresión; resultados del modelo 1 con unión de 10cm

Resultados modelo 1 - 10cm	
Promedio carga	47.768kN
Desviación estándar	3.184kN

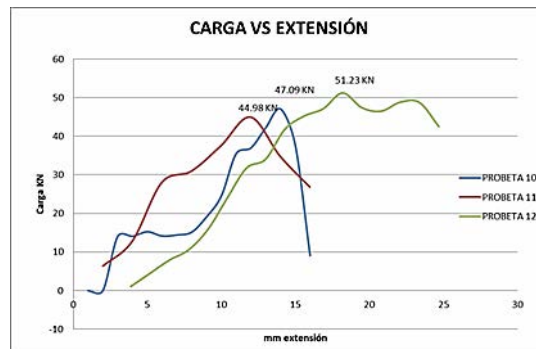


Figura 11. Carga vs extensión modelo 1 con unión a 10cm ensayo compresión

4.2 Ensayo corte perpendicular a las fibras

Los datos encontrados en el modelo 1 con unión a 10cm, no están alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que la probeta 10 identificada con azul en el gráfico, presentó fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto, Pero se puede observar que presentó mejor resistencia que la probeta 11 que se encontraba en mejores condiciones (Tabla 3, Figura 12).

Tabla 3. Promedio ensayo corte perpendicular a la fibra; resultados modelo 1, con unión de 5cm

Resultados modelo 1 - 5cm	
Promedio carga	75.803kN
Desviación estándar	2.078kN

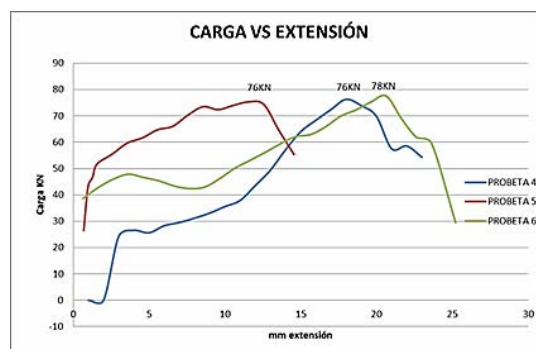


Figura 12. Carga vs extensión modelo 1 con unión a 5 cm ensayo corte

Los datos encontrados en el modelo 1 con unión a 5 cm no están alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que la probeta 10 identificada con rojo en el gráfico, presentó fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto, se puede observar que presentó menos resistencia que las probetas en buen estado (Tabla 4, Figura 14).

Tabla 4. Promedio ensayo corte perpendicular a la fibra; resultados modelo 1, con unión de 10cm

Resultados modelo 1 - 10cm	
Promedio carga	115.308kN
Desviación estándar	10.609kN

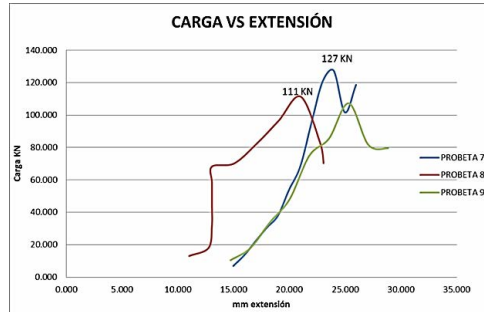


Figura 14. carga vs extensión modelo 1 con unión a 10 cm ensayo corte

4.3 Ensayo compresión a las fibras

Los datos encontrados en el modelo 1 con unión a 10 cm no están muy alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que la probeta 8 y 9, identificadas con rojo y verde respectivamente en el gráfico, presentaron fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto. Se puede observar que la probeta que presentó mejor resistencia es la probeta 7 (Tabla 5, Figura 15).

Tabla 5. Promedio ensayo compresión; resultados modelo 2, con unión de 5cm

Resultados modelo 2 - 5cm	
Promedio carga	36.099kN
Desviación estándar	1.950kN

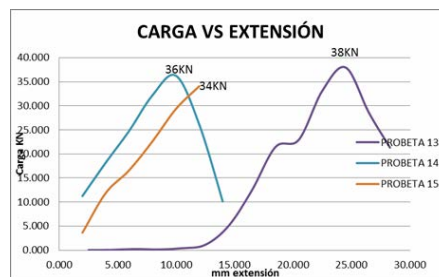


Figura 15. Carga vs extensión modelo 2 con unión a 5 cm ensayo compresión

Los datos encontrados en el modelo 2 con unión a 5 cm no están muy alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que la probeta 15, identificada con naranja en el gráfico, presento fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto. Se puede observar que la probeta que presentó mejor resistencia es la probeta 13 (Tabla 6, Figura 16).

Tabla 6. Promedio ensayo compresión; resultados modelo 2, con unión de 10cm

Resultados modelo 2 - 10cm	
Promedio carga	68.834kN
Desviación estándar	23.612kN

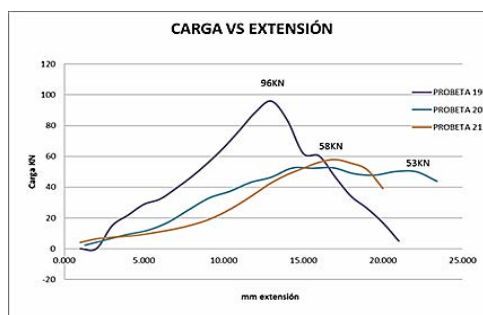


Figura 16. Carga vs extensión modelo 2 con unión a 10 cm ensayo compresión

4.4 Ensayo corte perpendicular a las fibras

Los datos encontrados en el modelo 2 con unión a 10 cm, son muy diferentes uno del otro; aunque hay que aclarar que las probetas 20 y 21, identificadas con azul y naranja respectivamente en el gráfico, presentaron fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto. Se puede observar que la probeta que presentó mejor resistencia es la probeta 19 (Tabla 7, Figura 17).

Tabla 7. Promedio ensayo corte perpendicular; resultados modelo 2, con unión de 5cm

Resultados modelo 2 - 5cm	
Promedio carga	128.271kN
Desviación estándar	10.125kN

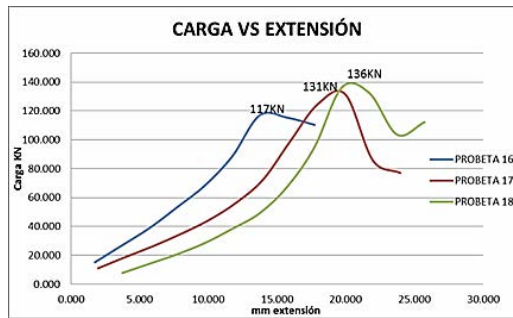


Figura 17. Carga vs extensión modelo 2 con unión a 5 cm ensayo corte paralelo

Los datos encontrados en el modelo 2 con unión a 5 cm, no están muy alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que las probetas 16 y 18, identificadas con azul y verde respectivamente en el gráfico, presentaron fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto. Se puede observar que la probeta que presentó mejor resistencia es la probeta 18, a pesar de presentar fisuras al momento del ensayo (Tabla 8, Figura 18).

Tabla 8. Promedio ensayo corte perpendicular; resultados modelo 2, con unión de 10cm

Resultados modelo 2 - 10cm	
Promedio carga	106.095kN
Desviación estándar	10.669kN

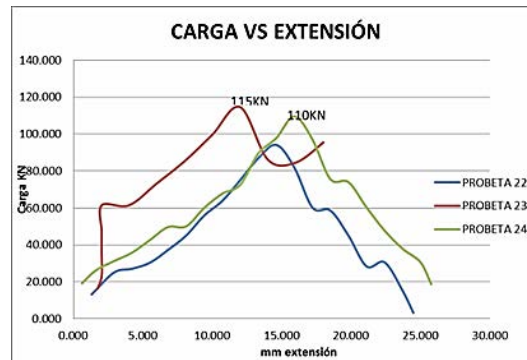


Figura 18. Carga vs extensión modelo 2 con unión a 10 cm ensayo corte paralelo

Los datos encontrados en el modelo 2 con unión a 10 cm, no están muy alejados uno del otro, aunque hay que aclarar que la probeta 22 identificada con azul en el gráfico, presentaron fisuras iniciales al momento del fraguado del concreto. Se puede observar que la probeta que presentó mejor resistencia es la probeta 23. En general se puede observar que las probetas presentan recuperación después de alcanzar su estado de falla.

5. CONCLUSIONES

- Al observar las fisuras en algunas probetas después del fraguado del mortero, se logró concluir que la adherencia mortero-guadua no es la adecuada, principalmente porque, en su proceso de fraguado, el mortero presenta segregación de la mezcla, dejando partículas de agua que la guadua tiende a absorber, lo que eleva el contenido de humedad perdido durante el proceso de secado. Esto hace que la guadua se expanda, para luego comprimirse en un espacio que está ocupado por el mortero endurecido, causando fisuras perpendiculares a sus fibras y esto ocasiona pérdida en su capacidad portante.
- En los ensayos de compresión se evidenció que el tallo de menor diámetro que compone la unión llega primero a la falla por aplastamiento. Esto se debe a la falta del núcleo de mortero que llevan las uniones, y que le dan a la

unión más capacidad portante, primero por las características mecánicas del material y por el área transversal, que es superior al área transversal del tallo sin ninguna mejora. Otro factor importante en el aplastamiento del tallo de la unión fueron las cargas aplicadas con la máquina MTS, porque en algunas uniones no se garantizó la verticalidad de la carga, debido a que el modelo 1 se construyó encima del nodo del tallo, produciendo un eje corrido del centro de la unión.

- En el modelo 2, se comprobó que, al momento de la falla por corte perpendicular a la fibra, la probeta no se fractura homogéneamente si no en diferentes caras planas. Esto es debido a la falta de adherencia y la capacidad de respuesta individual de cada material, puesto que la guadua tiende a deformarse encontrando una superficie rígida con mayor resistencia que le origina diferentes fracturas al tallo de la unión.
- En los ensayos de corte perpendicular a la fibra de la guadua, se encontró que el modelo 1 disipó las cargas aplicadas y controló la fractura en varias caras planas mejor que el modelo tipo 2, esto es consecuencia del nodo presente en la unión modelo 1 y la ausencia de este en el modelo 2.
- En el ensayo de compresión del modelo 1, entre la configuración de la unión de 10 cm y 5 cm, se obtuvieron resultados de carga muy cercanos. Aunque la unión de 5 cm deformó el tallo de menor diámetro, resultó más efectiva que la de 10 cm porque esta última fracturó la unión dejando diferentes caras planas, este fenómeno se produjo por falta de adherencia entre mortero y los tallos de guadua de 20cm y 10cm de diámetro, originando una unión con menos capacidades portantes (Figura 19).

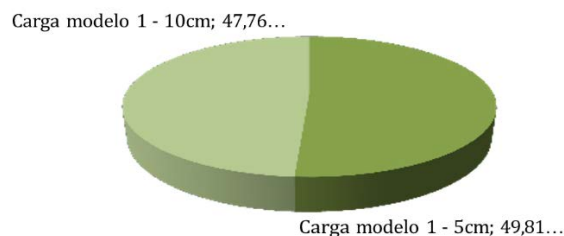


Figura 19. Tabulación resultados compresión modelo 1

- En el ensayo de corte perpendicular del modelo 1, entre la configuración de la unión de 10 cm y 5 cm, se consiguieron mejores resultados de carga de un 20 % de diferencia con la unión de 10cm. En los ensayos se pudo observar que las dos configuraciones de diámetro fallaron con las mismas características superficiales de fisuras sin afectar la unión interna, pero la unión de 10 cm presento más deformación superficial porque esta unión presentaba menor espesor entre la cara interna del tallo exterior y la cara externa del tallo interno de la unión. Como se evidencia en el ensayo a compresión, esta unión no tenía buena adherencia en esta cara, y el elemento funcionó separadamente y no como un todo (Figura 20).

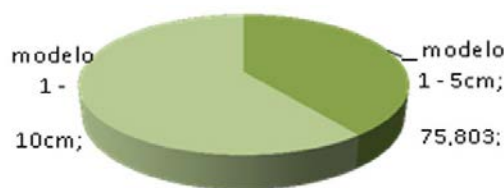


Figura 20. Tabulación resultados corte perpendicular al modelo 1

- En el ensayo de compresión del modelo 2, entre la configuración de la unión de 10 cm y 5 cm, se encontró que la unión de 10cm, genero mejores resultados de carga, en un 30% superior a la carga, con el tallo de 5cm. El tipo de falla visualizado en las dos uniones, son equivalentes, fracturando los tallos de menor diámetro en diferentes caras planas hasta obtener la fractura del mortero, el tallo de 20 cm de la unión, no presento deformaciones mayores, solo en los tallos, que al momento del fraguado se fisuraron. A partir de esto se puede concluir que el tallo de menor diámetro se encarga de disipar las cargas sobre el lomo del tallo y al observar la unión implementada no se acoplo adecuadamente el tallo menor sobre el lomo del tallo de 20 cm (Figura 21).

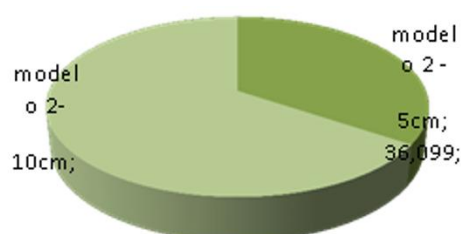


Figura 21. Tabulación resultados compresión modelo 2

- En el ensayo de corte perpendicular a la fibra del modelo 2, se obtuvieron resultados de carga de un 10% más capacidad el modelo con unión de 5cm, aunque el comportamiento estructural de las dos uniones, fue igual. En este modelo lo único que pudo afectar el resultado del ensayo, fue la carga de palanca ejercida por el elemento de 10 cm y 5 cm (Figura 22).



Figura 22. Tabulación resultados corte perpendicular al modelo 2

- Para analizar la capacidad de las uniones vs la probeta de guadua, se escogió por cada modelo la configuración diámetro que presento mejores condiciones de carga, como se evidencia en la (Figura 23).

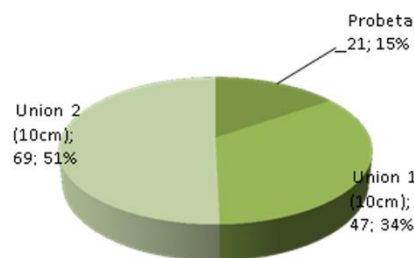


Figura 23. Capacidad de carga vs probeta sin modificaciones a carga compresión

- Según los resultados obtenidos en los ensayos del modelo 1 y modelo 2 con configuración de 10 cm, son las uniones que poseen más capacidad portante; aunque hay que resaltar que esta unión presento mayores deformación y fallas en el centro de la unión, con relación al modelo 1 y 2 con configuración de 5 cm que presento fisuras mínimas y deformaciones más controladas.

Recomendaciones

- Se recomienda el estudio de otros materiales, con características similares de resistencia a la compresión, pero que tengan mejores condiciones de adherencia hacia la guadua, con el propósito de implementar nuevas uniones en construcciones civiles.
- Para la construcción de la unión modelo 1, se recomienda acoplar adecuadamente el tallo sobre el nodo, con el fin de obtener un eje paralelo y garantizar la verticalidad de la carga aplicada por el equipo. Para la construcción del modelo 2, se recomienda acoplar el tallo de menor diámetro con un corte de boca de pescado sobre el lomo de la guadua perforada; para así disipar mejor las cargas sobre la guadua de mayor resistencia. Para la implementación de las uniones planteadas en este estudio, se recomienda hacer ensayos de flexión y tensión con el fin de complementar la información y capacidad portante del material.
- Se debe modificar el modelo 2, garantizando que el centro de la unión, tenga núcleo, el cual influye drásticamente en la capacidad portante del elemento estructural.

REFERENCIAS

- [1] P. van der Lugt, A. van den Dobbelsteen, and J. Janssen. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. *Construction and Building Mat.*, 20(9), 648-656. 2006.
- [2] Green School Bali. (2015). Green camp. <https://greencampbali.com/>
- [3] J. Janssen, Designing and building with bamboo. (s.f.)
- [4] O. González. Uso del bambú en el concreto reforzado. DIPAL. 2001.
- [5] J. Rojas. Analisis de las propiedades Mecánicas de la guadua *Angustifolia* mediante técnicas estadísticas y redes neuronales. 2013.
- [6] L. A. Cely. Uniones de Estructuras para Guadua *Angustifolia* Kunth. <https://civilgeeks.com/2011/12/08/uniones-de-estructuras-para-guadua-angustifolia-kunth/>. Recuperado 18 de septiembre de 2018.
- [7] S. Vélez. Construdata.com. Recuperado 17 de septiembre de 2018. 2009.
- [8] Ministro de ambiente y desarrollo territorial. Nsr-10 Título G. http://www.construdata.com/BancoConocimiento/E/entrevista_vez09/entrevista_elez09.asp. 2010.
- [9] C. Takeuchi. Caracterización Mecánica del Bambú Guadua Laminado Para Uso Estructural, 247. 2014.

Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia* Kunth

Olga L. Vanegas A.¹

Flor N. Díaz P.²

Martha L. Cendales P.³

Javier R. Moreno M.⁴

Universidad Católica de Colombia – Colombia

A través del tiempo el sector de la construcción ha generado un gran impacto a nivel mundial, lo cual ha creado la necesidad de buscar materiales que sean más sostenibles y amigables con el medio ambiente, llevando a la búsqueda de soluciones efectivas como la guadua, la cual es un recurso sostenible y renovable que se automultiplica vegetativamente y del cual Colombia es uno de los principales productores de esta especie, más específicamente de la guadua *angustifolia*, la cual es reconocida por poseer propiedades físicas y mecánicas extraordinarias y alta durabilidad. Por medio de este trabajo se quiere determinar las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *angustifolia* originaria de Armenia, Quindío, lo cual es de suma importancia debido a que estas pueden variar, dependiendo de factores tales como: el lugar geográfico, el clima, la cosecha y pos-cosecha entre otros. En este trabajo se obtuvieron probetas de Armenia las cuales cuentan con diferentes diámetros de 5, 10 y 15 cm. Estas muestras fueron clasificadas y rotuladas, luego fueron sometidas a ensayos de laboratorio tales como contenido de humedad, densidad, compresión paralela, tensión y flexión. Lo anterior con el fin de obtener modelos de predicción para las variables en estudio, con los cuales se pretende predecir los valores medios de resistencia del material, y adicionalmente proporcionar la información necesaria para el proyecto piloto, que consiste en la evaluación de los efectos de radiación UV en la guadua.

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia se han buscado alternativas de materiales de construcción que sean de bajo costo, de fácil uso, resistentes y amigables con la naturaleza. Entre estos materiales de construcción se encuentra la guadua, la cual es una planta que puede crecer 11 cm por día y completar su altura total en 6 meses, esta especie de bambú se localiza en el continente americano. En Colombia se encuentra presente en los departamentos colombianos de Quindío, Caldas, Risaralda, Valle del Cauca y Cundinamarca.

En Colombia se comenzó a construir con guadua a finales del siglo XIX por la comunidad indígena de los Quimbaya, por lo que se considera muy importante el estudio de sus propiedades físicas y mecánicas. En esta investigación se tiene como objetivo realizar la medición de las propiedades físicas (densidad, contenido de humedad) de la guadua y el comportamiento que presenta a los esfuerzos de tracción, flexión, compresión y corte. Estos resultados tienen el fin de dar una caracterización precisa de las propiedades físicas y mecánicas de un lote de guadua proveniente de Armenia en el departamento del Quindío, el cual fue adquirido para el proyecto piloto el cual es la evaluación de los efectos de radiación UV en la guadua.

Para la realización de esta investigación nos limita no tener información del lugar donde se cultivó este lote de guadua, la cual fue cortada para tener diferentes probetas las cuales tienen diámetros de 5 cm, 10 cm y 15 cm, estas probetas adicionalmente se dividen en probetas que presentan nudos y probetas que no lo presentan. Estas probetas serán sometidas a una caracterización individual de diámetro, ancho de paredes, longitud y presencia de nudos. Al finalizar caracterización se someterán las probetas a los ensayos de laboratorio de densidad, contenido de humedad, tracción, flexión, compresión y corte. Con los resultados obtenidos en el laboratorio se analizarán los cambios y comportamientos que presenta cada probeta.

2. ANTECEDENTES

La Guadua es una especie de plantas conocidas como Bambú, cuyo nombre principal es *Guadua amplexifolia*, pertenecientes al grupo de familias botánicas Gramíneas (Poaceae). Los bambúes pueden crecer como plantas pequeñas de menos de un (1) metro de largo y con tallos de medio centímetro de diámetro, y en contraste pueden desarrollar alturas de (25) veinticinco metros y (30) treinta centímetros de diámetro. *Los bambúes se encuentran distribuidos especialmente en América (32%), Asia (63%), África y Oceanía (5%). Todos los continentes, con excepción de Europa, poseen especies nativas de Bambú [1].* La Guadua es un Bambú leñoso que pertenece a la familia de las gramíneas, taxonómicamente a las Poaceae, de la cual existen cerca de 1.000 especies en todo el mundo, 500 de estas especies se encuentran en América.

En el año de 1806 la Guadua fue descrita por Humboldt y Bonpland en Colombia como *Bambusal* y en 1822 clasificada por Kunt como *guadua angustifolia*. Se considera como una de las plantas nativas más representativas de los bosques colombianos; desde épocas remotas por parte de los primitivos pobladores hasta nuestros días, se ha venido

¹ olvanegas@ucatolica.edu.co

² fndiaz@ucatolica.edu.co

³ mlcendales51@ucatolica.edu.co

⁴ jrmoreno46@ucatolica.edu.co

utilizando este recurso en Colombia, convirtiéndose en un elemento importante para el desarrollo económico, social y cultural de este país. En Colombia, cerca de 55.000 hectáreas están destinadas a la guadua, una gramínea gigante que en la actualidad se consolida como una alternativa sostenible no solo desde lo ambiental; también desde otras áreas como la construcción, la producción de fibras o, incluso, la producción de carcassas para equipos electrónicos [2]. La Guadua está presente en los cultivos de los campesinos de los departamentos de Quindío, Caldas, Risaralda, Valle del Cauca y Cundinamarca, aunque en este último ha bajado el interés de los campesinos por cultivar Guadua.

La Guadua es una especie dotada de condiciones que la hacen ideal para distintos campos de aprovechamiento, ya que se trata de un recurso sostenible y renovable que se automultiplica vegetativamente (no necesita de semilla para reproducirse). Tiene alta velocidad de crecimiento, casi 11 cm de altura por día en la región cafetera y se puede afirmar que en sólo 6 meses puede lograr su altura total. La Guadua representa una enorme riqueza ambiental, pues es un importante fijador de dióxido de carbono (CO₂), hasta el punto que su madera no libera a la atmósfera este tipo de gases, retenidos después de ser transformada o ser usada en construcción, debido a que éste se queda adherido en las obras realizadas con este material.

En nuestro país la Guadua fue la madera principal de las tribus agrupadas a los indios Quimbaya. “Con la Guadua se han construido puentes, escaleras, balsas, recipientes para líquidos, conductores de agua, armas, postes ceremoniales, jaulas para prisioneros, tumbas, palenques, atalayas, plazas ceremoniales instrumentos musicales, entre otros [3]. La Guadua empleada para la construcción en bahareque se originó en el eje cafetero a raíz de los temblores de finales del siglo XIX que destruyeron las construcciones de tapia pisada. El denominado *estilo temblorero* surgió como un estilo constructivo que permitió que las construcciones fueran inmunes a los temblores. [1]. La construcción en bahareque por lo general es una estructura de paneles de guadua y madera, con rellenos de barro y con recubrimientos laterales de esterilla de guadua, recubiertas con boñiga y en algunos casos revocados con morteros de cemento o cubiertas con láminas de latón. También es usada en construcción de galpones, instalaciones para beneficio del café y construcciones para vivienda, iglesias y escuelas.

El desarrollo de este proyecto de grado tiene como base investigaciones y proyectos ya realizados y a los cuales hemos detallado de manera minuciosa. nace de un proyecto de mayor envergadura que tiene como título *Evaluación de los efectos de radiación UV en la guadua* en el que podremos comparar y observar cómo funcionan las probetas de guadua y su resistencia antes de ser expuestas a rayos UV y después de, también se busca hacer utilidad de los beneficios que tiene la guadua como material de construcción, e incentivar el uso de materiales innovadores y que contribuyan con la sostenibilidad del sector de construcción. Una de las principales características a evaluar son las propiedades físicas y mecánicas ya que dependen, en su gran mayoría, de la zona geográfica del cultivo, maduración, cosecha, pos-cosecha y corte de las probetas de guadua, por lo que es un poco complejo estandarizarlas.

3. MÉTODO

Para la realización de los ensayos de laboratorio se utilizó Guadua angustifolia Kunth obtenida de la región de armenia Quindío. Se seleccionaron tres tipos de probetas con variación en su diámetro de 15, 10, 5 cm, también se utilizaron probetas con nudo y sin nudo. Para cada ensayo se tomó aleatoriamente una cantidad de 12 probetas debidamente trozadas y rotuladas según la NTC-5525. Los ensayos de laboratorio realizados son:

3.1 Contenido de humedad

A través de la realización de este ensayo se pretende calcular el contenido de humedad de la Guadua angustifolia para los ensayos físicos y mecánicos. La determinación de este parámetro se realizó a través del pesaje, de la pérdida de masa de la probeta de ensayo durante el secado hasta una masa constante. Los equipos utilizados son: balanza, horno eléctrico y probetas. Para la realización de este ensayo utilizamos una cantidad de 12 probetas, 6 elegidas al azar de los ensayos mecánicos desarrollados, y 6 probetas sin ser sometidas a ningún ensayo, todas debidamente rotuladas.

Se toman las probetas rotuladas, con sus respectivas medidas y procedemos a pesarlas en la balanza con una exactitud de 0,01 gr. luego de esto pasamos cada una de las probetas a un horno eléctrico a una temperatura 103°C, pasadas 24 hrs se extrajeron y se llevaron nuevamente a la balanza y se registraron el valor de la masa, con intervalos regulares no inferiores a 2 h, se tuvo mucho cuidado a que el contenido de humedad no fuera alterado por cualquier agente externo durante el periodo entre el retiro del horno y las determinaciones posteriores de la masa. El cálculo del contenido de humedad de cada probeta (CH) se calculó a través de la pérdida de masa expresada como porcentaje de la masa seca en horno, usando la ecuación (1).

$$CH = \frac{m - m_0}{m_0} * 100 \quad (1)$$

Donde:

m = masa de la probeta antes del secado

m_0 = masa de la probeta después del secado

3.2 Densidad

A través de la realización de este ensayo se pretende calcular la densidad (masa/volumen) de cada una de las probetas de guadua utilizadas para los ensayos físicos y mecánicos. La determinación de la masa de las probetas se realizó a través del pesaje y de su volumen mediante la medición de sus dimensiones. Los equipos utilizados con: balanza, pie de rey y cinta métrica. La medición de la humedad se realizó para todas las probetas utilizadas en los ensayos físicos y mecánicos, aproximadamente 62 probetas, en este caso la medición del volumen de cada una de ellas, se pudo medir con facilidad por lo que no tuvo mayor grado de complejidad.

Se realiza la toma de dimensiones de las probetas de guadua a través de la caracterización física que realizamos, tomamos datos tales, diámetro externo en ambos extremos, valor de espesor de cada una de las paredes de la probeta esto con ayuda del pie de rey, y para finalizar con la cinta métrica medimos la longitud que poseen cada una. Luego de la obtención de estos datos calculamos el volumen para cada uno. Después de la determinación del volumen, realizamos la toma de peso de cada una de las muestras, luego de realizados los ensayos físicos y mecánicos. El cálculo de la densidad se obtiene con la ecuación (2).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

3.3 Resistencia a la compresión

A través de este ensayo de laboratorio se pretende determinar el esfuerzo último de compresión de las probetas de guadua angustifolia provenientes de armenia Quindío y el módulo nominal de elasticidad. Se utiliza una máquina universal ensayos MTS (Figura 1).



Figura 19. Máquina Universal ensayos MTS

Se tomaron 12 probetas con diferente diámetro con y sin nodo para ser utilizadas en el ensayo de compresión se procede, a colocar la probeta en la maquina universal y hacer ajustada por los dos cabezales, de forma que quedé lo más uniformé posible, La probeta se coloca de manera transversal, quedando el cabezal superior en la mitad de la probeta, luego ajustamos el programa para la iniciación del ensayo. La velocidad utilizada fue de 1,3 mm/s, la velocidad de muestra es de 1,0 Hz, y cambio porcentual del 95%, se cambian los datos de las dimensiones por probeta se utiliza para que sea ajustada en cada uno de los ensayos. Se detiene el ensayo cuando falla la probeta. Y se importan los datos obtenidos en bruto, esto se repite con cada una de las probetas. El esfuerzo último de compresión se debe determino con la ecuación (3).

$$\sigma_{ult} = \frac{f_{ult}}{A} \quad (3)$$

Donde:

σ_{ult} = último de compresión, en MPa (o N / mm²)

f_{ult} = carga maxima a la cual falla la probeta, en N

A = area se seccion transversal (2,3), en mm²

3.4 Resistencia al corte

Se busca determinar la resistencia última del esfuerzo cortante, paralelo a las fibras, en probetas de guadua angustifolia provenientes de armenia Quindío. El equipo necesario es una máquina universal de ensayos MTS. Se tomaron 12 probetas con diferente diámetro con y sin nodo para ser utilizadas en el ensayo de corte se procede, a colocar la probeta en la maquina universal y hacer ajustada por los dos cabezales, de forma que quedé lo más uniformé posible, y ajustamos el programa para la iniciación del ensayo. La velocidad utilizada fue de 1,3 mm/s, la velocidad de muestra es de 1,0 Hz, y cambio porcentual del 95%, se cambian los datos de las dimensiones por probeta se utiliza

para que sea ajustada en cada uno de los ensayos. Se detiene el ensayo cuando falla la probeta. Y se importan los datos obtenidos en bruto, esto se repite con cada una de las probetas. Se tomaron el 50% de las probetas con nudo para los ensayos de corte paralelo a la fibra y el 50% restante no tienen nudo, en la Figura 2 se muestra un ejemplo de probeta sometida a ensayo de corte.

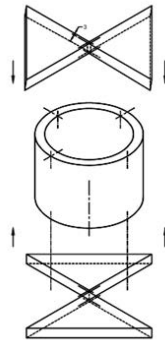


Figura 2. Probeta ensayo de corte

La resistencia última de corte se calculó con la ecuación (4).

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\sum(t * L)} \quad (4)$$

Donde:

τ_{ult} = resistencia última al corte, en MPa

F_{ult} = valor máximo de la carga aplicada en la cual falla la probeta, expresada en N

$\sum(t * L)$ = la suma de los cuatro productos de t y L

3.5 Resistencia a la flexión

Al desarrollar este ensayo de laboratorio obtendremos la capacidad a flexión de las probetas de guadua. El equipo utilizado es una máquina universal de ensayos MTS. Igual que en el anterior ensayo de laboratorio se tomarán 12 probetas con diferente diámetro con y sin nudo para ser utilizadas en el ensayo de flexión, se utilizó un soporte ubicado de manera horizontal en el cabezal inferior, para colocar la probeta de guadua en ese soporte, se procede a bajar el cabezal superior y ajustar la muestra para la iniciación del ensayo. La velocidad utilizada fue de 1,3 mm/s, la velocidad de muestra es de 1,0 Hz, y cambio porcentual del 95%, se cambian los datos de las dimensiones por probeta se utiliza para que sea ajustada en cada uno de los ensayos. Se detiene el ensayo cuando falla la probeta. Y se importan los datos obtenidos en bruto, esto se repite con cada una de las probetas. La resistencia última, σ_{ult} , en MPa o (N/mm²), en la flexión estática en el momento del ensayo está determinado por la ecuación (5).

$$\sigma_{ult} = f * l * \frac{D}{6} * I_B \quad (5)$$

Donde:

f = carga máxima aplicada, en N

L = es la luz, en mm (o espacio de separación)

D = al diámetro externo, en mm

I_B = Es momento de inercia, en mm⁴

3.6 Resistencia a la tensión

Se desea obtener la determinación de la resistencia última a la tensión, paralela a las fibras, aplicando una carga gradualmente creciente sobre la probeta. Los sujetadores de la máquina de ensayo deben asegurar que la carga se aplique a lo largo del eje longitudinal de la probeta y deben evitar la torsión longitudinal de ésta. Los sujetadores deben sostener la probeta perpendicular a las fibras y en dirección radial. La carga se debe aplicar continuamente durante todo el ensayo.

Se midieron las dimensiones de la sección transversal de la porción de ensayo de la probeta con una exactitud de 0,1 mm, en tres lugares de la porción de ensayo, y se calculó el valor medio. Se aseguró los extremos de la probeta entre los sujetadores de la máquina de ensayo, a una distancia segura desde la porción de ensayo. Se aplicó una carga de velocidad constante. Se tomaron 12 probetas con diferente diámetro con y sin nudo para ser utilizadas en el ensayo de corte se procede, a colocar la probeta en la máquina universal y hacer ajustada por los dos cabezales, de forma que quedé lo más uniforme posible, y ajustamos el programa para la iniciación del ensayo. La velocidad utilizada fue de

1,3 mm/s, la velocidad de muestra es de 1,0 Hz, y cambio porcentual del 95%, se cambian los datos de las dimensiones por probeta se utiliza para que sea ajustada en cada uno de los ensayos. Se detiene el ensayo cuando falla la probeta. Y se importan los datos obtenidos en bruto, esto se repite con cada una de las probetas. La resistencia máxima de tensión se debe determinar con la ecuación (5).

$$\sigma_{ult} = \frac{f_{ult}}{A} \quad (5)$$

Donde:

σ_{ult} = es el esfuerzo último de tensión, en MPa (o N/mm²)

f_{ult} = es el valor de la carga aplicada en la cual falla la probeta, expresada en N.

A = es el área media de la sección transversal de la porción de ensayo, expresada en mm².

4. RESULTADOS

4.1 Propiedades físicas

4.1.1 Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad de la Guadua Angustifolia Kunth se utilizaron 12 probetas, donde la mitad presentan nudo en su culmo y la otra mitad no lo presenta. Estas 12 probetas se clasifican de acuerdo a su diámetro, para este ensayo contamos con probetas que tienen diámetros de 5 centímetros, 10 centímetros y 15 centímetros. A cada probeta se le tomo su masa, luego fueron introducidas a un horno eléctrico a una temperatura de 103 °C durante 24 horas. Al pasar este tiempo a las probetas se les debe volver a tomar su masa. Este ensayo de laboratorio se realizó como se indica en la [5] norma NTC-5525. Los resultados obtenidos para determinar el contenido de humedad se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 15. Resultados ensayo del contenido de humedad

Muestra	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Contenido de humedad (%)
006-A-S-VI	204,9	179,5	14,15041783
036-A-S-VI	255,1	222,7	14,54872025
038-A-N-VI	195,3	169,1	15,49379066
042-A-N-VI	328,9	285,4	15,24176594
004-B-S-VI	576,5	498,2	15,71657969
057-B-S-VI	387,7	338,2	14,63630988
002-B-N-VI	605,9	532,5	13,78403756
054-B-N-VI	584,9	515	13,57281553
027-C-S-VI	1183,5	1034,3	14,42521512
029-C-S-VI	1410,3	1224,6	15,16413523
017-C-N-VI	765,6	683,1	12,07729469
022-C-N-VI	1265,2	1108,6	14,12592459
Promedio	646,9833	565,9333	14,41141726

De los datos obtenidos en la determinación del contenido de humedad de la Guadua Angustifolia Kunth se calcularon datos estadísticos donde evidenciamos que la humedad promedio de las 12 probetas es de 14,411%, en la Tabla 2 se pueden observar otros datos estadísticos obtenidos en este ensayo de laboratorio.

Tabla 16. Contenido de Humedad

Muestra	Contenido de humedad (%)
Promedio	14,411
Desviación estándar	0,995
Coefficiente de variación (%)	6,906
Percentil 5	12,900

El Contenido de Humedad de las probetas es similar, debido a que las 12 probetas dispuestas en este ensayo, se encontraban almacenadas bajo las mismas condiciones climáticas y en el mismo depósito. Se determinó el valor del Contenido de Humedad promedio el cual es 14,411%, los valores de Contenido de Humedad de las 12 probetas no cuentan con una gran dispersión. La determinación del Contenido de Humedad en la Guadua Angustifolia Kunth es muy importante, debido a que cuando el valor del Contenido supera el 12% la Guadua pierde resistencia a sus propiedades mecánicas. En este ensayo se puede evidenciar que las probetas cuentan con un Contenido de Humedad superior al 12% por lo cual sus esfuerzos admisibles, según la norma NTC-55-25, trabajan al 97%.

4.1.2 Densidad

En la determinación de la densidad de las 12 probetas de Guadua Angustifolia Kunth, las cuales están clasificadas de acuerdo al diámetro de su culmo los cuales son 5 centímetros, 10 centímetros y 15 centímetros. La mitad de las probetas que se utilizaron para este ensayo cuenta con nudo en su culmo y la otra mitad no cuenta con nudo. Lo

primero que se realizo fue tomar las dimensiones de cada probeta para poder calcular el volumen, luego se tomó la masa de cada probeta y por último se determinó el valor de la densidad de cada probeta (Tabla 3).

Tabla 17. Resultados ensayo de densidad

Muestra	E promedio (cm)	D promedio (cm)	L promedio (cm)	Volumen(cm ³)	Peso (g)	Densidad (Kg/m ³)
008-A-S-VI	0,801625	5,512833	30,567	362,66551	198,7	547,887781
009-A-S-VI	1,008125	5,785833	30,1825	456,70851	241,7	529,221586
010-A-N-VI	1,45625	6,249167	30,6175	671,35993	404,6	602,657357
011-A-N-VI	1,015625	5,835833	29,9125	460,04655	329,8	716,883979
049-B-S-VI	1,67125	10,91	30,075	1458,8483	628,4	430,75074
050-B-S-VI	1,513625	10,435	30,4175	1290,3974	557,2	431,804965
055-B-N-VI	1,456625	10,388	29,985	1225,5189	948,7	774,121075
056-B-N-VI	1,14775	10,37333	30,0825	1000,7024	795,9	795,341363
026-C-S-VI	1,88625	14,455	30,16	2246,3248	1444,1	642,872306
027-C-S-VI	2,97375	14,01833	29,9175	3086,9455	1183,5	383,388691
015-C-N-VI	1,7275	15,23667	28,8275	2113,5059	1525,2	721,644535
016-C-N-VI	2,09875	14,72	30,1075	2505,461	1792	715,237636
Promedio	1,563094	10,32667	30,071	1406,5404	837,483	607,651001

Con los valores obtenidos para la densidad de cada probeta, se calcularon datos estadísticos entre los que se destaca la densidad promedio de estas 12 probetas la cual es 607,651 Kg/m³. Otros datos estadísticos como la desviación estándar, el coeficiente de variación y el percentil 5 se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 18. Densidad

Muestra	Densidad (Kg/m ³)
Promedio	607,651
Desviación estándar	142,363
Coeficiente de variación (%)	23,428
Percentil 5	409,438

La densidad de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth tiene un 23,428% de coeficiente de variación, debido a que los valores de la densidad varían entre 400 Kg/m³ y 800 Kg/m³. Del resultado del ensayo de laboratorio practicado a estas 12 probetas se obtuvo una densidad promedio de 607,651 Kg/m³. De los resultados obtenidos para cada probeta de Guadua Angustifolia Kunth se puede evidenciar que las probetas, que tienen un nudo en su culmo, tuvieron una masa y una densidad mayor en comparación con las probetas que no tienen nudo.

4.2 Propiedades mecánicas

4.2.1 Resistencia a la compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión de la Guadua Angustifolia Kunth se utilizó la Prensa Universal de Ensayos MTS, se dispuso de esta máquina a una velocidad de 1,3 mm/s. Para este ensayo se dispuso de 12 probetas de las cuales la mitad presenta nudo en su culmo y la otra mitad no lo presenta, adicionalmente estas probetas de Guadua están clasificadas de acuerdo a su diámetro, se cuenta con probetas con diámetros de 5 centímetros, 10 centímetros y 15 centímetros. Se sobrecargaron 3 probetas ya que la Prensa Universal tiene un límite de carga de 300 KN. En la Tabla 5 se observan las dimensiones que tiene cada probeta y los resultados obtenidos en este ensayo. Con los datos obtenidos en este ensayo se calcularon datos estadísticos donde se obtuvo que el promedio de la resistencia última de las probetas de Guadua es de 25,663 MPa, además se calcularon la desviación estándar, el coeficiente de variación y el percentil 5 como se observa en la Tabla 6.

Al determinar la resistencia a la compresión de la Guadua Angustifolia Kunth se pudo evidenciar que, al aumentar el diámetro de las probetas, los esfuerzos últimos también aumentan. Durante los ensayos de laboratorio evidenciamos que el corte de las probetas de Guadua influye en la resistencia a la compresión de estas, ya que en las probetas que no contaban con un corte a 90° respecto a la dirección de sus fibras fallaban a menor carga que las probetas que contaban con el corte de 90° respecto a la dirección de sus fibras.

Otro factor que influye en la resistencia a la compresión el alineamiento del culmo, ya que los culmos que presentaban nudo tenían media sección del culmo en una dirección y la otra mitad en otra. Las probetas que no contaban con este alineamiento fallaron en su nudo, mientras que las probetas restantes fallaron entre 2 centímetros y 5 centímetros debajo de la superficie donde se aplicó la carga. En la Figura 3 se pueden observar estos tipos de fallas que se presentaron durante el ensayo de laboratorio. La maduración del culmo de Guadua es muy importante en la resistencia ya que si la Guadua Angustifolia Kunth es cortada a temprana edad la resistencia a la compresión no es la misma, el valor obtenido es muy inferior al obtenido con probetas de Guadua con la edad de maduración adecuada para su corte. Es muy importante llevar el registro de la edad de cada culmo para evitar que este sea cortado al estar verde o al pasar su edad de maduración, donde se comienza a secar y a perder sus propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 19. Resultados ensayo de compresión

Muestra	E D L			Inercia (mm ⁴)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (Kg/m ³)	Carga última compresión (N)	Sobrecarga Compresión (N)	σ max		σ max (Sobrecarga)	
	Promedio (cm)	Promedio (cm)	Promedio (cm)								Mpa	Kgf/cm ²	Mpa	Kgf/cm ²
006-A-S-VI	0,785	5,629	30,195	359481,793	11,942	360,605	204,900	568,212	34848,391		29,180	297,552		
045-A-S-VI	1,049	5,400	30,140	359002,418	14,336	432,095	273,900	633,889	38999,730		27,204	277,395		
010-A-N-VI	1,456	6,249	30,618	687770,181	21,927	671,360	404,600	602,657	47182,125		21,517	219,414		
046-A-N-VI	0,706	6,015	30,668	422293,340	11,779	361,226	226,700	627,585	23878,701		20,273	206,720		
001-B-S-VI	1,233	10,612	29,875	4062328,249	36,316	1084,948	660,000	608,324	41367,262		11,391	116,152		
053-B-S-VI	1,946	10,265	30,085	4640629,719	50,864	1530,230	805,300	526,261	48098,813		9,456	96,427		
018-B-N-VI	0,879	10,206	29,840	2824739,548	25,746	768,260	584,500	760,810	37074,984		14,400	146,839		
052-B-N-VI	0,931	9,992	29,620	2748745,854	26,507	785,144	575,900	733,496	76577,242		28,889	294,583		
012-C-S-VI	2,195	15,638	30,225	21500166,502	92,702	2801,933	1422,800	507,792	297114,500	243615,547	32,050	326,817	26,279	267,970
033-C-S-VI	1,694	14,763	30,203	15098289,275	69,544	2100,409	1380,000	657,015	297227,500	208790,172	42,739	435,813	30,023	306,141
015-C-N-VI	1,728	15,237	28,828	16998394,244	73,316	2113,506	1525,200	721,645	297729,094	274271,063	40,609	414,092	37,410	381,466
025-C-N-VI	1,954	14,712	29,808	16305555,773	78,307	2334,125	1750,200	749,831	236883,734		30,251	308,467		
Promedio	1,380	10,393	30,009	7167283,075	42,774	1278,653	817,833	641,460	123081,840	242225,594	25,663	261,689	31,237	318,526

Tabla 20. Compresión

Muestra	Carga máxima (N)	sobrecarga máxima (N)	σ resistencia última compresión (MPa)	σ resistencia última sobrecarga compresión (MPa)
Promedio	123081,840	242225,594	25,663	31,237
Desviación estándar	119233,601	32762,566	10,623	5,664
Coefficiente de variación (%)	96,873	13,526	41,395	18,131
Percentil 5	29912,030	21227,709	10,520	26,654



Figura 3. Falla en las probetas de Guadua en el ensayo a Compresión

En la Figura 4 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 5 centímetros.

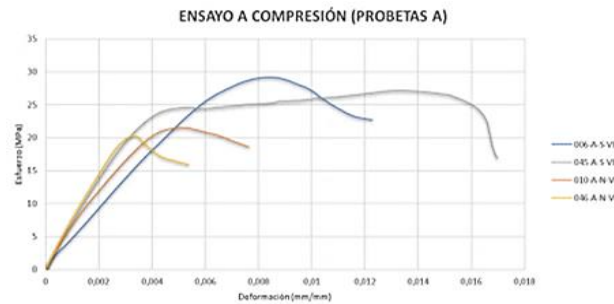


Figura 4. Ensayo a compresión (Probetas A, diámetro de 5 centímetros)

En la gráfica se puede observar que las probetas que no tienen un nudo en su culmo tienen una mayor resistencia a la compresión, respecto a las que tienen nudo en su culmo. Además, se puede evidenciar que estas probetas que no cuentan con un nudo en su culmo tienden a tener una mayor deformación. En la Figura 5 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 10 centímetros.

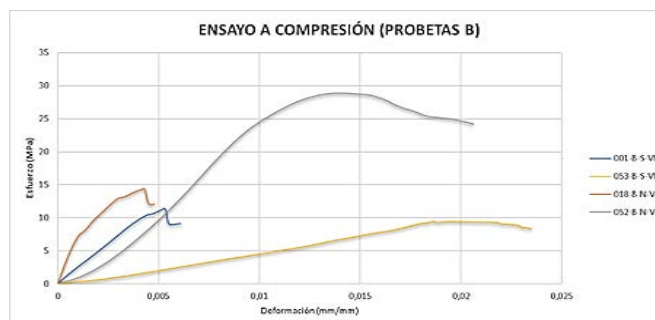


Figura 5. Ensayo a compresión (Probetas B, diámetro de 10 centímetros)

En la Figura se puede observar que sucede lo contrario que en las probetas de diámetro de 5 centímetros, ya que en las probetas de 10 centímetros que contaban con nudo obtuvieron mayor resistencia a la compresión respecto a las que no contaban con nudo en su culmo. En la Figura 6 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 15 centímetros.

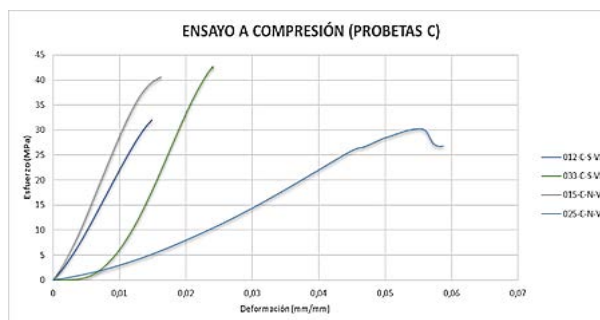


Figura 6. Ensayo a compresión (Probetas C, diámetro de 15 centímetros)

En la Figura anterior se evidencia que estas probetas de Guadua Angustifolia Kunth tienen mayor resistencia a la compresión que las probetas de 5 y 10 centímetros de diámetro. Se puede observar que una de las probetas que tiene nudo en su culmo falló antes que las otras tres probetas y por consiguiente obtuvo un valor inferior de resistencia a la compresión. Tres de las probetas del ensayo llegaron al límite máximo de carga de la Prensa Universal de Ensayos MTS de 300 KN por lo que se sometieron a una sobrecarga para llegar a su falla. En la Figura 7 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de estas probetas de Guadua Angustifolia Kunth que fueron sometidas a una sobrecarga y un diámetro de 15 centímetros.

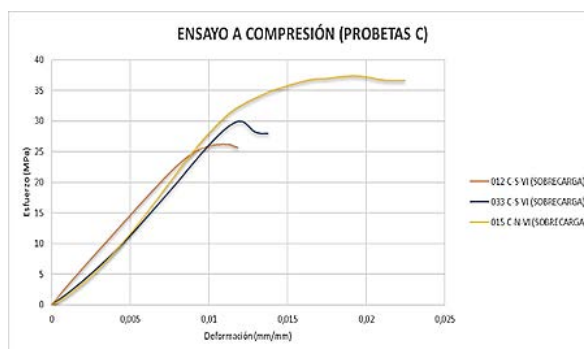


Figura 7. Ensayo a compresión (Probetas C, diámetro de 15 centímetros)

En la Figura se puede observar que las probetas que no contaban con nudo fallaron primero en la aplicación de esta sobrecarga. La sobrecarga a la que fueron sometidas estas tres probetas de Guadua Angustifolia Kunth, se aproxima a los valores que obtuvieron estas probetas en su carga inicial.

4.2.2 Resistencia al corte

En este ensayo de laboratorio se utilizó la Prensa Universal de Ensayos MTS, se determinó la resistencia al corte de 12 probetas, de las cuales la mitad contaban con nudo en su culmo y la otra mitad no, estas probetas tienen diámetros de 5, 10 y 15 centímetros. La velocidad que se utilizó para la realización de esta práctica de laboratorio es de 1,3 mm/s. En la Tabla 7 se pueden observar los datos obtenidos de las dimensiones de cada probeta, las áreas que fallaron de cada probeta y los resultados de carga última para cada probeta.

Tabla 21. Resultados Ensayo de Corte

MUESTRA	E Promedio (CM)	D Promedio (CM)	L Promedio (CM)	Inercia (MM ⁴)	Peso (g)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Densidad (Kg/m ³)	Carga última (N)	σ max Mpa	σ max Kgf/cm ²	# Áreas que fallaron
007-A-S-VI	0,958	5,163	14,700	294238,851	132,600	12,651	185,976	712,993	20250,03	3,600	36,710	1,000
037-A-S-VI	0,698	5,043	15,138	230700,441	120,000	9,529	144,239	831,953	27487,53	6,500	66,282	2,000
035-A-N-VI	0,764	5,763	15,288	383557,949	199,100	11,996	183,388	1085,675	24325,07	5,210	53,127	2,000
038-A-N-VI	0,803	5,338	14,900	303292,847	195,300	11,435	170,388	1146,209	25439,43	5,320	54,249	4,000
059-B-S-VI	1,033	9,450	14,800	2454623,789	271,300	27,304	404,096	671,375	39267,82	6,430	65,568	3,000
060-B-S-VI	0,836	9,563	14,775	2202788,758	265,700	22,927	338,753	784,348	31771,99	6,430	65,568	2,000
005-B-N-VI	0,873	12,000	15,538	4749851,254	336,300	30,501	473,908	709,631	32914,48	6,080	61,999	3,000
051-B-N-VI	0,986	9,550	15,000	2464683,083	292,800	26,534	398,008	735,663	26940,79	4,550	46,397	4,000
013-C-S-VI	1,441	14,088	15,490	11597758,949	631,700	57,264	887,015	712,164	67479,27	7,560	77,091	2,000
014-C-S-VI	1,456	14,013	15,110	11475301,613	441,800	57,448	868,039	508,964	43090,6	4,900	49,966	1,000
017-C-N-VI	1,653	14,313	16,050	13394435,021	765,600	65,728	1054,942	725,727	77725,47	7,330	74,745	4,000
061-C-N-VI	2,480	14,653	16,188	18297882,195	1112,700	94,844	1535,292	724,748	53868,93	3,350	34,160	2,000
Promedio	1,165	9,912	15,248	5654092,896	397,075	35,680	553,670	779,121	39213,451	5,605	57,155	2,500

Con los resultados obtenidos durante la elaboración de este ensayo se obtuvo una resistencia última promedio de 5,605 MPa, se calcularon otros datos estadísticos como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 22. Corte

Muestra	Carga máxima (N)	σ resistencia última corte (MPa)
Promedio	39213,451	5,605
Desviación estándar	18256,050	1,353
Coefficiente de variación (%)	46,556	24,140
Percentil 5	22491,302	3,488

Durante la determinación de la resistencia al corte de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth se evidencia que a mayor diámetro del culmo, mayor es su resistencia última al corte, aunque no es muy grande la diferencia entre los valores de la resistencia última al corte de las probetas de 5, 10 y 15 centímetros. Las probetas sin nudo en el culmo obtuvieron menos áreas de falla con respecto a las que presentaban nudo. El tener o no tener nudo en el culmo no muestra diferencias en los valores obtenidos de resistencia última al corte. Se obtuvo que las probetas de Guadua Angustifolia Kunth tienen un promedio de 5,605 MPa en la resistencia al corte y un coeficiente de variación de 24,140%, lo que refleja que los datos obtenidos para las probetas no tienen mucha dispersión en sus valores obtenidos a este ensayo.

4.2.3 Resistencia a la flexión

En el ensayo para determinar la resistencia a flexión de 12 probetas de Guadua Angustifolia Kunth las cuales tenían diámetros de 5, 10 y 15 centímetros, la mitad de estas probetas presentan nudo en el culmo. Para la realización de este ensayo de laboratorio se utilizó la Prensa Universal de Ensayos MTS. Se hizo el montaje con una base con los apoyos de rodillos, la Prensa se puso a trabajar a una velocidad de 1,3 mm/s, en la Tabla 9 se pueden observar las dimensiones de cada probeta y los resultados obtenidos de este ensayo de laboratorio.

Tabla 23. Resultados Ensayo de Flexión

Muestra	E promedio (cm)	D promedio (cm)	L promedio (cm)	Sinergia (mm ⁴)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (Kg/m ³)	Carga máxima tracción (N)	σ max	
										Mpa	Kgf/cm ²
008-A-S-VI	0,802	5,513	30,567	338706,213	11,865	362,666	198,700	547,888	2083,216	11,232	114,531
009-A-S-VI	1,008	5,786	30,183	450973,887	15,132	456,709	241,700	529,222	2414,981	10,263	104,656
019-A-N-VI	1,273	6,076	30,067	592749,625	19,211	577,623	381,700	660,811	7935,593	26,944	274,750
044-A-N-VI	0,634	5,607	30,085	311034,188	9,901	297,872	241,200	809,745	2500,281	14,929	152,237
003-B-S-VI	0,993	9,940	29,873	2826224,211	27,899	833,400	569,300	683,105	3209,179	3,739	38,125
050-B-S-VI	1,514	10,435	30,418	4342085,542	42,423	1290,397	557,200	431,805	1101,897	0,877	8,945
054-B-N-VI	1,184	9,201	30,028	2447271,896	29,813	895,215	584,900	653,363	7709,682	9,601	97,904
056-B-N-VI	1,148	10,373	30,083	3593842,944	33,265	1000,702	795,900	795,341	4765,304	4,556	46,461
024-C-S-VI	2,721	15,020	30,173	20853019,075	105,143	3172,419	1408,400	443,951	5496,177	1,311	13,372
031-C-S-VI	1,788	14,927	30,118	16217122,242	73,784	2222,198	1126,100	506,751	3126,669	0,953	9,721
021-C-N-VI	1,911	16,438	30,250	23402347,530	87,200	2637,806	1353,300	513,040	10725,760	2,496	25,448
023-C-N-VI	1,591	15,203	30,035	15975953,726	68,048	2043,810	1562,500	764,504	9113,596	2,873	29,295
Promedio	1,380	10,377	30,156	7612610,923	43,640	1315,901	751,742	611,627	5015,194	7,481	76,287

Con los valores obtenidos de esta prueba se calcularon datos estadísticos de los que se destaca el promedio a la resistencia última a la tracción el cual es 7,481%, además se obtuvieron otros datos estadísticos como se puede evidenciar en la Tabla 10. De los datos obtenidos durante la realización de esta práctica de laboratorio, podemos observar que las probetas de Guadua Angustifolia Kunth con menor diámetro obtuvieron mayor resistencia a la flexión. Las probetas de Guadua que no conservaban alineamiento en su culmo, presentaron menor resistencia a la flexión.

Durante el ensayo se evidenció que a mayor diámetro de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth menor es su resistencia a la flexión. Las probetas con nudos obtuvieron mayor resistencia a la flexión respecto a las probetas sin nudo en su culmo. La maduración de la probeta es fundamental en la determinación de la resistencia a la flexión, ya que al llegar a edad adulta la Guadua adquiere su resistencia última de falla a la flexión. La Guadua Angustifolia Kunth a temprana edad no ha alcanzado la resistencia máxima a la flexión, además a esta edad aun cuenta con sus hojas caulinares.

Tabla 24. Flexión

Muestra	Carga máxima (N)	σ Resistencia última tracción (MPa)
Promedio	5015,194	7,481
Desviación estándar	3152,412	7,708
Coefficiente de variación (%)	62,857	103,029
Percentil 5	1641,622	0,919

En la Figura 8 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 5 centímetros.

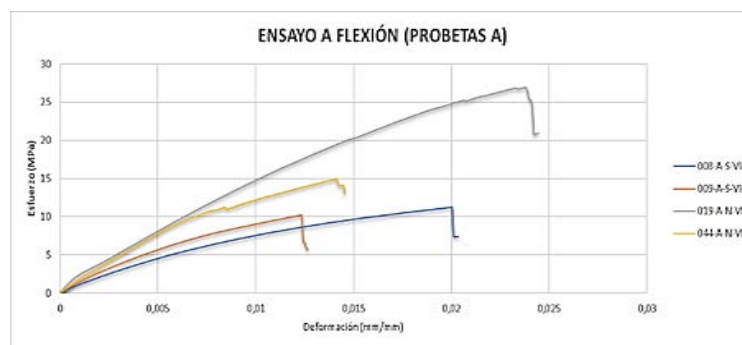


Figura 8. Ensayo a flexión (Probetas A, diámetro de 5 centímetros)

De la gráfica anterior se puede evidenciar que las probetas que presentan nudo en su culmo tienen mayor resistencia a la flexión respecto a las que no lo tienen. Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión de probetas de Guadua Angustifolia Kunth de 5 centímetros, son superiores a la resistencia a la flexión promedio la cual nos dio un valor de 7,481. En la Figura 9 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 10 centímetros.

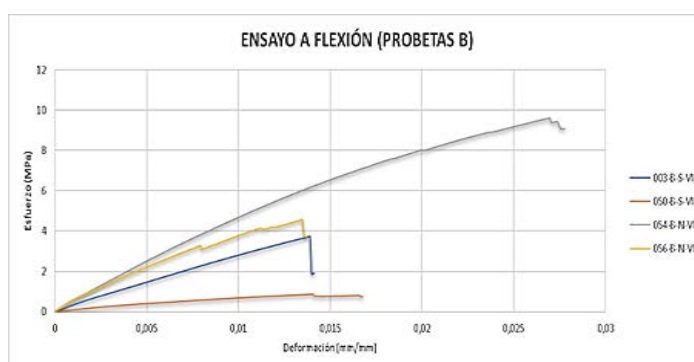


Figura 9. Ensayo a flexión (Probetas B, diámetro de 10 centímetros)

En la gráfica de las probetas de 10 centímetros de diámetro, se evidencia que las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que presentan nudo tienen mayor resistencia a la flexión. Las probetas con diámetro de 10 centímetros presentan menor resistencia que las probetas con diámetro de 5 centímetros. Los valores obtenidos de las probetas de diámetro de 10 centímetros, están cerca del valor de la resistencia a la flexión promedio. En la Figura 10 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 15 centímetros.

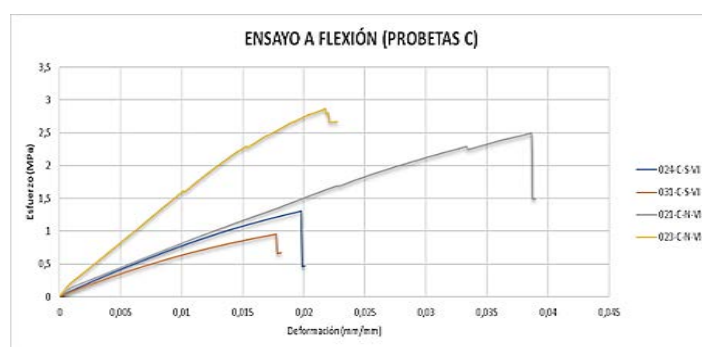


Figura 10. Ensayo a flexión (Probetas C, diámetro de 15 centímetros)

En la gráfica se evidencia que las probetas que presentan nudo en su culmo tienen mayor resistencia a la flexión, además se puede evidenciar que los valores obtenidos de resistencia a la flexión son menores a los obtenidos en las probetas de menor diámetro. Los valores obtenidos de resistencia a la flexión en probetas de diámetro de 15 centímetros, son inferiores a la resistencia a la flexión promedio obtenida de las 12 probetas.

4.2.4 Resistencia a la tracción

En este ensayo de laboratorio se dispuso de la Prensa Universal de Ensayos MTS, se utilizaron 12 probetas de Guadua Angustifolia Kunth con diámetros de 5, 10 y 15 centímetros, adicionalmente la mitad de estas probetas cuentan con nudo en su culmo. A continuación, en la (Tabla 11), se pueden observar las dimensiones de cada probeta y los datos obtenidos de este ensayo.

Tabla 25. Resultados Ensayo de Tracción

Muestra	E promedio (cm)	D promedio (cm)	L promedio (cm)	Inercia (mm ⁴)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso (g)	Densidad (Kg/m ³)	Carga última tracción (N)	σ max	
										Mpa	Kgf/cm ²
041-A-S-VI	1,093	5,652	30,093	429918,104	15,648	470,885	302,100	641,558	1761,386	4,503	45,912
047-A-S-VI	1,294	5,192	29,933	334037,046	15,843	474,216	194,100	409,308	882,832	2,229	22,729
011-A-N-VI	1,016	5,836	29,913	466504,166	15,380	460,047	329,800	716,884	3544,211	9,218	93,995
039-A-N-VI	0,661	6,672	30,443	570642,840	12,486	380,102	372,500	979,999	4571,259	14,645	149,330
004-B-S-VI	1,070	9,947	29,985	2981661,397	29,839	894,721	576,500	644,335	2116,772	2,838	28,935
049-B-S-VI	1,671	10,910	30,075	5344719,353	48,507	1458,848	628,400	430,751	2022,433	1,668	17,006
055-B-N-VI	1,457	10,388	29,985	4183726,524	40,871	1225,519	948,700	774,121	8499,193	8,318	84,819
058-B-N-VI	1,288	10,310	30,310	3789363,113	36,495	1106,160	786,900	711,380	9382,701	10,284	104,864
026-C-S-VI	1,886	14,455	30,160	15038628,310	74,480	2246,325	1444,100	642,872	3266,246	1,754	17,887
027-C-S-VI	2,974	14,018	29,918	16873600,931	103,182	3086,946	1183,500	383,389	4357,027	1,689	17,223
016-C-N-VI	2,099	14,720	30,108	17028386,890	83,217	2505,461	1792,000	715,238	12255,186	5,891	60,067
030-C-N-VI	2,303	14,733	30,215	17964298,046	89,919	2716,892	1876,900	690,826	5496,001	2,445	24,930
Promedio	1,567	10,236	30,095	7083790,560	47,156	1418,843	869,625	645,055	4846,271	5,457	55,642

Con los valores obtenidos en la realización de este ensayo, se calcularon datos estadísticos como se observa en la Tabla 12.

Tabla 26. Tracción

Muestra	Carga máxima (N)	σ resistencia última tracción (MPa)
Promedio	4846,271	5,457
Desviación estándar	3495,369	4,261
Coefficiente de variación (%)	72,125	78,096
Percentil 5	1366,037	1,679

En el ensayo de laboratorio de resistencia a tracción, se evidencio que las probetas de Guadua Angustifolia Kunth con menor diámetro obtuvieron los valores más altos de resistencia a la tracción. Las probetas que presentan nudo en su culmo resisten más a la tracción con respecto a las que no presentan los nudos en su culmo. El alineamiento de la probeta es algo fundamental en este ensayo ya que las probetas que no contaban con un alineamiento paralelo respecto a su fibra, tendieron a fallar antes que las que si presentan este alineamiento. La maduración de las probetas de Guadua es fundamental en este ensayo ya que al estar en edad adulta la Guadua Angustifolia Kunth llega a obtener su capacidad de resistencia máxima a la tracción. En la Figura 11 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 5 centímetros.



Figura 11. Ensayo a tracción (Probetas A, diámetro de 5 centímetros)

En la gráfica se puede evidenciar que las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que presentan nudo en su culmo, tienen mayor capacidad de resistencia a la tracción y tienen valores superiores a los de la capacidad de resistencia promedio a tracción. Las probetas que no tienen nudo en su culmo tienen valores inferiores a la capacidad de resistencia promedio a tracción. En la Figura 12 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 10 centímetros.

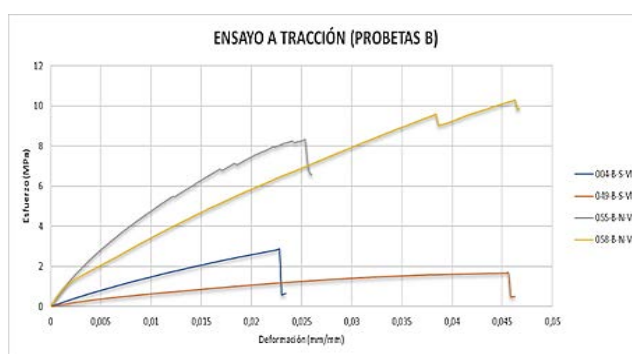


Figura 12. Ensayo a tracción (Probetas B, diámetro de 10 centímetros)

En la gráfica anterior se puede observar que las probetas que tienen nudo en su culmo, tienen mayor capacidad de resistencia a la tracción y los valores obtenidos de estas probetas son mayores a la capacidad de resistencia promedio a la tracción. La capacidad de resistencia a la tracción de las probetas que no tienen nudo en su culmo son inferiores a la capacidad de resistencia promedio a la tracción. En la Figura 13 se puede observar el esfuerzo (MPa) vs la deformación (mm/mm) de cada una de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth que tienen un diámetro de 15 centímetros.

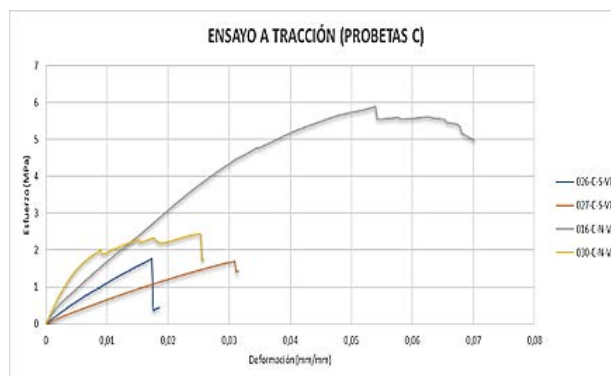


Figura 13. Ensayo a tracción (Probetas C, diámetro de 15 centímetros)

En los ensayos realizados con las probetas de 15 centímetros de diámetro, obtuvieron valores inferiores de capacidad de resistencia a la tracción respecto a las probetas de 5 y 10 centímetros. Las probetas que presentan nudos en sus culmos tuvieron valores de capacidad de resistencia a la tracción más alto que las probetas que no presentaban nudo en su culmo.

5. CONCLUSIONES

- En la caracterización de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth se evidenció que todas las probetas son muy diferentes ya que varían sus dimensiones (espesor, diámetro interno, diámetro externo, longitud), los nudos en los culmos no estaban en el centro en la mayoría de las probetas, y algunas probetas no tienen un alineamiento paralelo a la fibra. Estas variaciones en las probetas se vieron reflejadas en la determinación de la Densidad de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth, donde los resultados obtenidos están en el rango de 400 Kg/m^3 y 800 Kg/m^3 .
- La capacidad de resistencia a la compresión de las probetas de Guadua Angustifolia Kunth es mayor en probetas con sus extremos cortados a 90° respecto a la fibra de la Guadua. A mayor diámetro de las probetas de Guadua se obtiene una mayor capacidad de resistencia a la compresión. Las Guaduas que no tienen un alineamiento longitudinal tienen menor capacidad de resistencia a la compresión y tienden a fallar por donde se presenta el cambio de dirección de su culmo.
- La capacidad de resistencia al corte no presenta diferencia en su esfuerzo debido a que esta propiedad de la Guadua depende de su maduración.
- La capacidad de resistencia a la flexión y a la tracción es mayor en las probetas con diámetro 5 cm y su valor máximo se obtuvo en probetas de Guadua con nudo en su culmo. Las Guaduas que no tienen un alineamiento longitudinal tienen menor capacidad de resistencia a la flexión y a la tracción.
- La capacidad de resistencia de la Guadua Angustifolia Kunth llega a sus esfuerzos máximos en la edad adulta de la Guadua, en esta edad esta la Guadua lista para cortar.

Recomendaciones

- Se debe realizar un estudio más detallado dado a la influencia que posee el nudo en los procesos de ensayos y resistencias mecánicas que posee en las probetas de guadua.
- La Guadua tiene fibras naturales muy fuertes, que la hacen muy ventajosa frente a otros materiales, se recomienda buscar una mejor estandarización o normatividad para que pueda ser más usada en el campo de la construcción y pueda sustituir otro material.
- Se recomienda tener más información del estado de madurez de la guadua, la cosecha y pos-cosecha, y tener un mayor control de cada uno de los pasos de las probetas de guadua como corte, y transporte antes de llegar a ser utilizadas a ensayos, ya que esta parte tiene bastante influencia en la resistencia del material.
- Se recomienda realizar más estudios minuciosos acerca de todos los beneficios aportados por la Guadua Angustifolia Kunth, con el fin de incentivar el uso de nuevos materiales amigables con el medio ambiente.

- Se recomienda utilizar bambú entre la edad de 2 y 6 años, ya que es la edad promedio de vida del culmo, y garantiza su máxima resistencia después de este tiempo la guadua empieza perder la resistencia, por esto es sumamente importante realizar el corte en la edad adecuada.
- Se recomienda tener en cuenta los porcentajes de error que arrojan cada uno de los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.
- Se debe considerar el uso de aditivos de conservación y preservación que ayuden a la estabilización de la guadua.

REFERENCIAS

- [1] Teneche, G. Guadua y bambú Colombia (GBC). Guadua Angustifolia Kunth - Estudio 5. 2016. En línea. [Consulta: 24 octubre 2018]. Disponible en: <https://guaduarybambu.es.tl/Estudio-5.htm>.
- [2] Faruk, I. En Colombia existen actualmente 55.000 hectáreas de guadua. 2018. [En línea]. [Consulta: 24 octubre 2018]. Disponible en: <https://www.agronegocios.co/agricultura/en-colombia-existen-actualmente-55000-hectareas-de-gadua-2742947>.
- [3] Avellaneda, J. La cultura de la guadua en Colombia. En línea. [Consulta: 24 octubre 2018]. Disponible en: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6130/07_ESD_Cos_pp_85_121.pdf.

Entre los principales problemas a los que se enfrenta la industria del concreto en el siglo actual, se encuentran las enormes necesidades de realizar nuevas infraestructuras alrededor del mundo en las ciudades de rápida urbanización, de enfrentarse al deterioro prematuro de muchas estructuras y de sus acabados, de mejorar la durabilidad de los materiales de construcción de manera rentable y de disminuir a la vez la producción de los materiales tradicionales contaminantes. Es notorio el interés en encontrar, hoy en día, soluciones ecológicas para la eliminación segura de millones de toneladas de subproductos industriales que podrían ser empleados para su incorporación en los materiales con base de cemento. La investigación es un gran campo en el que podemos estudiar nuevas alternativas que pueden contribuir al cambio del mundo. Es por eso que este texto aborda el área de materiales de construcción en específico. El tema tratado tiene que ver con el diseño de mezcla de mortero, ya que uno de sus componentes es el cemento, el cual como se mostrará en el desarrollo del trabajo es un material cuya fabricación representa un elevado nivel de contaminación para el medio ambiente. Para desarrollar esta investigación se estudiaron los componentes de una mezcla de mortero tradicional para estudiar si el principal de ellos (el cemento) podía ser reemplazado por materiales sostenibles procedentes de los desechos industriales sin afectar las propiedades mecánicas. Al reemplazar y alterar la mezcla se evaluó su comportamiento físico-mecánico. En este capítulo, se quiere mostrar un ejemplo de diseño de mezcla de un mortero con un enfoque sostenible el cual pueda cumplir la misma función de una mezcla de mortero tradicional para incentivar la implementación de su uso y contribuir a la disminución de la contaminación mediante la reducción de la fabricación del cemento, para ello este texto muestra una caracterización del nuevo material proponente con el fin de analizar sus propiedades y analizar si puede este empezar a ser usado en la industria de la construcción. Los resultados obtenidos demuestran como el mortero sostenible tenga mejor comportamiento que el mortero tradicional frente a esfuerzos de compresión, flexión y ensayos de fluidez y temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

La energía juega un papel crucial en el crecimiento de los países en desarrollo como Colombia. En el contexto de la baja disponibilidad de recursos no renovables junto con el requerimiento de grandes cantidades de energía para la producción de los materiales de construcción tradicionales, como el cemento, la importancia de utilizar residuos industriales no puede ser subestimada. Durante la fabricación de una tonelada de cemento Portland ordinario, el más empleado en cualquier mezcla de construcción, se necesitan alrededor de 1.1 toneladas de materias primas como caliza, arena y otras. Además, durante la fabricación de 1 tonelada de cemento portland, una igual cantidad en peso de dióxido de carbono, uno de los contaminantes más peligroso, se liberan en la atmosfera [1]. En este escenario, la búsqueda de materiales alternativos a los materiales tradicionales y que además procedan de los residuos de las industrias, representa un paso obligatorio para poder aportar un cambio sostenible al futuro de la construcción. Por esta razón, en este estudio se propone un mortero con propiedades puzolánicas con remplazo parcial del contenido de cemento con cascaras de huevos.

1.1 Residuos de las industrias y objetivos de desarrollo sostenible

La industria del cemento es intensiva en energía, y este es su principal factor de costo. En su producción se producen emisiones del horno de cemento que provienen de las reacciones químicas y físicas y de la combustión de combustibles. Los principales componentes de los gases de emisión del horno son el nitrógeno de aire de combustión, el dióxido de carbono (CO₂) proveniente de la calcinación del carbonato de calcio (CaCO₃) que es su componente principal, y de los combustibles quemados [2].

Hoy en día el estado del planeta es crítico, los recursos naturales que se agotan ante la presión de una población en constante crecimiento, contaminación y cambio climático [3]. En un intento por salvar al planeta en el año 2015, algunos países se han unido para adoptar una nueva agenda de desarrollo que se basó en los “Objetivos del Desarrollo Sostenible” (ODS). Dentro de los ODS es importante rescatar que la ingeniería civil puede aportar mucho para sus cumplimientos, como por ejemplo impulsando el desarrollo de infraestructuras resilientes, la promoción de la industrialización inclusiva y sostenible, y la innovación [4]. Emprendimientos como esto han llevado a nuevas investigaciones y formas de crear materiales sostenibles en pro del desarrollo de un planeta sostenible.

1.2 Mortero

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, prácticamente es concreto sin el agregado grueso [5]. El mortero tipo N es el más utilizado en la industria de la construcción. Este es muy usado cuando los elementos no van a estar expuestos al contacto con agentes agresivos. En Colombia se usa ampliamente como material de revoque o repello, como material de pega en la mampostería y en los últimos tiempos en la mampostería estructural.

¹ lauraocta@unisabana.edu.co

² giulia.forestieri@unisabana.edu.co

1.3 Cascaras de huevos

La cáscara del huevo se compone de varias capas compuestas principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3) que crecen mutuamente. La capa superior, que representa la más dura, es una capa recubierta de una cutícula orgánica. Desde el punto de vista químico, la cáscara del huevo contiene principalmente calcio, magnesio y otras proteínas. En muchos otros países, es notorio que se utilice como fuente de calcio en los alimentos para animales después de haber sometido la cascara a un proceso de secado. La calidad de la cal en los residuos de la cáscara de huevo depende de una serie de factores, como la exposición a la luz solar, el agua y las condiciones climáticas. Para su uso en el sector de la construcción, en particular para mezclas de mortero y de concreto, la cascara de huevo se somete a un proceso de limpieza, secado y tamizado y se agrega reemplazando una cantidad del cemento según unas proporciones adecuadas.

1.4 Investigaciones previas e importancia del estudio

En investigaciones previas se han diseñado morteros amigables con el medio ambiente, de acuerdo con los ODS nombrados anteriormente. Entre ellos, cabe destacar el diseño de morteros livianos con espuma de poliuretano, logrando así, mediante el uso de aditivos con bajos valores de equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLB), aumentar las propiedades mecánicas proporcionalmente al aumento de la tasa de sustitución de la arena por desechos de poliuretano (PU). Estos surfactantes no iónicos parecen promover una microestructura homogénea y mejorar la adhesión entre los residuos de PU y la pasta de cemento. Por otro lado, los morteros mezclados con aditivos que muestran altos valores de HLB, son más ligeros y macro porosos, debido al aumento de aire arrastrado por la tasa de sustitución de arena por residuos de PU [6].

Otro ejemplo de un mortero amigable con el medio ambiente fue el desarrollado por Azimi Resketi & Toufigh (2019) [7], donde se utilizaron como materiales verdes en el diseño de mezcla la puzolana natural "taftan" y dos tipos de ceniza de cáscara de arroz (RHA). Además, se usó un dispositivo modificado de prueba de corte directo (DST) para determinar la resistencia de la unión al corte del mortero con el ladrillo. También se estudió el efecto de aumentar la resistencia al cizallamiento o corte con el tiempo. Finalmente, se determinaron el ángulo de fricción y la cohesión de cada sistema. Los resultados de la prueba mostraron que los materiales de desecho como el RHA en el mortero podrían considerarse como aditivos de mortero apropiados y beneficiosos. El uso de estos aditivos dio como resultado una mayor ductilidad del mortero y una mayor tensión de falla y también una reducción del costo del mortero y sus impactos ambientales perjudiciales.

En las investigaciones mostradas se evidencia que para conseguir un mortero que ayude a reducir el impacto ambiental por su fabricación, se ha decidido reemplazar en algunas proporciones la arena dentro de la mezcla sin enfocarse en el cemento. Pero, como se mencionó anteriormente, es el cemento el que genera mayores niveles de contaminación. Es por esto que en esta investigación se busca trabajar más el objetivo de lograr un mortero de uso general que tenga las mismas o mejores respuestas mecánicas cambiando la proporción del cemento en volumen a través de las cascara de huevo. La importancia de este estudio está relacionada, entonces, al investigar sobre la utilización de desechos industriales, en el detalle los residuos de la industria alimentaria como las cascara de huevo, como reemplazo del cemento en el mortero y su influencia en la trabajabilidad de la mezcla y en los parámetros mecánicos principales, cuales la resistencia a compresión y la resistencia a flexión demostrando, a través de resultados de laboratorio, como es posible mejorar los materiales tradicionales de la construcción gracias a un enfoque sostenible.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Los materiales empleados en la presente investigación fueron cemento hidráulico, arena, agua y cascara de huevo. El cemento utilizado fue el Portland tipo 1 con su función principal de ser el conglomerante de la mezcla. La arena empleada fue la de río como agregado fino. La cáscara de huevo fue obtenida de la industria local y fue granulada y tamizada según el tamaño requerido antes de usarse para la mezcla de mortero. El agua se utilizó en la investigación tanto para mezclar como para curar los cubos de mortero preparados.

2.1 Recolección y preparación de las cascara de huevo

Una vez recolectadas las cascara de huevos, fueron secadas en laboratorio en los hornos HUMBOLDT. Este procedimiento se realizó durante 24h con el fin de eliminar la carga orgánica de las cascara, a la temperatura máxima de estos 232 °C (Figura 1). El paso siguiente fue triturarlas a un tamaño considerablemente pequeño con el fin de facilitar su adherencia a la mezcla de mortero así conseguir mejores resultados de resistencia mecánica (Figura 2).

2.2 Elaboración de especímenes de mortero

Se realizaron seis especímenes de mortero, de forma cubica y prismática, con los materiales mencionados anteriormente. Para ello se reemplazó en volumen un 10% del cemento, es decir, se pesaron 500 gramos de cemento

y se depositaron en un recipiente y se marcó en el recipiente cuanto era este peso en volumen (Figura 3). De este peso se extrajo el 10% (50g) y se completó en volumen con cascara de cemento, para una mezcla con 85% de relación agua/cemento. Las cantidades finales al realizar el procedimiento anterior fueron las reportadas en la Tabla 1.



Figura 1. Cascaras de huevo en el horno Humboldt



Figura 2. Cascaras trituradas



Figura 3. Reemplazo de cemento por cascara

Tabla 1. Proporciones de los materiales empleados en la mezcla de mortero, expresados en gramos (g) y en proporciones en función del peso del cemento

Cemento	Arena	Cascara de huevo	Agua
450 g	1375 g	104 g	425 g
1	3.05	0.23	0.94

Con los materiales mencionados en la Tabla 1 se preparó un total de 6 muestras de mortero. Se realizaron, en el detalle, 6 cubos de 50 ± 0.01 mm (2") de lado para el ensayo a compresión y 2 paralelepípedos de 40 mm*160 mm para el ensayo a flexión. Tanto los cubos como los paralelepípedos fueron compactados en los moldes HUMBOLDT en dos capas, cada una de ellas compactada con 25 golpes a través de un elemento de caucho. Antes de fundir la mezcla en los moldes, se engrasaron los cubos y los paralelepípedos. Después de 24h se procedió a desencofrar las muestras y se pasó a curarlas en agua y cal durante las 24h sucesivas. Los ensayos realizados, según las normas vigentes, con el fin de obtener una completa caracterización mecánica de la mezcla preparada fueron los ensayos de: compresión realizado siguiendo la norma ASTM C109/C109M - 16a [8]; fluidez, ASTM C230/C230M-14 [9]; temperatura, ensayo empírico; flexión, ensayo que se realizó siguiendo la norma INVIAS E-324-07 [10].

2.3 Ensayo de compresión

Este ensayo tiene como objetivo determinar de resistencia a la compresión de la mezcla frente a una carga uniaxial. El ensayo fue realizado en la maquina universal INSTRON EMC 23-030 con máxima capacidad de carga de 600 kN sobre seis cubos (Figura 4). Los cubos fueron fallados a 24 días de curado y el valor máximo alcanzado durante la prueba fue reportado a la resistencia máxima a 28 días. La velocidad que se aplicó durante el ensayo fue la establecida en la norma de 2mm/min (Figuras 5 y 6).



Figura 4. Especímenes preparados con cascara de huevos para ser sometidos a ensayo a compresión

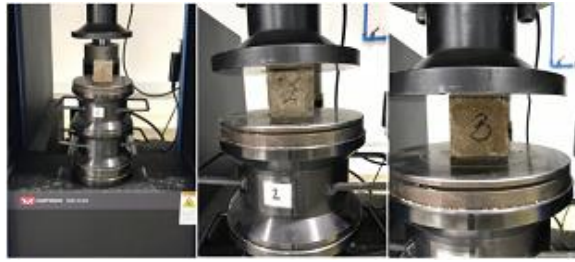


Figura 5. Especímenes sometidos al ensayo de compresión mediante la maquina universal



Figura 6. Especímenes sometidos al ensayo de compresión mediante la maquina universal

El tipo de falla que se puede observar en este ensayo es de de compresión (Figuras 7, 8 y 9). Todos los especimens ensayados mostraron una orientación de las fallas en dirección vertical, paralela a la aplicación de la carga uniaxial lo que inidica que el mortero preparado fallará por compresión pura.

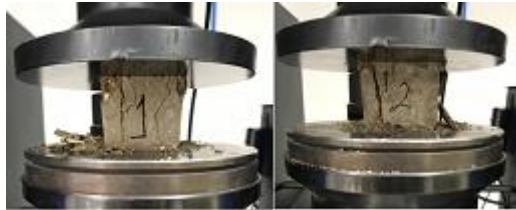


Figura 7. Falla de los especímenes 1 y 2 con cascaras de huevo

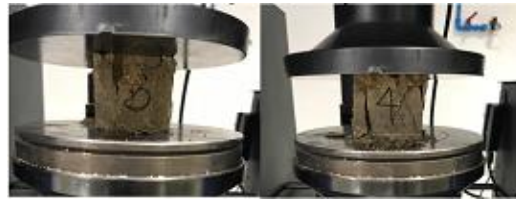


Figura 8. Falla de los especímenes 3 y 4 con cascaras de huevo



Figura 9. Falla de los especímenes 5 y 6 con cascaras de huevo

2.4 Ensayo de fluidez

El ensayo de fluidez tiene como objetivo el de determinar la trabajabilidad de la mezcla mediante la ayuda de una mesa de flujo. Para la realización del ensayo se utilizó la mesa de flujo HUMBOLDT MFG 00 [7]. Una vez lista la mezcla uniforme se colocó la mezcla en el molde troncocónico de dimensiones 68mm de diámetro menor interno y 82,7mm de diámetro mayor interno en dos capas con 20 golpes por cada una (Figura 10). Luego de esperar un minuto, se golpeó 20 veces la mesa de flujo haciendo que girara la manecilla, y con el vernier se midieron 4 diámetros expandidos diferentes para luego, encontrar el promedio de los diámetros (D_p). Relacionando el diámetro inicial, correspondiente a la base inferior del molde troncocónico, con el D_p , se pudo calcular el porcentaje de fluidez y relacionarlo a la trabajabilidad correspondiente [11]. La fluidez se determinó mediante la ecuación (1).

$$Fluidez = \frac{D_p - D_i}{D_i} * 100 \quad (1)$$

Donde D_p es el diámetro promedio de los cuatro diámetros extendidos registrados durante el ensayo, D_i el diámetro inicial de la pasta correspondiente al diámetro máximo del anillo.



Figura 10. Ensayo de fluidez mediante mesa de flujo. En las imágenes mostradas se puede observar el ensayo de fluidez desde la colocación de la muestra en el molde, los golpes de compactación y la medición del diámetro expandido al final del ensayo

2.5 Ensayo de temperatura

Este ensayo tiene como objetivo determinar si el mortero realizado con las cascaras de huevo, cumple con la propiedad de ser aislante térmico. El ensayo consiste en tomar la temperatura de un fragmento de cubo de mortero, someterlo a una fuente de calor durante un tiempo determinado y medir las temperaturas superficiales antes y después del ensayo. Este ensayo fue aplicado a la mezcla preparada y fue comparado a los valores de temperatura medidos en una mezcla de comparación tradicional compuesta solo de cemento, arena y agua, realizada con las mismas proporciones reportadas en la Tabla 1. Para medir las temperaturas se empleó el termómetro FLUKE 62 MAX y de los valores obtenidos se calcularon los gradientes de temperaturas (Δ) expresados en grados Celsius (Figura 11).



Figura 11. Ensayo de temperatura. En la imagen de la izquierda se muestra la temperatura superficial de la muestra de mortero con cascaras de huevo antes del ensayo y a la derecha la temperatura alcanzada después de 1 minuto en la misma muestra ensayada. Ambas temperaturas están expresadas en grados Celsius

2.6 Ensayo de flexión

Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la flexión del mortero elaborado con cemento hidráulico. El mortero de prueba fue elaborado con las proporciones reportadas en la Tabla 1. El ensayo realizado fue el de flexión por tres puntos, lo que significa que los paralelepípedos están apoyados en los puntos extremos (Figuras 12 a 17) y una carga puntual viene aplicada progresivamente en el centro a lo largo de la prueba. El ensayo fue realizado en la maquina universal INSTRON EMC 23-030 con máxima capacidad de carga de 600 kN. Los especímenes en este ensayo fueron fallados a siete días de curado y el valor máximo alcanzado durante la prueba fue reportado a la resistencia máxima a 28 días. La velocidad que se aplicó durante el ensayo fue la establecida en la norma [10] de 1mm/min.

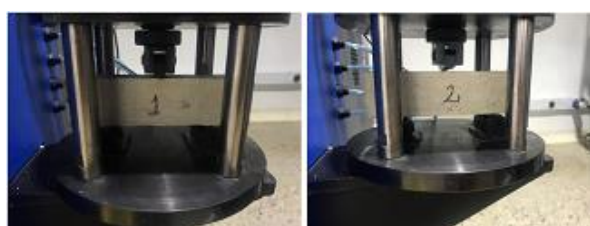


Figura 12. Paralelepípedos elaborados con la mezcla que reemplaza el 10% del cemento por cascara de huevo listos para ser ensayados

En el ensayo de flexión podemos notar que el mortero en general tiene una baja resistencia cómo es posible observar en los valores reportados en la Tabla 2. Comparando el tipo de fallas obtenidas (Figuras 13 a 17), se observa la diferencia entre la falla a compresión que es una falla más dúctil y la falla a flexión más frágil que ocurre en un tiempo más corto y presentando agrietamiento solo en la parte central de la muestra.



Figura 13. Falla del paralelepípedo 1 con cascara de huevo en el ensayo a flexión



Figura 14. Falla del paralelepípedo 2 con cascara de huevo en el ensayo a flexión

Para contrastar este ensayo con el de la mezcla tradicional se elaboraron de igual forma 2 paralelepípedos (Figura 15) que fueron ensayados a las mismas condiciones de la mezcla tradicional, que tuvieron al igual que las muestras de cascara de huevo un tiempo de curado de siete días, con resistencia reportada a 28 días.

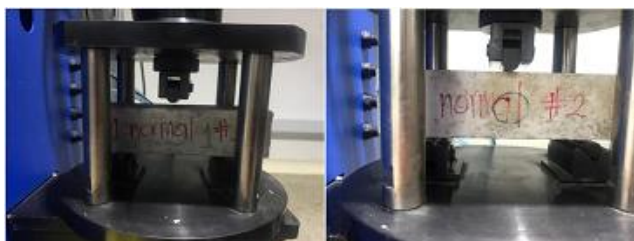


Figura 15. Paralelepípedos elaborados con la mezcla tradicional, cemento, arena y agua, listos para ser ensayados

Igual que en la mezcla proponente, el tipo de falla obtenida (Figuras 16 y 17) indica que no se llegó a una fuerza alta al momento de fallar, sino que el ensayo fue rápido debido a que el mortero no cuenta con alta resistencia a la flexión.

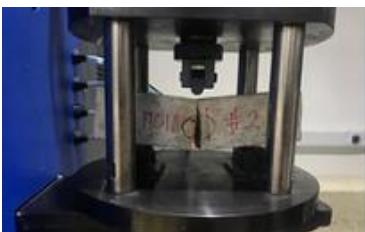


Figura 16. Falla del paralelepípedo 1 de la mezcla tradicional en el ensayo a flexión



Figura 17. Falla del paralelepípedo 2 de la mezcla tradicional en el ensayo a flexión

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayo de resistencia a compresión

En la Figura 18 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de los 6 cubos ensayados alcanzada para la mezcla. Como se puede observar, el mortero realizado presenta un valor máximo de resistencia de 5,2 MPa a 24 días de curado

que correspondería a un valor de 6,1 MPa a los 28 días. Según la clasificación de los morteros [11] el mortero preparado corresponde a la categoría de los morteros tipo N que es un mortero con propósito general. Su uso se puede ver en estructuras de mampostería ubicadas sobre el nivel del suelo, así mismo es bueno en enchapes de mampostería para divisiones internas y externas. Este tipo de mortero, además, representa la mejor combinación de resistencia, trabajabilidad y economía. La grafica muestra también como el comportamiento del mortero frente al carga uniaxial fue dúctil gracias al área contenida debajo de la curva. Este comportamiento fue confirmado en el ensayo de fluidez donde se demostró la trabajabilidad de la mezcla correspondiente al tipo “fluida”. Ambos resultados alcanzados permiten recomendar un sistema de colocación del mortero que puede ser manual, por bombeo, o por inyección [11].

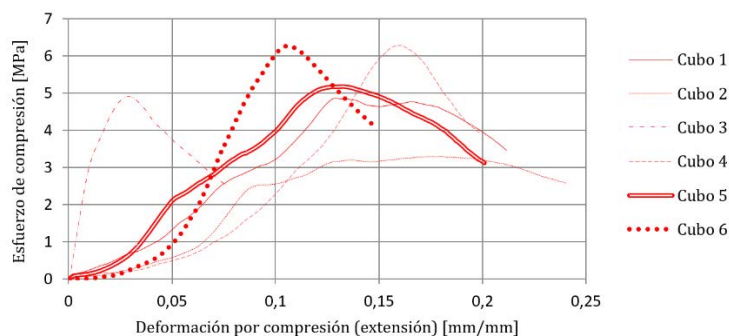


Figura 18. Resistencia a compresión de los 6 cubos de la mezcla. Los valores en el eje X representan la deformación (adimensional) y en el eje Y la resistencia a compresión en MPa

La resistencia del mortero de comparación compuesto de mezcla tradicional fue de 5,2 MPa reportado a 28 días de curado. Comparando los valores alcanzados en el mismo ensayo a compresión entre la mezcla tradicional y la con cascara de huevo es posible afirmar que el mortero con cascara tuvo mejor comportamiento mecánico. Frente a este mismo tiempo de curado el mortero que reemplaza dentro de su composición el 10% en volumen por las cascara de huevo tiene una resistencia de 6,1 MPa, lo que significa que esta última mezcla con proporción distinta de cemento responde mejor frente a la sollicitación mecánica de compresión en un 17.3% (ecuación (2)).

$$\frac{6,1 \text{ MPa} - 5,2 \text{ MPa}}{5,2 \text{ MPa}} * 100 = 17,3\% \quad (2)$$

3.2 Ensayo de fluidez

Teniendo en cuenta que la fluidez de este mortero es de un 131.8%, encontramos que su uso puede ser para pañetes, rellenos de mampostería y morteros autonivelantes para pisos, además para su colocación puede ser manual, por bombeo o por inyección.

3.3 Ensayo de temperatura

Gracias al ensayo de temperatura, las temperaturas alcanzadas fueron de 17,7°C hasta 34,1°C, mientras que el mortero de mezcla normal pasó de 17,7°C a 57,8 °C dando unos gradientes de temperatura respectivamente de 16,4°C para el mortero con cascara y de 40,1°C para el mortero tradicional. Los valores (Tabla 2) muestran como la cascara de huevo ayuda el mortero a mejorar su comportamiento frente a fuentes de calor. Es decir que le confiere características de aislante térmico. Esta propiedad resulta ser muy importante a la hora de mejorar las prestaciones energéticas del edificio porque permite bajar la transmitancia térmica de las paredes empleando acabados con baja conductividad térmica. Por esta razón es aconsejable el uso de morteros con cascara en vez de los tradicionales para evitar que las superficies de los acabados se sobrecalienten.

3.4 Ensayo de flexión

Para este ensayo se determinó la resistencia del mortero a flexión (Rtf) por tres puntos a siete días de curado y fue reportado el valor máximo a 28 días. El valor máximo de la flexión fue calculado mediante la ecuación 3.

$$Rtf = \frac{3FL}{2bh^2} [MPa] \quad (3)$$

Donde F representa la fuerza máxima expresada en N; L la longitud entre los apoyos en mm; b la base de los cubos y h la altura, ambas expresadas en mm. Por lo tanto, el valor alcanzado en la prueba fue:

$$\text{Valor promedio de } Rtf = 0,02MPa$$

El esfuerzo máximo de flexión es de 0,02MPa a los primeros 7 días, es decir 0,08 MPa para los 28 días. El ensayo se realizó sobre dos muestras, se calculó el valor máximo de Rtf para cada uno de ellos y se tomó el valor promedio entre

estos, del mismo modo para el mortero tradicional se ensayaron dos muestras así mismo como para el de la mezcla de mortero normal, se ensayaron dos paralelepípedos con el mismo tiempo de curado, consiguiendo para la mezcla una resistencia de 0,12 MPa reportada a 28 días. En este caso la resistencia a la flexión es mayor por parte de la mezcla de mortero tradicional.

Tabla 2. Respuesta a la caracterización físico-mecánica del mortero con cascara de huevo en comparación a la mezcla de mortero tradicional. Los valores reportados en la tabla son: σ_{\max} el valor máximo de resistencia a compresión (MPa); $R_{tf_{\max}}$ la resistencia máxima a flexión (MPa); Fl el porcentaje de fluidez (%); ΔT el gradiente de temperatura (°C). Los valores de los parámetros mecánicos están reportados a 28 días

Mezcla de Mortero	σ_{\max} [MPa]	$R_{tf_{\max}}$ [MPa]	Fl [%]	ΔT [°C]
10% cascara de huevo	6,1	0,08	131,8	16,4
Tradicional	5,2	0,12	85,0	40,1

Los resultados logrados en la presente investigación son parecidos a los obtenidos en trabajos previos por otros autores. Las mezclas preparadas en otras investigaciones donde quisieron aumentar las propiedades mecánicas proporcionalmente a través del aumento de la tasa de sustitución de la arena por desechos de poliuretano (PU) es decir donde plantearon reemplazar uno de los materiales base del mortero como se realizó en el presente estudio, lograron tener valores de resistencia a compresión superiores a los de las mezclas tradicionales [6]. En el mismo estudio también se obtuvieron resultados beneficiosos en lo que tiene que ver con la respuesta mecánica, así como también a modo de mortero amigable con el medio ambiente Azimi Resketi & Toufigh (2019) [7], proponiendo utilizar materiales verdes en el diseño de mezcla la puzolana natural "taftan" y dos tipos de ceniza de cáscara de arroz (RHA), consiguiendo buenos resultados de resistencia mecánica en su mezcla.

En conclusión, es posible destacar los efectos positivos de la cascara de arroz tanto en el comportamiento físico como en el comportamiento mecánico. Los únicos valores que no fueron satisfactorios fueron los que obtuvieron en el ensayo a flexión. Los valores obtenidos, bajo la unidad, demuestran que el mortero no es apto para elementos sometidos a esfuerzos de flexión. Para ello se plantea, en futuro, de seguir investigando en la respuesta mecánica frente a la sollicitación mecánica mencionada agregando a la mezcla fibras. Las fibras, como es noto en la literatura, permiten mejorar hasta de un 50% la respuesta mecánica de los materiales de construcción frente tanto a la tracción como a la flexión. En general, las fibras permiten confinar el material y retrasar la propagación de las fisuras, produciendo así un aumento en la tensión máxima y en la ductilidad [12].

4. CONCLUSIONES

Este estudio muestra como las propiedades físico-mecánicas de una mezcla de mortero elaborada con un reemplazo del cemento con un 10% en volumen por cascara de huevo secas y trituradas, pueden ser mejoradas comparadas a las de un mortero tradicional. Los resultados de esta caracterización mostraron que la resistencia a la compresión en este material es 17.7% mayor a la resistencia de un mortero tipo N. En cuanto a la fluidez el valor alcanzado muestra como la presencia de la cascara no altera negativamente la trabajabilidad de la mezcla y como el mortero preparado sigue manteniendo su uso tradicional en la construcción, para pañetes, rellenos de mampostería y morteros autonivelantes para pisos. En cuanto a las propiedades físicas se demostró como la cascara de huevo permite mejorar el poder aislante del mortero respecto a un mortero tradicional. Según los resultados de flexión se puede observar que en este caso la mezcla tradicional es más eficiente que la mezcla proponente, aunque los valores alcanzados para ambas mezclas fueron bajos. Para ello se puede plantear un estudio enfocado en la flexión de este mortero para ver cómo mejorar su comportamiento frente a la flexión. En conclusión, la presencia de la cascara de huevos en el mortero permite mejorar sus propiedades gracias a la reacción puzolánica generada durante la hidratación del cemento. De acuerdo con los resultados, el material puede someterse a un estudio más profundo para confirmar su implementación en la industria de la construcción y así contribuir a la construcción de ciudades sostenibles, pensando en una nueva alternativa para reducir el uso del cemento disminuyendo a la vez la cantidad de contaminantes debidas a su proceso de producción.

REFERENCIAS

- [1] D. Gowsika, S. Sarankokila, K. Sargunan, "Experimental Investigation of Egg Shell Powder as Partial Replacement with Cement in Concrete", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 14 (2), pp. 65-68, 2014.
- [2] S. Navarro. Cemento 3 Introducción, el arquitecto o el ingeniero normalmente deben decidir y especificar el tipo de cemento que se debe emplear en una obra. 2008 [Online]. Available: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>
- [3] E. Yeves. "¿Dónde estamos ahora?". 2018 [Online]. Available: https://elpais.com/elpais/2018/04/23/planeta_futuro/1524490189_606694.html.
- [4] ONU. "Objetivos del desarrollo sostenible. 2019. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [5] NTC 121. Tipos de cementos y características según NTC 121. [Online]. Available: <http://www.cetesa.com.co/tipos-de-cementos-y-caracteristicas-segun-ntc-121/>

- [6] R. Arroyo, M. Horgnies, C. Junco, A. Rodríguez, V. Calderón, "Lightweight structural eco-mortars made with polyurethane wastes and non-ionic surfactants", *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 157-163, 2019.
- [7] N. Resketi, V. Toufigh, "Enhancement of brick-mortar shear bond strength using environmental friendly mortars", *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 28-40, 2019.
- [8] ASTM C109/C109M-16, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", ASTM Standard International, 2016.
- [9] ASTM C230/C230M-14, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM Standard International, 2014.
- [10] INVIAS E 324-07, Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico, Instituto Nacional de Vías, 2007.
- [11] Biblioteca Digital UN. "Bdigital.unal". (sf). [Online]. Available: http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/17/9589322824_Parte5.pdf.
- [12] D. Fanella, A. Naaman, "Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression", *Journal Proceedings*, vol. 82 (4), pp. 475-483, 1985.

Evaluación de la respuesta inelástica de las columnas de un puente segmental de cinco carriles localizado en una zona de amenaza sísmica alta

Gerardo A. Zapata G.¹

Álvaro Viviescas J.²

Carlos A. Riveros J.³

^{1,3} Universidad de Antioquia

² Universidad Industrial de Santander
Colombia

En los últimos años, el gobierno colombiano ha realizado grandes inversiones económicas en proyectos viales con el objeto de mejorar la conectividad entre los diferentes centros de producción, exportación y consumo del país. La característica común a estos proyectos radica en que en su gran mayoría se ubican en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, y por consiguiente se construyen para salvar depresiones propias de una topografía montañosa. El corredor Bogotá-Buenaventura y la ruta del sol son ejemplos representativos de proyectos de conectividad donde se han construido puentes utilizando el método de voladizos sucesivos, método que se ha convertido en un procedimiento constructivo de gran aplicación en los últimos años en Colombia. Este capítulo presenta los resultados de la evaluación inelástica de las columnas de un puente de cinco carriles construido por voladizos sucesivos localizado en una zona de amenaza sísmica alta. Este tipo de análisis inelástico es importante debido a que los procedimientos vigentes de análisis y diseño de puentes se fundamentan en el uso de modelos elásticos. Los resultados presentados en este capítulo evidencian que las columnas del puente para el sentido transversal tienen una reserva de aproximadamente 1.77 veces la ductilidad estimada en el diseño del puente, situación relevante en caso de presentarse un evento sísmico de considerable magnitud. En el sentido longitudinal las columnas del puente presentan igualdad entre el cortante sísmico en la base del análisis de respuesta inelástica de las columnas y el cortante sísmico en la base, calculado en el diseño elástico.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia presenta un atraso significativo en su infraestructura vial, motivo por el cual el país tiene serias deficiencias en temas de competitividad y movilidad entre los principales centros urbanos. Adicional a este aspecto, se tiene que, para lograr llevar los productos de los centros de producción, a puertos, o zonas de consumo, se deben salvar depresiones topográficas que se categorizan en su gran mayoría como zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, esta situación provoca que el costo de construcción de infraestructura vial se incremente y que se requiera del uso de un número considerable de puentes [1]. Uno de los programas más ambiciosos de los últimos años, con el propósito de hacer más competitiva la infraestructura vial colombiana, es el programa de carreteras de cuarta generación (4G) de concesiones viales de Colombia. Un número considerable de puentes utilizando el método de voladizos sucesivos han sido construidos en el marco de ejecución de los proyectos de carreteras 4G.

La metodología de voladizos sucesivos se considera adecuada para puentes con luces entre 50 m y 250 m [2]. El método consiste en construir la superestructura en dovelas a partir de pilas o columnas agregando tramos parciales que se sostienen del tramo inmediatamente anterior, este procedimiento se realiza de manera simétrica a ambos lados de las columnas con el propósito de no inducir grandes momentos a la columna que puedan generar algún tipo de inestabilidad, y aunque este método puede llegar a convertirse en un ciclo de actividades repetitivas, cada puente en particular presenta características que lo hacen único. El puente Yatí-Bodega, entre los municipios de Magangué y Mompo, para su fecha de terminación en el año 2020, será el puente más largo de Colombia y el quinto más largo de Suramérica con 2.3 Km, para la construcción del tramo sobre el río Magdalena se utilizó el método de voladizos sucesivos.

A nivel urbano también se ha popularizado el método de voladizos sucesivos con obras importantes de conectividad como ser el puente de Moravia, que conecta la autopista norte con el sector de Moravia pasando sobre el río Medellín y el sistema metro, este puente tiene una longitud de 370 m, luz central de 185 m, dos luces laterales de 92.5 m, y un ancho de calzada de 7.6 m para dos carriles. Es importante resaltar que los ejemplos citados anteriormente se encuentran en zonas de amenaza sísmica intermedia. El sistema de voladizos sucesivos también se ha implementado en construcción de puentes en zonas de amenaza sísmica alta, el corredor Bogotá-Buenaventura y la doble calzada Buga-Buenaventura cuentan con un número considerable de puentes construidos mediante voladizos sucesivos. A nivel urbano también se tienen ejemplos representativos como ser el viaducto la unión, construido en la ciudad de Bucaramanga, el cual se presentó como una alternativa de solución al problema de movilidad que presentaba la ciudad en la autopista que comunica los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, municipios que hacen parte del área metropolitana de Bucaramanga.

El corredor vial entre los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, en 1970 pasó de una vía trazada sobre las laderas de la meseta de Bucaramanga a una autopista gracias a la construcción del viaducto García Cadena. En 1994

¹ arlen.zapata@udea.edu.co

² alvija@uis.edu.co

³ carlos.riveros@udea.edu.co

se amplía el viaducto García Cadena, pasando de 4 carriles a 6 carriles, y en 1995 se construye el viaducto la Flora en una vía alterna, obras que se concibieron con el fin de descongestionar el tráfico que para la época generaba congestión en el viaducto García Cadena. Para el año 2013 el viaducto García Cadena colapsaba nuevamente en términos de flujo vehicular. El perfil vial correspondiente a la zona del viaducto García Cadena en el año 2015 se ilustra en la Figura 1.



Figura 20. Perfil vial del viaducto García Cadena en 2015 [3]

En el área metropolitana de Bucaramanga, el número de vehículos (autos, buses y camiones) pasó de 72,000 en el año 2009 a 129,167 en el año 2013 [3]. Esta situación obligó al gobierno de turno a buscar soluciones, como resultado se planteó la construcción de un nuevo puente de cinco carriles localizado en forma paralela al costado oriental del viaducto García Cadena. La Figura 2 muestra el viaducto la unión.



Figura 2. Perfil vial del viaducto la unión en 2016 [3]

En la Figura 2, se puede apreciar que en el 2016 el viaducto la unión ya presentaba congestión vehicular por ser una estructura fundamental en temas de movilidad, por este motivo, fue necesaria la implementación de medidas adicionales como el pico y placa, gestión de la demanda, entre otras medidas, todo esto con el propósito de evitar alta congestión vehicular en el viaducto la unión [3]. Adicionalmente, el nido sísmico de Bucaramanga es una de las zonas de sismicidad intermedia más activas a nivel mundial junto con los nidos de Vrancea en Rumania, e Hindo Kush en Afganistán [4]. Estos dos aspectos hacen que el viaducto la unión deba ser considerado como una estructura de gran importancia. Adicionalmente, al poseer un tablero con cinco carriles genera un mayor valor de masa inercial a nivel de superestructura en comparación con otros puentes construidos también mediante voladizos sucesivos que presentan mayor longitud o altura. El viaducto García Cadena se soporta sobre 7 pares de columnas lo cual resulta en un alto grado de redundancia en comparación con el viaducto la unión que solo cuenta con 2 pares de columnas. Esta situación resalta aún más la importancia de tener una adecuada caracterización de la respuesta inelástica de las columnas del viaducto la unión, especialmente en la eventualidad que se presente un sismo cercano o igual al sismo de diseño.

En la Figura 3 se puede apreciar los dos pares de columnas del puente central del viaducto la unión durante la construcción de las primeras dovelas. Se puede también apreciar las viviendas que existían en el momento de construcción del viaducto la unión. Se puede de igual forma ver la formaleta utilizada para la construcción del sistema cajón de tres compartimentos.



Figura 4. Construcción dovela centro de luz viaducto la unión [5]

La Figura 4 muestra el puente central del viaducto la unión en el momento que se realizaban labores de construcción de la dovela de conexión en el centro de la luz, se pueden ver el par de columnas del sector norte, también es posible realizar un comparativo entre las columnas del viaducto García Cadena y las columnas del viaducto la unión.



Figura 4. Construcción dovela centro de luz viaducto la unión [5]

Este capítulo presenta la evaluación de respuesta inelástica de las columnas del puente segmental central del viaducto la unión utilizando un análisis no lineal estático adaptativo. Se presenta un análisis comparativo con los parámetros considerados en el diseño del puente segmental con el propósito de determinar el nivel de ductilidad de las columnas utilizando un modelo que incluye todos los componentes del puente y que además permite realizar comparaciones entre el cortante basal inelástico y elástico.

2. VIADUCTO LA UNIÓN

2.1 Aspectos funcionales y geométricos

Con base en lo anteriormente expuesto, es bastante evidente que las justificaciones desde el punto de vista de movilidad eran suficientes para realizar un estudio de alternativas para la construcción de una nueva infraestructura, es importante resaltar que el viaducto García Cadena, para el año 2013 ya contaba con una ampliación a 6 carriles efectuada en el año 1994, y al ser una estructura construida en 1970, la opción más viable era la construcción de un puente independiente y paralelo al viaducto García Cadena. Un aspecto importante es que la depresión que salva el viaducto García Cadena para el año 1970, era una zona despoblada por donde pasaba la quebrada la iglesia, y por lo tanto fue posible la construcción de los 7 pares de columnas. En el año 2013 la situación era muy diferente, con la quebrada la iglesia canalizada y una alta densidad de edificaciones era necesario un puente que afectara lo mínimo posible las viviendas existentes. Los puentes construidos mediante voladizos sucesivos representan una alternativa muy favorable que requiere de pocos apoyos, y que se había venido utilizando activamente en Colombia para esa época por lo que la opción constructiva seleccionada para el megaproyecto fue hacerlo por voladizos sucesivos y con acceso norte y sur en estructura convencional, los voladizos sucesivos se implementaron con el objetivo de disponer del menor número de apoyos. En la Figura 5 se ilustra la sección longitudinal del viaducto la unión.

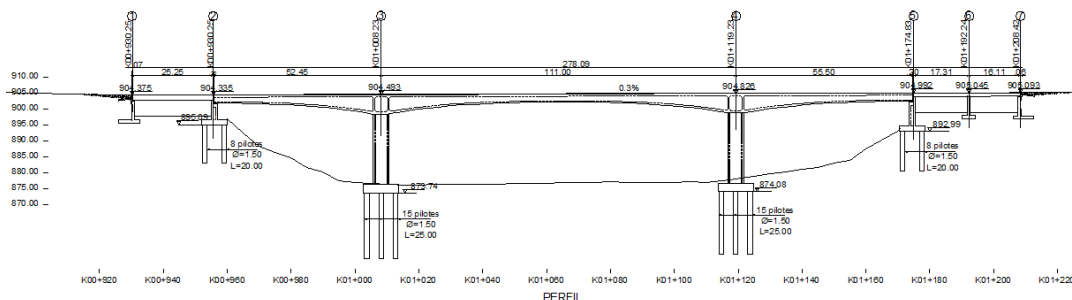


Figura 5. Sección longitudinal viaducto la unión (Gobernación de Santander)

El acceso norte (eje 1) corresponde a un puente de viga cajón postensada, vinculada a un tablero de concreto reforzado de 25 m de luz. El puente central construido mediante voladizos sucesivos se compone de 3 tramos comprendidos entre los ejes del 2 al 5, con un ancho constante de 22.50 m, además, la longitud total de los 3 tramos es de 218.95 m, que se distribuyen en un voladizo inicial de 52.45 m entre los ejes 2 y 3, un tramo central principal de 111 m entre los ejes 3 y 4, y un voladizo final de 55.5 m entre los ejes 4 y 5, estos tramos están conformados por vigas cajón de 3 compartimientos presforzadas con altura que varía de 6 m en zonas de apoyo con columnas y 2.50 m en la zona central, tal y como se muestra en la Figura 6. Finalmente, el acceso sur (eje 7) corresponde a una losa aligerada de concreto reforzado, con dos luces de 19 m y 22 m, con el objetivo de manejar los gálibos del tráfico que accede al puente por el costado sur.

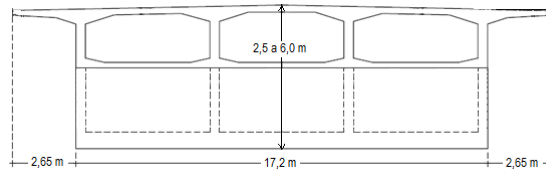


Figura 6. Sección transversal puente central viaducto la unión (Gobernación de Santander)

La superestructura del puente central se apoya en dos pares de columnas como se ilustra en la Figura 5. La geometría seleccionada para las columnas corresponde a prismática rectangular hueca con una sección transversal externa de 6 m x 5 m, y una sección transversal interna de 5 m x 4 m, provistas de un espesor constante de pared de 0.50 m. El par de columnas que conforman los dos apoyos del puente central se encuentran separadas a una distancia centro a centro de 11.2 m, con una altura libre de 22 m. El sistema de cimentación corresponde a un dado rectangular de 20 m x 11 m, unido a un conjunto de 15 pilotes de 1.50 m de diámetro y longitudes de 20 m y 25 m.

2.2 Consideraciones de diseño generales

El Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995 (CCDSP-95) [6] fue utilizado como normativa en el diseño del viaducto la unión. Una resistencia de 28 MPa fue especificada para el concreto de columnas, dados y pilotes. Para los elementos de la superestructura se seleccionó una resistencia para el concreto de 35 MPa. El refuerzo tipo *rebar* se especificó con un esfuerzo de fluencia de 420 MPa y para el refuerzo tensionado se especificaron torones de diámetro 5/8" -grado 270 (fpu=1890 MPa). El camión de diseño corresponde al C40-95. De acuerdo al estudio de zonificación sísmico geotécnico indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, para el puente se recomienda un espectro de diseño correspondiente a la zona 2 del área metropolitana, el cual presenta aceleraciones superiores a las recomendadas por el código de puente CCDSP-95 [6] para Bucaramanga. Se clasifica como zona de amenaza sísmica alta con un valor de $A_a = 0.25$ y coeficiente de sitio de 1.2 según el CCDSP-95 [6].

2.3 Consideraciones de diseño de columnas

En la etapa de diseño se emplearon métodos elásticos en la determinación del refuerzo de columnas. El coeficiente de disipación de energía (R) asumido en el diseño de las columnas se tomó como $R=1$. La Figura 7 muestra la configuración geométrica del par de columnas del eje 4.

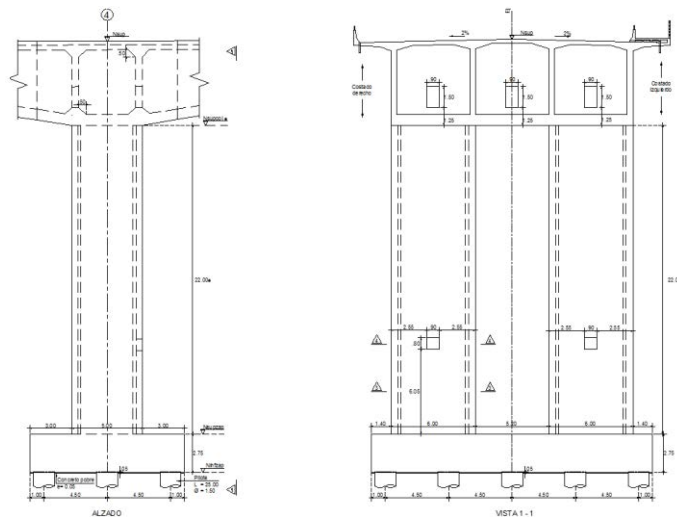


Figura 7. Par de columnas eje 4 puente central viaducto la unión (Gobernación de Santander)

Si bien el viaducto la unión se diseñó de acuerdo a las especificaciones del CCDSP-95 [6]. La entrada en vigencia, con posterioridad al diseño de viaducto la unión, del Código Colombiano de Puentes CCP-14 [7] modificó el concepto adoptado para respuesta inelástica de columnas según el apartado 3.10.9.4.3e, donde se especifica que el uso de un valor bajo del coeficiente de disipación de energía (R), en la determinación de fuerzas de diseño reducidas, resulta en una pequeña reserva de respuesta inelástica columnas cuando estas se someten a la acción del sismo de diseño.

3. ANÁLISIS INELÁSTICO

3.1 Análisis no lineales estáticos convencionales

En las últimas décadas se han venido desarrollando nuevos enfoques numéricos que permiten aproximar de una mejor forma la respuesta dinámica de estructuras. Teniendo de presente, que aproximadamente el 87% de la

población colombiana se encuentra ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, cobra especial importancia la posible afectación sísmica que pueden llegar a sufrir las diferentes obras de infraestructura en Colombia, y por consiguiente la adecuada predicción de la respuesta inelástica es de vital importancia [8-11]. Si bien el viaducto la unión se diseñó de acuerdo a las especificaciones del CCDSP-95 [6]. La entrada en vigencia, con posterioridad, del Código Colombiano de Puentes CCP-14 [7], resalta la importancia de realizar procesos de verificación de respuesta de puentes mediante metodologías no convencionales que permitan evaluar la respuesta inelástica de puentes.

Los métodos no lineales elásticos han sido utilizados principalmente en edificaciones utilizando una secuencia de cargas horizontales incrementales que permiten obtener la curva esfuerzo desplazamiento de una estructura. Un análisis no lineal estático convencional es un proceso iterativo e incremental mediante el cual se pretende solucionar la ecuación de equilibrio de un sistema equivalente. Este tipo de análisis corresponde a una metodología simple y eficiente para estudiar la capacidad, resistencia y deformación, de una estructura bajo el efecto de una distribución de cargas laterales. Este análisis se realiza sometiendo la estructura a un patrón de cargas laterales que se incrementan de una manera progresiva con el objetivo de llevar la estructura a su estado límite de resistencia considerando la respuesta no lineal de sus componentes.

Utilizando este procedimiento, es posible identificar la secuencia del agrietamiento, fluencia y mecanismo de falla de los elementos estructurales, los estados límites de servicio como su máxima deformación admisible, así como su capacidad de cortante, al final de cada paso iterativo se obtiene el desplazamiento global y el cortante basal para posteriormente representarlos mediante una curva de capacidad de la estructura. El patrón de carga se mantiene constante y se determina de acuerdo al aporte en masa de cada uno de los entrepisos de una edificación siguiendo como referencia el primer modo de vibración. Considerando que una edificación permite simplificar el análisis de masa por estar concentrada a nivel de entrepisos, no es el caso de puentes por ser estructuras no uniformes y con procedimientos constructivos variados que no permiten asumir en su análisis esta consideración.

Existen diferentes procedimientos de análisis no lineal estático, incluso algunos procedimientos que permiten determinar el punto de desempeño; su fundamento radica en considerar que el periodo fundamental de vibración es el modo predominante en una estructura. Otra limitante radica en que estas metodologías mantienen un patrón de cargas horizontales constante sin considerar su afectación por el cambio de la rigidez de la estructura que se da por daño de elementos estructurales a medida que se aplica el patrón de cargas horizontales preestablecido [8].

3.2 Análisis no lineales estáticos adaptativos

Este tipo de análisis se considera más apropiado para puentes por cuanto el patrón de cargas laterales se actualiza a medida que avanza el análisis en contraste con los métodos convencionales que se mantiene con valores constantes de fuerzas, la actualización se basa en considerar cambios en formas modales y factores de participación modal obtenidos de un análisis de valores y vectores propios efectuado para cada incremento de carga. Este método se considera como un enfoque que incluye múltiples modos, que considera la disminución de la rigidez de la estructura, la modificación de su período fundamental y la modificación de las fuerzas inerciales [8]. Por otro lado, los análisis no lineales estáticos convencionales mantienen un patrón de carga constante llevando la estructura al colapso con patrones de cargas adaptados a una forma modal que dista de la forma modal modificada que se tiene justo antes de que se presente el colapso de la estructura.

Los puentes son estructuras con baja redundancia, y en el caso de puentes construidos mediante voladizos sucesivos existe una alta concentración de esfuerzos en la conexión de columnas con las primeras dovelas, por tal motivo en el presente trabajo se implementa un análisis no lineal estático adaptativo para evaluar la respuesta inelástica de las columnas. El análisis no lineal estático adaptativo combinado con una caracterización dinámica apropiada de un puente, como modelos constitutivos de los materiales, brinda una metodología muy apropiada para calcular una respuesta más aproximada a la real de sistemas estructurales ante cargas de gran magnitud [8]. Aunque este tipo de análisis contiene un avance significativo con respecto a los análisis tradicionales contemplados en las normas CCDSP-95 [6] y CCP-14 [7], esta metodología contiene algunas deficiencias relacionadas con el cambio de las propiedades modales de la estructura por fluencia y agrietamiento de elementos estructurales generando una redistribución de fuerzas inerciales, lo cual puede aumentar la participación de modos superiores.

Teniendo de presente que el coeficiente de disipación de energía asumido en el diseño de las columnas del viaducto la unión corresponde a $R=1$, es importante resaltar que el procedimiento de diseño empleado corresponde a un análisis elástico de las secciones de las columnas con una baja ductilidad de las columnas, es decir se asume un comportamiento de baja ductilidad de las columnas en su diseño. El uso de un análisis no lineal estático adaptativo en este trabajo elimina en parte, posibles errores que se puedan presentar por falta de ajuste del patrón de cargas horizontales, para de esta forma evaluar la respuesta inelástica considerando respuesta no lineal de los materiales que componen las columnas, considerando también un modelo de todo el puente para de esta forma verificar el cortante sísmico en la base obtenido del diseño con el cortante sísmico en la base obtenido mediante un análisis no

lineal. En la siguiente sección se presentan las consideraciones de modelado del puente para los diferentes elementos que componen el puente haciendo énfasis en que el objetivo principal del presente estudio es determinar la respuesta inelástica de las columnas.

4. MODELADO DEL VIADUCTO LA UNIÓN

4.1 Elementos de la superestructura

El software utilizado en el modelado del puente es SeismoStruct [12]. Debido a que la superestructura permanece en el rango elástico durante la aplicación de las cargas incrementales, los elementos se modelan como elementos tipo elástico lineal gracias a un modelo elástico simplificado con comportamiento simétrico en tracción y compresión. Las propiedades geométricas y el peso de las dovelas se obtienen de las memorias de cálculo proporcionadas por la Gobernación de Santander. Los pesos de la carpeta asfáltica y parapetos se adicionan al peso de las dovelas para de esta forma determinar el peso de la superestructura. Las conexiones de la superestructura con las columnas se modelan con elementos de alta rigidez torsional para asegurar que estos nuevos elementos tengan tan elevada rigidez torsional que su comportamiento individual no influya en la respuesta real de las columnas del puente.

4.2 Columnas

El software SeismoStruct [12] considera modelos no lineales de plasticidad distribuida con lo cual será posible obtener la localización de las rotulaciones en las columnas del puente. Este aspecto es bastante importante por cuanto los modelos de plasticidad concentrada requieren de información de localización de las rótulas plásticas [13]. Las columnas del puente que se modelan usando modelos de plasticidad distribuida se utiliza un modelo de fibras de las columnas compuesto de 500 secciones. Para modelar el concreto reforzado se selecciona un modelo uniaxial no lineal de confinamiento constante que sigue la relación constitutiva propuesta por Mander et al. [14]. Los efectos de confinamiento provistos por la armadura transversal son incorporados mediante las leyes propuestas Mander et al. [14], en las cuales se asume una presión de confinamiento constante a lo largo de todo el rango de esfuerzos-deformaciones. Para el acero de refuerzo tipo *rebar* se selecciona un modelo uniaxial, el cual es capaz de describir el pandeo post-elástico de las varillas de refuerzo tipo *rebar* sujetas a compresión. Se seleccionan reglas de endurecimiento isotrópico y las reglas de pandeo propuestas por los investigadores Monti and Nuti [15].

4.3 Análisis de cargas

Para calcular la carga vertical que actúa sobre cada una de las columnas de los ejes 3 y 4, se utilizó la memoria de diseño facilitada por la Gobernación de Santander. Adicionalmente se consideró el peso de andenes, bordillos, barreras de tráfico, barreras peatonales, y carpeta asfáltica. Las cargas de la superestructura se aplican en forma de cargas distribuidas sobre los elementos lineales y la carga de las columnas se determina en forma automática por el software SeismoStruct [12] con base en los parámetros de los modelos no lineales mencionados. La Figura 8 muestra el modelo ensamblado en el software SeismoStruct [12]. Los parámetros dinámicos del puente central del viaducto La Unión se obtienen de un análisis preliminar utilizando modelos numéricos lineales propuestos por [16] que fueron adelantados para el viaducto la unión por [17].

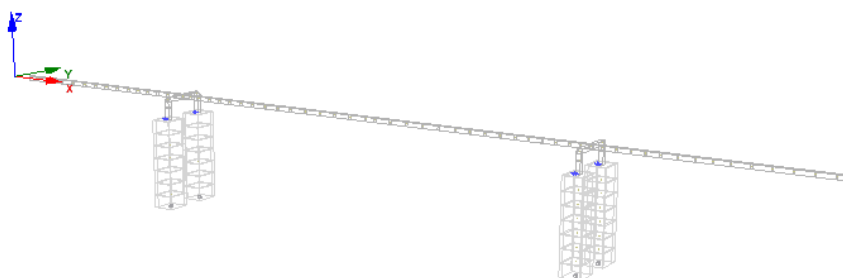


Figura 8. Modelo 3D puente central del viaducto la unión (columnas con tamaño aumentado).

5. RESULTADOS

5.1 Curvas de capacidad

Para la obtención de las curvas de capacidad se realiza un análisis por cada dirección, a saber, longitudinal y transversal. Los niveles de daño para el acero de refuerzo tipo *rebar* se definen como fluencia y rotura con valores de 0.0021 y 0.075, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, al tener un modelo de plasticidad distribuida para el análisis inelástico de columnas, las rotulaciones plásticas no se generan en posiciones fijas definidas por el usuario, sino que estas rotulaciones plásticas se generarán donde los valores de esfuerzos y deformaciones superen los niveles de daño anteriormente definidos para el acero de refuerzo tipo *rebar*. El peso de la estructura se determina

con base en las memorias de diseño proporcionadas por la Gobernación de Santander considerando todos los elementos que aportan en carga muerta, no se considera aporte en masa de la carga viva, aunque este debería ser considerado dado el alto flujo vehicular que se presenta en el puente, y que en caso de presentarse una eventualidad sísmica lo más seguro es que el puente tenga un número considerable de vehículos circulando. El peso total del puente incluyendo todos los elementos de la superestructura es 136,964.87 kN. A continuación, se presentan las curvas de capacidad para el puente en los sentidos longitudinal y transversal.

5.1.1 Sentido longitudinal

El modelado del puente se realiza en dirección longitudinal, que para efectos del modelo corresponde al eje x según la Figura 8. Para el modelo no lineal del puente no se considera el efecto asociado a los neoprenos localizados en los apoyos de los ejes 2 y 5, esto con el fin de determinar la ductilidad efectiva de las columnas. Como se mencionó anteriormente, el procedimiento no lineal estático adaptativo realiza el ajuste del patrón de cargas aplicado a nivel superior de las columnas para de esta forma determinar la curva de capacidad del puente en el sentido longitudinal según se ilustra en la Figura 9.

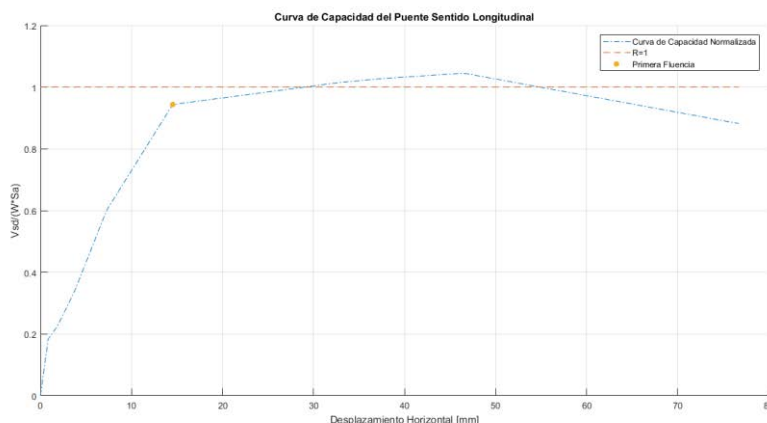


Figura 9. Curva de capacidad sentido longitudinal

El eje vertical relaciona el cortante sísmico en la base (V_{sd}), calculado mediante el análisis inelástico, valor que es dividido por el producto del peso del puente (W) por el valor de la aceleración espectral (S_a), obtenida del espectro elástico de diseño. Es posible apreciar que el comportamiento del puente en el sentido longitudinal, cumple con los requerimientos de diseño asociados a un coeficiente de disipación de energía con un valor de $R=1$. La primera fluencia se presenta para un desplazamiento horizontal de 14.53 mm, cuando la columna alcanza un valor de desplazamiento horizontal de 32.71 mm se alcanza el valor del coeficiente de disipación de energía considerado en el diseño. Las columnas cuentan con una mínima reserva de ductilidad que les permite alcanzar un desplazamiento horizontal de 46.5 mm, valor que equivale al 2.11% de deriva.

5.1.2 Sentido transversal

El modelado del puente se realiza también en dirección transversal que para efectos del modelo corresponde al eje y según la Figura 8. Utilizando el mismo procedimiento del sentido longitudinal se determina la curva de capacidad en el sentido transversal del puente según se ilustra en la Figura 10.

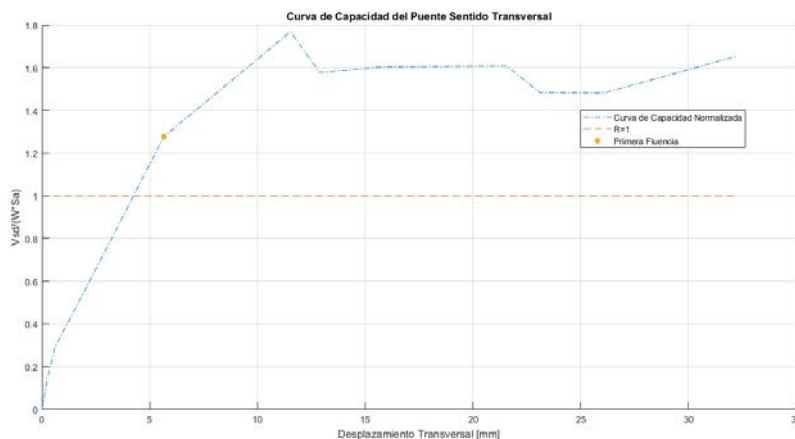


Figura 10. Curva de capacidad sentido transversal

En el sentido transversal se puede apreciar que las columnas tienen una mayor ductilidad a la estimada en el diseño lo que equivale a un coeficiente de disipación de energía con un valor de $R=1.77$. Valor que se encuentra por encima del valor de $R=1.5$, valor recomendado por el CCP-14. La primera fluencia se presenta para un valor de desplazamiento transversal de 5.66 mm con un valor de $R=1.28$. En el sentido transversal las columnas alcanzan un máximo de desplazamiento transversal de 32.25 mm, equivalente a una deriva de 1.47%. Las Figuras 11 y 12 muestran el primer estado de fluencia en color rosado y el primer estado de rotura en color rojo, tanto para el sentido longitudinal como para el sentido transversal, respectivamente. El estado de rotura es correspondiente al colapso de la estructura por rotura del refuerzo de las columnas. Es posible apreciar que las rotulaciones iniciales se generan a nivel de base de columnas y que la rotura se presenta de igual forma a este nivel.

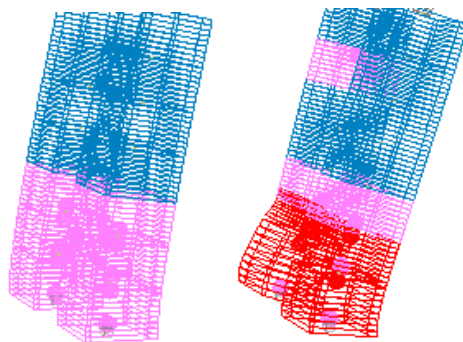


Figura 11. Primer estado de fluencia y primer estado de rotura sentido longitudinal

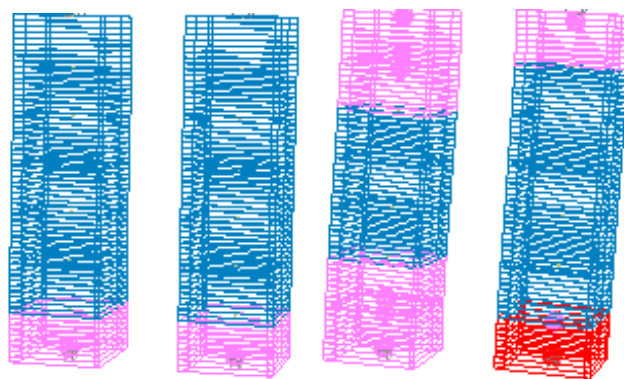


Figura 12. Primer estado de fluencia y primer estado de rotura sentido transversal

Si bien el CCP-14 especifica un valor de $R=1.5$ en el diseño de columnas para el tipo de puente presentado en este capítulo, es importante resaltar que según las especificaciones de diseño del puente se consideró para el viaducto la unión un valor de $R=1$ en el diseño de las columnas. Los resultados del análisis inelástico muestran que en el sentido longitudinal se supera levemente el valor de $R=1$ cuando se comparan el cortante sísmico en la base, obtenido mediante el análisis inelástico y el cortante sísmico en la base, definido para el diseño del puente. En el sentido transversal se logra un valor máximo de $R=1.77$. El modelado inelástico considera la respuesta inelástica de los materiales, también es de relevancia que en el diseño convencional se usan valores de fuerzas sísmicas considerando aplicación del sismo del 100% en una dirección y el 30% en la dirección ortogonal, con lo cual se tiene un valor de resistencia adicional.

5.2 Respuesta inelástica del material

Un aspecto importante tiene que ver con los procedimientos de diseño de elementos de concreto reforzado, estos procedimientos se fundamentan en el uso de factores de seguridad, que para el caso de efectos de cargas se definen como coeficientes de mayoración de cargas, y en el caso de determinación de resistencia se definen como coeficientes de reducción de resistencia, el fundamento radica en proporcionar márgenes de seguridad en la determinación de la resistencia de un elemento bajo el efecto de cargas, son procedimientos que aproximan la resistencia de un elemento de concreto reforzado sin considerar el cálculo detallado de la respuesta inelástica del acero de refuerzo. Un diseño adecuado a flexión se fundamenta en la posición del eje neutro, que para efectos de garantizar en forma segura la falla por fluencia del acero, se permite que el acero de refuerzo alcance un valor de deformación unitaria de 0.005, lo que equivale a tener ubicado el eje neutro a una distancia equivalente al 37.5% de la altura efectiva del elemento, esta posición se mide desde la fibra extrema a compresión del concreto hasta el centroide del refuerzo a tensión.

En la definición del punto de fluencia del acero de refuerzo tipo *rebar*, se tiene que este valor se obtiene de dividir el valor del esfuerzo de fluencia entre el valor del módulo de elasticidad del acero que para efectos de diseño tiene un valor de 200 GPa, si el esfuerzo de fluencia equivale a 420 MPa se tiene un valor de deformación unitaria para fluencia

de 0.0021. Este valor no considera márgenes de seguridad, por lo tanto, el valor especificado de diseño es 0.005 para de esta forma garantizar fluencia del acero antes de falla por compresión del concreto, lo que equivale a una falla subreforzada. Los puntos de fluencia ilustrados en las Figuras 9 y 10 se determinan para los valores de carga lateral que generan una deformación unitaria de 0.0021. Con base en este valor de deformación unitaria se realiza la verificación de respuesta del material analizando el nivel de deformaciones unitarias axiales que se presentan en el elemento de la columna donde se genera la primera fluencia. Las Figuras 13 y 14 ilustran el estado de esfuerzos en el refuerzo tipo *rebar* de los elementos críticos de las columnas con base en la relación del cortante sísmico en la base al calculado mediante el análisis inelástico y el cortante sísmico en la base de diseño.

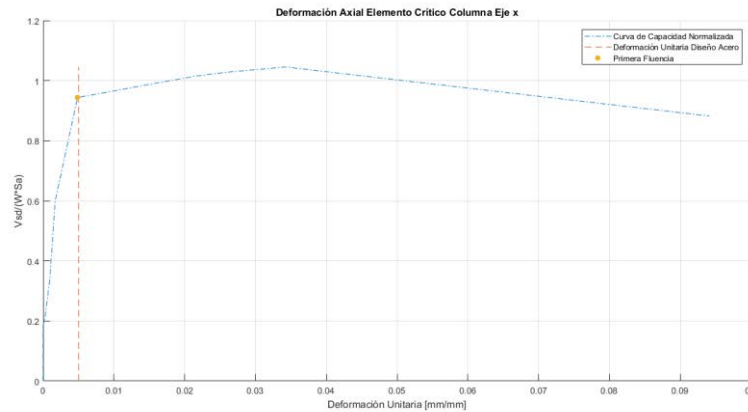


Figura 13. Curva de Capacidad normalizada vs Deformación axial elemento crítico columna dirección x

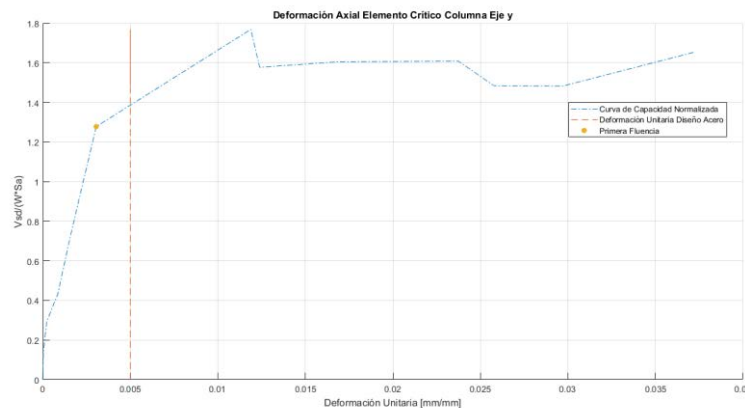


Figura 14. Curva de Capacidad normalizada vs Deformación axial elemento crítico columna dirección y

El valor recomendado de diseño para la deformación unitaria del acero de refuerzo, que corresponde a 0.005, se ajusta adecuadamente al valor donde el modelo no lineal presenta la primera fluencia para la dirección *x*, que corresponde a la dirección longitudinal del puente. En el caso de análisis en el eje transversal, que corresponde al eje *y*, presenta la primera fluencia antes del valor de 0.005, lo que demuestra que la respuesta de las columnas en la dirección transversal presenta mayor ductilidad ya que el valor de deformación unitaria de 0.005 se encuentra para un mayor valor de carga lateral. Es importante notar que los diseños efectuados utilizando el concepto de cuantía balanceada, donde se asume condición de falla segura con un valor de cuantía del 75% de la cuantía balanceada, esto equivale a un valor de deformación unitaria para el acero de refuerzo de 0.0041.

El procedimiento de diseño que se basa en el 75% de la cuantía balanceada no considera variación del coeficiente de reducción de resistencia, por el contrario, el procedimiento de controlar la falla segura, con una deformación unitaria del acero de refuerzo de 0.005, sí permite variación en el coeficiente de reducción de resistencia para valores de deformaciones unitarias del acero de refuerzo entre 0.0021 y 0.005. Finalmente, para efectos de modelado del concreto se tiene un valor máximo de deformación unitaria en la fibra extrema a compresión de 0.003, valor proporcionado por los códigos de diseño, este aspecto puede también influir en el cálculo de la primera fluencia, esto porque este valor puede en algunos casos ser diferente.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de un análisis no lineal estático adaptativo de un puente viga cajón construido mediante voladizos sucesivos. El puente seleccionado para el presente estudio corresponde al puente central del viaducto la unión, este puente presenta características especiales como ser el considerable ancho del tablero de la superestructura con cinco carriles, ubicación en una zona de amenaza sísmica alta, y una alta importancia en el tema de movilidad del área metropolitana de Bucaramanga. El efecto de tener un tablero de ancho considerable

hace que la masa que participa en efectos inerciales sea considerable, este aspecto es más relevante cuando se considera en conjunto con el nivel de amenaza sísmica de la zona donde se localiza el puente. El modelo no lineal se ensambla utilizando información del diseño proporcionada por la Gobernación de Santander, información que se complementa con un análisis modal elástico del puente adelantado en la Universidad Industrial de Santander [17]. El modelo no lineal utiliza plasticidad distribuida, lo cual permite tener una mayor aproximación al real comportamiento inelástico de las columnas del puente en lo relacionado a generación de rótulas plásticas. Para modelar un comportamiento más aproximado al real, se considera un modelo de todo el puente incluyendo los elementos que conforman la superestructura del puente. El modelo no lineal presentado en este capítulo utiliza un procedimiento adaptativo que permite variar el patrón de cargas laterales a medida que se degrada la rigidez de las columnas, este procedimiento presenta ventajas de modelado especialmente en puentes, en comparación con procedimientos no lineales estáticos convencionales donde el patrón de cargas laterales se mantiene constante.

El análisis de resultados de respuesta global del puente con base en la obtención de la curva de capacidad de toda la estructura, permite determinar que el puente responde adecuadamente en el sentido longitudinal con valores de ductilidad muy cercanos a los asumidos en el diseño, según los resultados del análisis inelástico el coeficiente de disipación de energía calculado mediante análisis no lineal concuerda con el valor considerado en el diseño. En el sentido transversal, el análisis de la información proporcionada por la curva de capacidad permite asegurar que el puente responde con un valor de ductilidad superior al considerado del diseño, este aspecto es de especial importancia porque el valor determinado mediante el análisis no lineal estático adaptativo se aproxima al valor recomendado por el CCP-14 [7]. Finalmente, el análisis de resultados, a nivel de respuesta del material, presenta las mismas tendencias que se obtienen de la respuesta global del puente obtenida mediante las curvas de capacidad, fue posible verificar que se cumplen las condiciones de diseño actuales de controlar la deformación unitaria del acero de refuerzo mediante la posición del eje neutro con una deformación unitaria del acero de refuerzo de 0.005.

El presente estudio demuestra la importancia que tienen los análisis no lineales en la verificación de los diseños convencionales realizados con base a modelos elásticos, este tipo de estudios permite una revisión más detallada a nivel de material de la respuesta asumida en la etapa de diseño de puentes, esto con el fin de detectar posibles inconsistencias que se puedan haber presentado en la etapa de diseño. La norma vigente de diseño recomienda el uso de metodologías de verificación de respuesta mediante metodologías no convencionales, si bien los procedimientos de diseño especificados en esta norma se basan en fuerzas, es importante el uso de métodos basados en desplazamientos con el fin de evaluar de forma más adecuada los mecanismos de daño que se presentan en estructuras ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. Otro aspecto importante es el uso del coeficiente de disipación de energía para determinar el grado de ductilidad de una estructura con base en metodologías como la presentada en este trabajo, que permita la determinación numérica de este importante parámetro. Numerosas investigaciones soportan la necesidad de incorporar métodos basados en desplazamientos en el análisis sísmico de puentes [18-20].

Finalmente, es importante resaltar que el procedimiento de verificación propuesto en el presente trabajo se enfoca en determinar el nivel de ductilidad de columnas, las cuales corresponden a elementos fundamentales que garantizan la estabilidad de un puente. Para analizar respuesta no lineal de elementos de la superestructura se requiere incluir efectos del refuerzo de tensionado. Adicionalmente, para un análisis de respuesta más detallado se debe considerar la interacción suelo estructura, en especial para un análisis cronológico no lineal donde este aspecto cobra especial importancia en la determinación de los niveles de desempeño de un puente.

Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo brindado por la Universidad de Antioquia gracias al financiamiento otorgado por el CODI en el marco de la convocatoria fondo de apoyo trabajos de grado 2019-1 con el trabajo de grado titulado: *respuesta inelástica de las columnas de un puente segmental utilizando análisis dinámico no-lineal incremental (IDA)*. Los autores expresan sus profundos agradecimientos a la Gobernación de Santander por facilitar la información de diseño del viaducto la unión que sirvió de base para la realización del presente capítulo. Finalmente, los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción INME perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS

- [1] M. Salgado, G. Bernal, G., O. Cardona. "Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 32, no. 4, p. 230-239, 2016.
- [2] R. Valle, N.F Carvajal, J.C Botero "Evolución de los parámetros geométricos de diseño en puentes construidos con voladizos sucesivos in situ". *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, no. 1, p. 85-100, 2016.
- [3] J. Jiménez, M. Salas. "Aplicación de modelos econométricos para estimar la aceptabilidad de una tasa por congestión vehicular", *Inge CUC*, vol. 18, no. 2, p. 60-78, 2017.
- [4] F. Sepúlveda, F Cabrera. "Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia)", *Boletín de Geología UIS*, vol. 40, no. 2, p. 15-33, 2018.

- [5] Vanguardia [Online]. Disponible: <https://www.vanguardia.com>. [Acceso: mayo 12, 2019].
- [6] AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Norma Colombiana de Diseño de Puentes (1995). Bogotá D.C
- [7] AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Norma colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. (2014). Bogotá D.C
- [8] N. Cruz, J. López. Análisis estático no-lineal en puentes de concreto reforzado con apoyos intermedios de gran altura. Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia, Monografía Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, 2017.
- [9] A. Muntasir, M. Alam. "Seismic performance evaluation of multi-column bridge bents retrofitted with different alternatives using incremental dynamic analysis", *Engineering Structures*, vol. 62, no. 15, p. 105-117, 2014.
- [10] K. Fouad, R. Mustapha, K. Abderrahmane. Seismic Assessment of Algerian Bridge. National Center of Applied Research in Earthquake Engineering CGS, 2017.
- [11] Y. Pang, L. Cai, H. Ouyang, K. Zhou. "Seismic performance assessment of different fibers reinforced concrete columns using incremental dynamic analysis", *Construction and Building Materials*, vol. 203, no. 10, p. 241-257, 2019.
- [12] Seismosoft. SeismoStruct – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Pavia (PV) - Italy. Retrieved from <http://www.seismosoft.com>.
- [13] M. Priestley, G. Calvi, M. Kowalsky. Displacement-based seismic design of structures. North Carolina State University, 2008.
- [14] J.B. Mander, M. Priestley, R. Park. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, p. 1804-1820, 1988.
- [15] G. Monti, C. Nuti. "Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling", *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, no. 12, p. 3268-3284, 1993.
- [16] A. Viviescas, J. Carrillo, L. Vargas. "Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental", *INGE CUC*, vol. 14, no. 1, p. 52-65, 2018.
- [17] W. Hernández. Caracterización dinámica en fase de construcción de puentes de grandes luces. caso estudio: viaducto la unión. Escuela de ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Trabajo de Grado, 2016.
- [18] S. Gómez. "Diseño directo basado en desplazamientos aplicado a pilas de puentes", *Investigación y Desarrollo*, vol. 4, no. 1, p. 40-62, 2012.
- [19] O. Moroni, M. Sarrazin, C. Benavides, A. Díaz. "Características dinámicas de puentes chilenos con protección sísmica", *ASAE*, vol. 1, no. 2, p. 31-54, 2004.
- [20] N. Serdan, R. Folic. "Vulnerability and optimal probabilistic seismic demand model for curved and skewed RC bridges", *Engineering Structures*, vol. 176, no. 1, 411-425, 2018.

Estudio del comportamiento del amortiguador de masa sintonizada de la torre Taipei 101 en la reducción de vibraciones producidas por terremotos y tifones en 2014

Ramiro E. Franco B.¹

Juan S. Correa A.²

Universidad de San Buenaventura – Colombia

En este trabajo se estudia el comportamiento del Amortiguador de Masa Sintonizada (TMD) de la torre Taipei 101 en Taiwán, en la reducción de vibraciones causadas por terremotos y tifones del año 2014. Inicialmente se lee la información registrada por varios sensores encargados de monitorear el edificio durante 29 terremotos y los tifones Matmo y Fung Wong, los datos se filtran en bandas de tercio de octava y finalmente, a partir de un análisis empleando números complejos se calcula la magnitud de los movimientos tanto del TMD como del edificio y su desfase en grados. El estudio se divide en frecuencias bajas, altas y cercanas a la fundamental, se encuentra que para las altas y bajas normalmente no se presentan cambios significativos cuando el edificio es excitado, mientras que en la frecuencia fundamental normalmente cuando se presentan magnitudes altas hay desfases muy cercanos a los 90° como se expresa en la teoría.

1. INTRODUCCIÓN

El Taipei 101, con 508 metros de altura, es uno de los 10 edificios más altos del mundo. Por su gran altura, la firma de ingeniería estructural tuvo que afrontar los retos de flexibilidad que presenta la estructura por las fuerzas del viento y por terremotos [1], dichos fenómenos no solo generan problemas de seguridad estructural, sino también, incomodidad y/o mareo en las personas que habitan el edificio [2]. Estudios realizados en la estructura demuestran que era necesaria la instalación de un sistema de control de vibraciones estructural que aumentara el factor de amortiguación del edificio [3], entre dichos métodos se encuentran: El control de la frecuencia natural del sistema vibratorio; La introducción de mecanismos de disipación de potencia que impidan la respuesta excesiva de la edificación, ya sea por la elección de materiales en el diseño [4], o por la adición de amortiguación adicional [5]; por el cambio de rigidez y amortiguación entre la estructura y la fuente vibratoria debido a la adición de un aislador del sistema [5], [6]; finalmente, añadiendo una masa adicional al sistema, usualmente llamado Amortiguador de masa Sintonizada (TMD) con el fin de absorber la energía vibratoria de la masa original. Este último se encuentra en edificios de gran altura a nivel mundial como la torre CN (535 m) en Canadá, el edificio John Hancock (60 pisos) en Boston, USA, y fue el elegido para el Taipéi 101.

Los primeros trabajos encontrados sobre el uso de masas auxiliares para la atenuación de vibración en embarcaciones fueron expuestos por H. Frahm en una patente norte americana en 1911 [7]. El primer trabajo extenso encontrado, fue realizado por J. Ormondroyd y Den Hartog [8], quien le añadió amortiguación al TMD para aumentar su efectividad. Otros estudios de sistemas de varios grados de libertad con un sistema de masa auxiliar bajo excitación aleatoria son presentados en [9], [10], [11]. Luego, Ayorinde y Warburton en [12] encuentran los parámetros óptimos de masa, rigidez y amortiguación para un TMD adjunto a un sistema de un grado de libertad tipo viga en voladizo proponiendo la optimización de las razones de masa, amortiguación y frecuencias del sistema y del absorber.

En la actualidad existen empresas que fabrican TMDs para estructuras sobresalientes como chimeneas, antenas, grandes techos, corredores de gran altura y edificaciones [13], que por su gran longitud, baja amortiguación inherente y baja frecuencia natural son propensas a una fácil excitación externa que generan vibraciones de gran magnitud. Se han encontrado usos de TMD pasivos para maquinaria [14], en puentes peatonales para cumplir con los requerimientos de carga dinámica [5], en puentes de trenes para atenuar su vibración por el paso de los mismos [15], [16] y en puentes de suspensión [17]; sin embargo, la mayoría de aplicaciones para control de vibraciones se encuentran en edificaciones de gran altura; según Min-Ho Chey y col [18], los amortiguadores de masa son los sistemas más comunes para reducir las vibraciones inducidas por el viento para edificaciones de gran altura. Ejemplos de diseños de TMDs para grandes edificios a parte de los mencionados anteriormente, se encuentran en un edificio de oficinas en Melbourne [6] y la Sidney Tower en Sidney, Australia [19].

Dentro de los avances de diseño de TMDs, se encuentran los TMD Semi-activos, los cuales pueden variar su rigidez y amortiguación a tiempo real según la respuesta de la estructura [1], así como TMDs con control activo de vibración, los cuales tienen un sistema adicional para excitar el TMD de manera opuesta a la estructura principal [20] [21], lo encontrado en la literatura es el estudio de dichos diseños para la supresión en respuesta de edificaciones al viento, por medio de modelos computacionales y modelos a escala (test de túnel de viento). Por otro lado, pocos estudios se han encontrado en cuanto a la efectividad de estos sistemas en cuanto a las fuerzas sísmicas Varadarajan y Nagarajiah [6] estudian la efectividad de amortiguadores viscosos contra fuerzas sísmicas en la estructura, pero este sistema busca asilar la edificación de la base por medio de la amortiguación. La efectividad sísmica de un TMD en puentes de trenes cargueros es estudiada por Chen, Zhaowei y col [15], encontrando que la

¹ ramiro.franco@usbmed.edu.co

² juansebasacevedo@hotmail.com

adición del TMD en puentes podría afectar la frecuencia natural del mismo a un punto de aumentar las vibraciones de interés en el momento de transito de trenes. Otros modelos de diseño de TMD para la protección sísmica de edificios pueden ser encontrados en [22] y [23], se resalta que la mayoría de estos trabajos provienen de Asia.

El TMD pasivo más grande actualmente construido lo tiene el Taipéi 101 con casi 750 toneladas. La empresa Motioneering Inc. encargada del diseño de este TMD habla de su efectividad sísmica, afirmando que el edificio está listo para resistir terremotos de al menos 350 gals de aceleración. Por otro lado, estudios hechos por XX en [24] y L.C. Chen en [25] estudian propiedades del edificio para eventos reales con instalaciones de sensores en el edificio y por medio de modelos computacionales y modelos a escala, encontrando así su frecuencia natural. Trabajos realizados por A. Tuan y G. Shang en [3] estudian el desempeño del Taipei 101 para mitigar las vibraciones por medio fuerzas generadas por el viento y por terremotos de larga distancia. Las conclusiones generales de estos estudios eran que el TMD era efectivo para contrarrestar las fuerzas del viento, pero no era efectivo para disipar fuerzas sísmicas, contrario a lo que Motioneering Inc. dice.

En este capítulo, nos proponemos a estudiar la efectividad de respuesta del TMD del Taipéi 101 para tifones de viento y para sismos ocurridos en el año 2014 con mediciones reales. Para esto usaremos datos de aceleración medidos con dos sensores (uno ubicado en el centro del TMD y otro ubicado en el edificio en la base de montaje del TMD) y el procesamiento de dichas señales. Usaremos la teoría de vibración de TMDs en edificios como fundamento para procesar las señales de ambos sensores y dictaminar el comportamiento del TMD y del edificio ante tifones y terremotos.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 TMD

Una edificación con un amortiguador de masa sintonizada (TMD por sus siglas en inglés) puede ser representada como un modelo vibratorio de dos grados de libertad como lo indica la Figura 1. m , c y k son respectivamente la masa, amortiguamiento y elasticidad de la estructura, el subíndice d indica los mismos parámetros para el amortiguador. Los desplazamientos de la estructura y el sistema adicional están dados por u y u_d . Las fuerzas externas efectuadas al sistema, ya sea por la acción del viento o sismos, son representadas por P y G respectivamente.

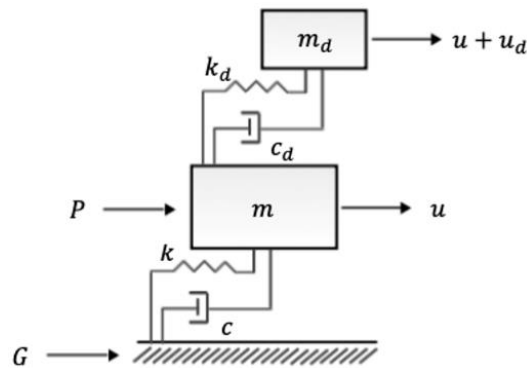


Figura 1. Modelo de un TMD puesto en una estructura la cual puede ser excitada por las fuerzas P y G .

Den Hartog [25] es uno de los primeros en estudiar Los TMD en estructuras sin amortiguamiento, en [26] y [27] aproximan este estudio para estructuras con amortiguamiento, aplicando la segunda ley de Newton en los sistemas m y m_d se llega a las ecuaciones (1) y (2).

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -k_d(u - u_d) - c_d(\dot{u} - \dot{u}_d) + P \quad (1)$$

$$m_d\ddot{u}_d = -k_d(u_d - u) - c_d(\dot{u}_d - \dot{u}) \quad (2)$$

Donde u , \dot{u} , \ddot{u} , u_d , \dot{u}_d , \ddot{u}_d , son respectivamente el desplazamiento, velocidad y aceleración del edificio y del TMD cuando el sistema es excitado por la fuerza P . Introduciendo el coeficiente de masas como $\bar{m} = \frac{m_d}{m}$, las frecuencias naturales de oscilación $\omega^2 = \frac{k}{m}$ y $\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d}$ y los coeficientes de amortiguación $c = 2\xi\omega m$ y $c_d = 2\xi_d\omega_d m_d$ donde ξ y ξ_d son los factores de amortiguamiento, el movimiento de la estructura está dado por la ecuación (3). La ecuación (4) rige el movimiento del TMD.

$$(1 + \bar{m})\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2 u = \frac{P}{m} - \bar{m}\ddot{u}_d \quad (3)$$

$$\ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2 u_d = -\ddot{u} \quad (4)$$

De acuerdo a [26] el amortiguador se mueve fuera de fase con la estructura para que disipe la energía de las vibraciones no deseadas, esto se logra haciendo que las frecuencias naturales de oscilación de ambos sistemas sean iguales $\omega = \omega_d = \Omega$. Si se supone una excitación periódica sobre la estructura $p = P\sin(\alpha t)$, donde α es la frecuencia de la fuerza y P es su amplitud, la respuesta del sistema está dada por las ecuaciones (5) y (6).

$$u = U\sin(\Omega t + \delta_1) \quad (5)$$

$$u_d = U_d\sin(\Omega t + \delta_1 + \delta_2) \quad (6)$$

Donde U y U_d son las amplitudes máximas de la estructura y el amortiguador, δ_1 es la fase de la estructura respecto a la fuerza y δ_2 es la fase del amortiguador con respecto a la estructura. D. Hartog [26] demuestra que las amplitudes máximas de la estructura y el amortiguador, así como los desfases entre estos sistemas, luego de reemplazar las ecuaciones (5) y (6) en las ecuaciones de movimiento (3) y (4), están dados por las ecuaciones (7), (8), (9) y (10).

$$U = \frac{P}{k\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2\xi}{\bar{m}} + \frac{1}{2\xi_d}\right)^2}} \quad (7)$$

$$U_d = \frac{1}{2\xi_d} U \quad (8)$$

$$\tan(\delta_1) = -\left(\frac{2\xi}{\bar{m}} + \frac{1}{2\xi_d}\right) \quad (9)$$

$$\tan(\delta_2) = -\frac{\pi}{2} \quad (10)$$

Estos resultados nos muestran propiedades fundamentales del sistema por medio de parámetros de medida. La ecuación (8) demuestra que la razón efectiva de los máximos desplazamientos entre la edificación y el TMD nos entrega una medida efectiva de la razón de amortiguamiento del TMD. Por otro lado, la ecuación (10) demuestra que, en sus amplitudes máximas de desplazamiento, el TMD está 90° fuera de fase con respecto a la estructura principal, por ende, un sistema de control de vibraciones efectivo debería demostrar el desfase entre la estructura (masa m) y el TMD (masa m_d) cuando ocurren grandes amplitudes en el sistema. La amplitud máxima del sistema con una masa sintonizada auxiliar sin amortiguación ($\xi_d = 0$), está dada por la ecuación (11).

$$U = \frac{P}{k} \left(\frac{1}{2\xi}\right) \quad (11)$$

Al comparar los dos casos con amortiguación y sin amortiguación se puede expresar la ecuación (7) por medio de la ecuación (12) en términos de una amortiguación equivalente del sistema, dando como resultado la ecuación (13).

$$U = \frac{P}{k} \left(\frac{1}{2\xi_e}\right) \quad (12)$$

$$\xi_e = \frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\xi}{\bar{m}} + \frac{1}{2\xi_d}\right)^2} \quad (13)$$

Suponiendo que el edificio no tiene amortiguación ($\xi = 0$) y reemplazando la ecuación (8) en la ecuación (13) se obtiene la ecuación (14).

$$\xi_e = \frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{U_d}{U}\right)^2} \quad (14)$$

La ecuación anterior demuestra que una medida efectiva de la razón de amortiguamiento puede ser realizada midiendo los desplazamientos máximos de la estructura y el amortiguador de masa sintonizada cuando estos están desfasados 90° .

3. MÉTODO

3.1 Taipei 101

La Torre Taipei 101 (Figura 2) se encuentra ubicada en la zona norte de Taiwán, cuenta con 106 pisos (de los cuales 5 son subterráneos), su estructura está compuesta por columnas de acero y hormigón. El edificio se encuentra en una de las zonas donde se presentan más terremotos y huracanes del planeta, ya que debajo de la isla de Taiwán se encuentran las placas filipina y euroasiática. La Torre tiene el TMD más grande del mundo el cual consta de una esfera

de acero (728 toneladas) y 8 amortiguadores que regulan su movimiento, esta cuelga a partir de cables desde el piso 92, el sistema está diseñado para reducir las vibraciones producidas por terremotos y efectos del viento. La torre se encuentra monitoreada constantemente por sensores, por lo cual ha sido el foco de estudio de muchos investigadores en el campo de diseño estructural, geología y sismología en los últimos años. K. C. Chen [28], estudia las grabaciones realizadas por múltiples sensores el 11 de marzo de 2011, bajo el efecto del terremoto Tohoku en Japón, su principal objetivo era estudiar los efectos de terremotos en edificios de gran altura, él encuentra la frecuencia fundamental de la torre que está alrededor de los 0.15 Hz.

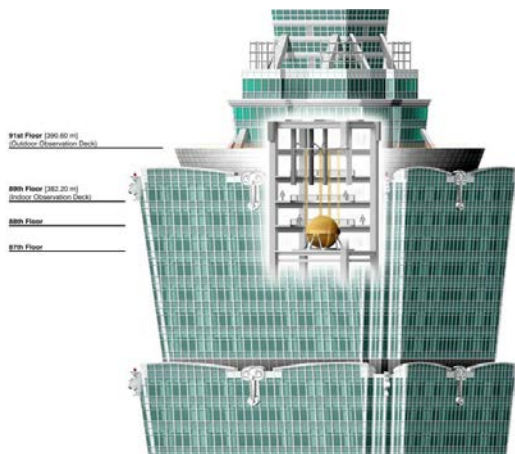


Figura 2. Torre Taipei 101 y su TMD [29]

En 2011 [24], se presentan los resultados de mediciones realizadas con 30 acelerómetros instalados en 6 pisos diferentes de la torre durante la presencia de tres tifones (Matsa, Talim, y Krosa) y un evento sísmico (Wenchuan), ellos encuentran tanto la frecuencia natural como los modos de vibración y los comparan con un modelo de elementos finitos, encontrando que las diferencias entre ambos resultados son alrededor de 8.9 y 15.7%. L. C. Chen [30] explora las características del viento usando un modelo de 1/500 de la torre Taipéi 101, el cual es excitado con por un túnel de viento. Una investigación robusta acerca del TMD de la torre Taipéi [3], estudió los efectos de la mitigación de vibraciones de este bajo la acción de fuerzas del viento y terremotos de larga distancia.

3.2 Red de sismómetros

El Taipei 101 está siendo monitoreado de manera permanente desde el 2011 por el Institute of Earth Science, Academia Sinica, estos nos dan acceso a los datos registrados durante el año 2014 por una red de sismómetros que denominamos TMD, la cual cuenta con tres estaciones de acelerómetros bi-axiales (Figura 3) repartidos en diferentes pisos del edificio, las características principales de estos se presentan en la Tabla 1. La frecuencia de muestreo de los acelerómetros que componen la red es de 20 Hz, y cuenta con una tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6210 (National Instruments). Adicionalmente la red tiene un monitor de viento Young 05103V-M (Figura 3) ubicado en la cúspide del edificio, este mide la dirección del viento (0°-360°) y su magnitud (0-100 m/s).

Tabla 27. Características de la red de sismómetros TMD

Estación	Ubicación	Acelerómetro/Sensibilidad
TMD	En el TMD, piso 89	PCB bi-axial (modelo 3701 G2FA3G)/(1 V/g) Rango: +/- 3g
Edificio	Piso 92	
Cúspide	Cúspide de la Torre	



Figura 3. Estaciones de sismómetros y monitor de viento

Para complementar se tiene información de un sensor tri-axial denominado T1S1 ubicado en el sótano 5 de la torre, este es un Episensor™ con una sensibilidad de 1.02 v/m/s/s y cuenta con un digitalizador Kinematics™. Basalt™, la frecuencia de muestreo también es de 20 Hz como en la red TMD. Lastimosamente el sistema de reloj central de la estación T1S1 no está sincronizado con las estaciones de la red TMD, pero su información es útil para saber que energía espectral llega al edificio.

3.3 Terremotos seleccionados 2014

Para analizar el comportamiento del TMD y el edificio se seleccionan un total de 29 terremotos, en un radio mayor a 3,34 km y menor a 611,5 km de la torre, la magnitud de todos los eventos es mayor a 4,8 Mw, las características de este catálogo se presentan en la Tabla 2. En la Figura 4 en planos de coordenadas polares se muestra la dirección en grados, y la distancia en kilómetros de los terremotos seleccionados respecto a la Torre Taipei 101 (Centro del plano). Un pequeño análisis de esta figura nos indica que todas las ocurrencias de terremotos están direccionadas alrededor de 270 y 180 grados, esto coincide con la división de placas tectónicas que rodean el edificio.

Tabla 2. Características de los terremotos seleccionados

ID	Tiempo (UTC)	Latitud [GD]	Longitud [GD]	Distancia [Km]	Magnitud [MW]
0	03-19 12:19:26	23.987	122.322	139	5.7
1	05-21 00:21:13	23.722	121.469	145	5.6
2	01-08 18:15:11	24.550	123.461	199	5.3
3	07-11 13:11:45	26.312	125.829	450	5.3
4	09-05 07:21:47	25.804	125.542	409	5.2
5	03-03 02:27:31	26.330	127.343	597	5.1
6	02-02 18:51:11	20.203	120.292	550	5.1
7	03-17 13:12:55	23.980	122.435	146	5.1
8	06-18 02:47:10	24.202	125.200	379	5.1
9	02-28 02:28:38	20.205	120.308	550	5.0
10	01-11 18:35:45	25.448	126.548	504	5.0
11	07-07 23:06:05	23.363	122.363	201	5.0
12	09-17 23:18:55	24.836	125.397	387	5.0
13	03-15 20:04:37	22.167	121.449	317	5.0
14	01-06 18:49:40	25.452	122.790	131	5.0
15	03-18 19:24:27	24.853	123.997	246	4.9
16	02-06 11:32:27	24.816	125.362	384	4.9
17	01-28 11:49:11	26.949	127.085	591	4.9
18	02-21 20:25:16	24.684	121.608	38	4.9
19	05-25 12:41:13	23.040	121.255	223	4.9
20	05-30 08:10:36	24.722	123.304	179	4.9
21	08-14 20:22:50	21.632	121.130	379	4.9
22	03-05 19:41:54	20.220	120.414	545	4.8
23	04-10 02:38:05	23.762	123.057	206	4.8
24	09-06 23:33:06	24.016	122.902	176	4.8
25	05-30 03:31:30	24.770	123.323	180	4.8
26	06-20 17:32:12	23.859	125.252	395	4.8
27	05-10 18:24:31	23.690	122.505	176	4.8
28	05-04 12:43:35	23.894	121.701	126	4.8

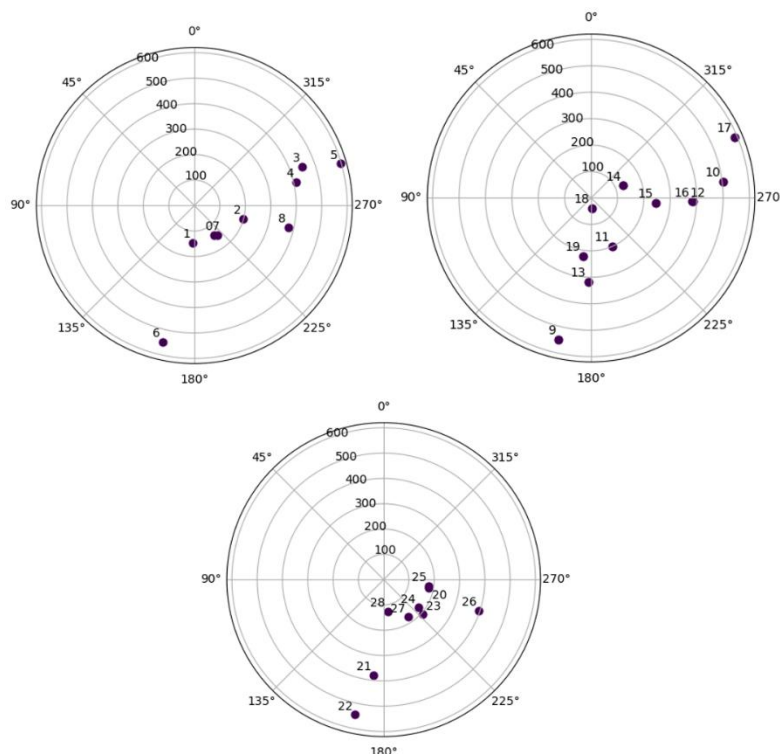


Figura 4. Catálogo de eventos sísmicos enumerados del 0 al 28 (este orden es de acuerdo a su magnitud, de mayor a menor), el centro de cada plano es la torre

3.4 Tifones seleccionados (año 2014)

Además de estudiar el comportamiento de la torre y el TMD cuando son excitados por terremotos, se hace un análisis de su respuesta cuando se tiene la presencia de tifones, se seleccionan los eventos Matmo y Fung Wong (Tabla 3), en la Figura 5 se muestra su recorrido. Para hacer el análisis se seleccionan los tiempos en que estos estuvieron más cerca al Edificio.

Tabla 3. Características de los tifones seleccionados y el tiempo de análisis en el cual se lee información de los sensores.

Nombre	Fecha(UTC)	Tiempo de análisis	Velocidad máxima[M/S]
Matmo	2014-07-22	19:00:00 a 19:14:59	32.7-50.9
Fung Wong	2014-09-21	16:45:00 a 16:59:59	17.2-32.6

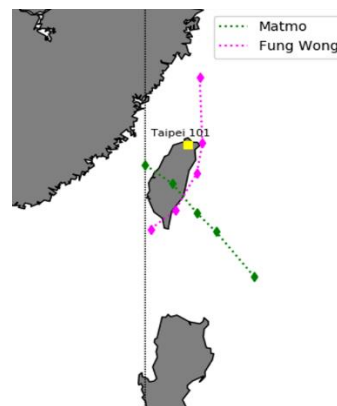


Figura 5. Recorrido de los tifones seleccionados respecto a la torre Taipei 101

3.5 Recuperación de datos sísmicos

La organización de la información registrada por la Red del TMD se muestra en la Figura 6. Cada archivo .txt tiene los valores registrados para un minuto de los 7 canales (Tabla 4) a 20Hz (1200 filas x 7 columnas).

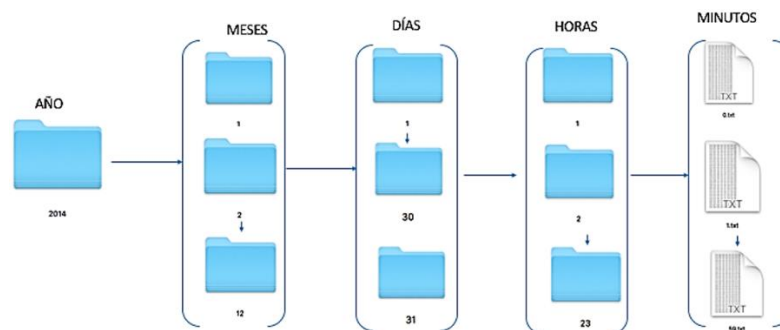


Figura 6. Organización de los datos de la red TMD. La carpeta principal es el año, de esta se desprenden las subcarpetas mes, día, hora. La subcarpeta hora tiene 60 archivos .txt, cada uno de estos equivale a un minuto de la data registrada para los 7 canales

Tabla 4. Canales de la red TMD

Canal	Sensor
0	Cúspide x
1	Cúspide y
2	Edificio x
3	Edificio y
4	TMD x
5	TMD y
6	Velocidad viento
7	Dirección viento

Para leer la información de los sensores se realiza un algoritmo en Python que permite navegar por las diferentes carpetas (mes, día, hora), que entrega los datos para diferentes cantidades de tiempo y canales introducidos por el usuario para su posterior procesamiento.

3.6 Procesamiento de datos

Inicialmente, se lee información de los sensores Edificio, TMD y T1S1 en los ejes x - y 1 minuto antes y 5 minutos después de cada terremoto seleccionado, para los tifones se toman datos en los tiempos mencionados en la Tabla 3,

se calcula el espectro en frecuencias a cada set de datos por evento para determinar las frecuencias que presentan mayor energía. Se realiza un filtrado a las señales en 14 bandas de tercio de octava de acuerdo a la ecuación (15).

$$F_H = 2^{\frac{1}{3}} F_L \quad (15)$$

F_H y F_L son las frecuencias de corte alta y baja de la banda respectivamente, el filtrado se realiza desde 0.070 Hz hasta 1.778 Hz, teniendo en cuenta la frecuencia fundamental y los armónicos superiores encontrados en [24]. Los datos de cada una de las bandas se pasan de aceleración a desplazamiento por medio de una integración numérica. El filtrado solo se hace para el TMD y el edificio, ya que el sensor T1S1 cuenta con un digitalizador diferente y no se establece una sincronía con el de la red TMD. Como se tienen los registros en los ejes x - y es posible transformar los datos en números complejos usando la ecuación (16), con esto podremos obtener la magnitud y fase del sensor ubicado en el TMD (estación TMD) y del sensor ubicado en el piso 92 (estación Edificio)

$$z = x + yi \quad (16)$$

Donde z es un número complejo con x como parte real y y como parte imaginaria. La magnitud y argumento de z están dados por las ecuaciones (17) y (18) respectivamente, a partir de los resultados de aplicar estas ecuaciones a los datos medidos se obtiene la magnitud del TMD y el edificio para cada uno de los eventos, y es posible determinar la diferencia de fase en grados entre estos para verificar si se cumple lo expresado en la ecuación (10).

$$|z| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (17)$$

$$\arg(z) = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (18)$$

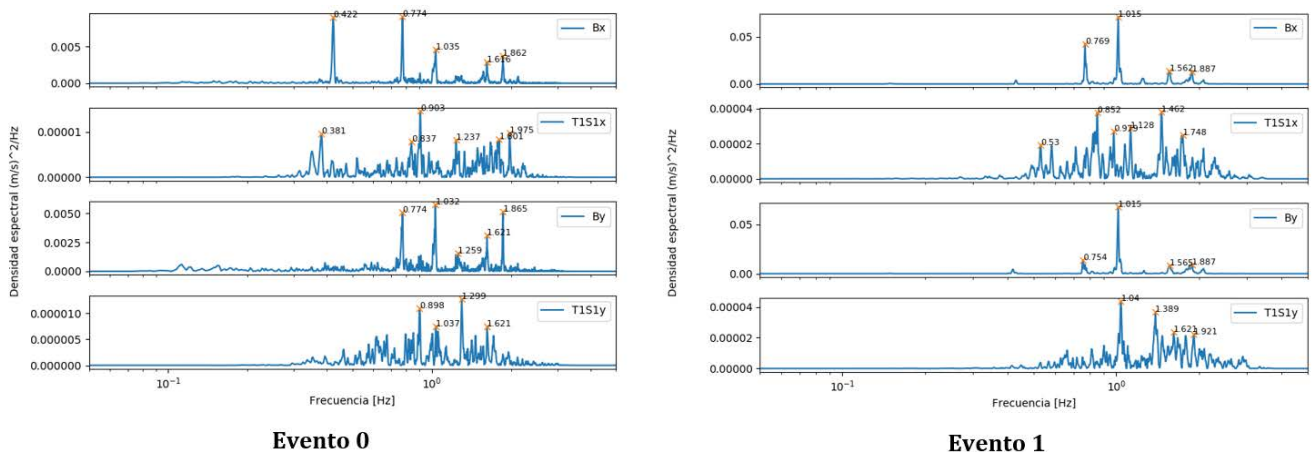
A los ángulos de fase de cada uno de los dos sensores se les aplica un filtro de promedio móvil con el fin de suavizar los datos y tener un comportamiento más general en ventanas de muestras. El filtro se aplicó por medio de convolución siguiendo la ecuación (19) donde x y y son las señales de entrada y salida respectivamente, N es el número de muestras que se toma. El valor de N seleccionado para el análisis fue de 400 muestras.

$$y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[i + j] \quad (19)$$

4. RESULTADOS

En la Figura 7 se muestra la densidad espectral de los sensores Edificio (B) y T1S1 en los ejes x - y para algunos de los terremotos seleccionados. De la densidad espectral para cada uno de los terremotos, se ve que siempre la energía en la base (T1S1) es mucho menor a la energía del sensor que está más arriba (B), y como las frecuencias que se excitan son diferentes, esto se debe principalmente a que en la parte alta del edificio tenemos el movimiento de este regido por sus modos de vibración y todos sus componentes estructurales, mientras que en la base tenemos prácticamente las características de los fundamentos que sostienen la estructura y la energía espectral que llega del terremoto antes de ser filtrada por el edificio.

De acuerdo a [28], la frecuencia de resonancia del edificio se encuentra alrededor de 0.15 Hz, en la Figura 7 se ve como en los eventos 0, 4 y 7 en el sensor del edificio en alguno de los ejes se excita una frecuencia alrededor de 0.45 Hz, también todos los eventos excitan frecuencias cercanas a 0.75 Hz y 1.05 Hz, estas corresponden al tercer, quinto y séptimo armónico del edificio, se resalta que todos estos son armónicos impares respecto a la frecuencia natural de oscilación. El espectro de la mayoría de eventos siempre presenta mayor energía en las frecuencias altas (alrededor de 1 Hz) que en las bajas (alrededor de 0.1 Hz).



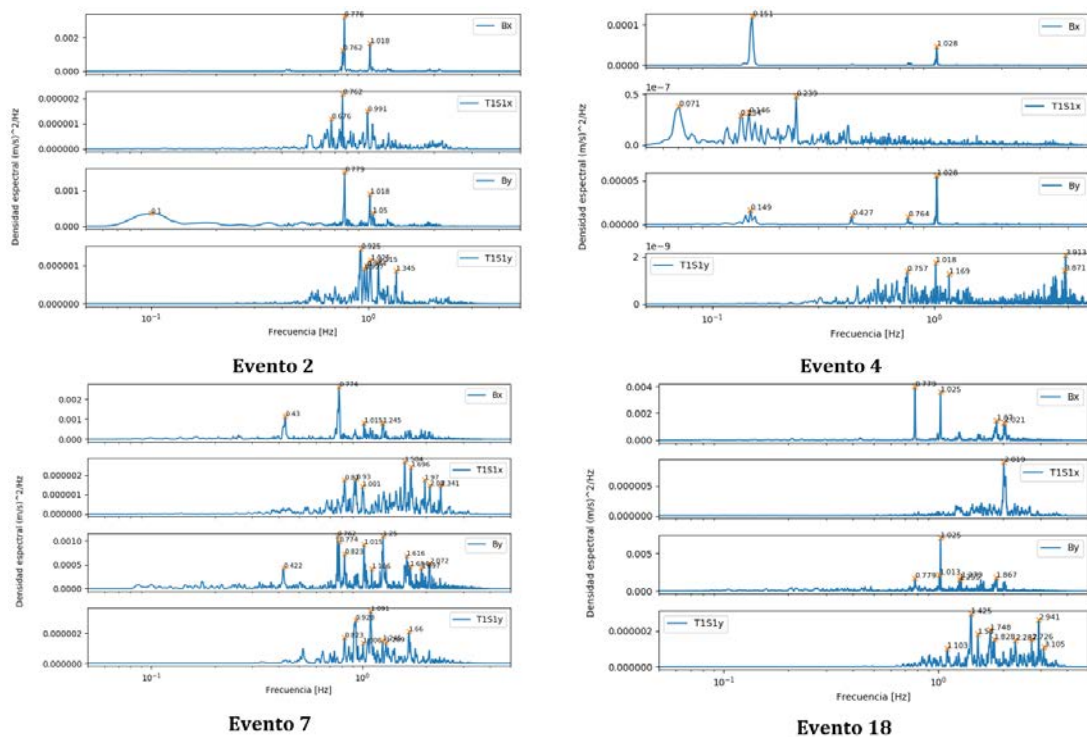


Figura 7. Densidad espectral de algunos de los eventos analizados para los sensores Edificio (B) y T1S1 en los ejes x-y

La densidad espectral para los tiempos seleccionados de los tifones Matmo y Fung Wong se muestra en la Figura 8, en esta se ve como se excitan la frecuencia fundamental de la torre y el séptimo armónico (1.05 Hz) la energía de la base es muy inferior ya que la fuerza del viento se ejerce con mayor magnitud en las partes más altas. La energía que se presenta en los tifones es mucho mayor a la de los terremotos. Para realizar el estudio del comportamiento del TMD y el edificio las bandas de frecuencia se dividen en tres rangos: frecuencias inferiores a la fundamental (0.07 Hz a 0.14 Hz), frecuencias cercanas a la fundamental (0.14 Hz a 0.176 Hz) y frecuencias superiores a la fundamental (0.176 Hz a 1.778 Hz).

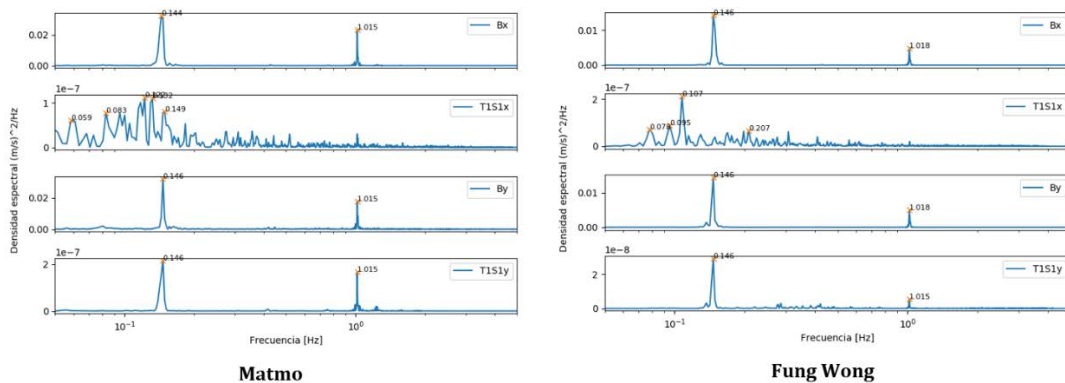


Figura 8. Densidad espectral del tiempo seleccionado de los tifones Matmo y Fung Wong para los sensores Edificio (B) y T1S1 en los ejes x-y

4.1 Frecuencias inferiores a la fundamental

En las Figuras 9 y 10 se muestran los resultados para la banda de tercio de 0.07 Hz a 0.088 Hz para terremotos y tifones, estas graficas resultan de implementar el proceso mencionado en la sección 3.6. La gráfica inferior muestra la magnitud en desplazamiento de la estación EDIFICIO y TMD (el cual presenta un offset con respecto a la señal EDIFICIO para mayor claridad). En el intermedio se muestra el cálculo de la fase de ambas estaciones filtradas por una media móvil de 400 puntos como se indica en la sección 3.6, y en la parte superior la diferencia en valor absoluto de la fase entre estas. La línea punteada roja para los terremotos indica el tiempo en el cual ocurrieron estos y la línea verde indica el valor de 90°, el cual debería cumplirse cuando se presentan grandes amplitudes. Todas las figuras en adelante seguirán este patrón.

Analizando los resultados de los Eventos 0 y 2 se puede ver que cuando hay máximas amplitudes la diferencia en grados no cambia, el comportamiento siempre es el mismo con variaciones de la fase entre estos, en el evento 7 la diferencia permanece constante alrededor de los 50° cuando hay un mínimo, de resto el comportamiento es muy parecido al de los eventos 0 y 2. En los tifones el comportamiento es muy similar al de los terremotos, la diferencia de

fase en grados tiende a fluctuar todo el tiempo y en ocasiones cuando hay mínimos de magnitud esta toma valores más constantes. En este rango de frecuencias tanto el TMD como el edificio no presentan grandes cambios cuando son excitados por tifones y terremotos.

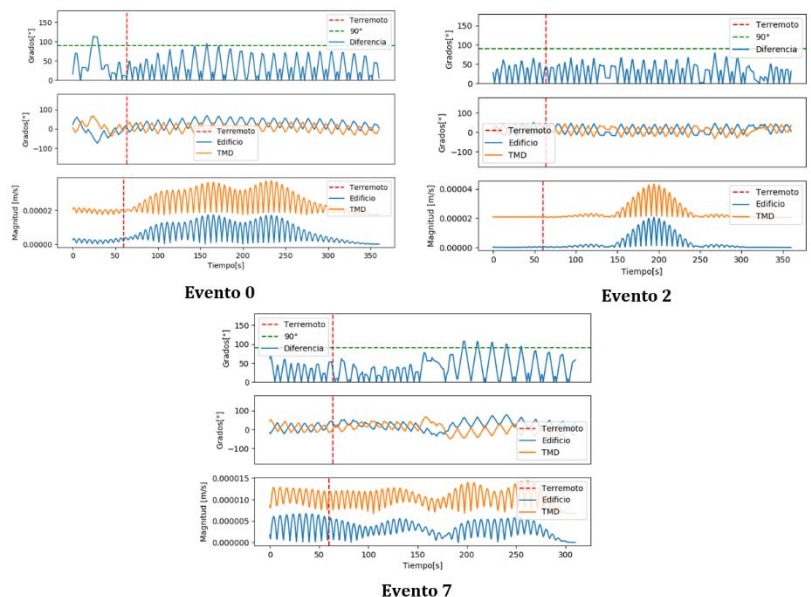


Figura 9. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.07 Hz a 0.088 Hz para terremotos 0, 2 y 7. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos.

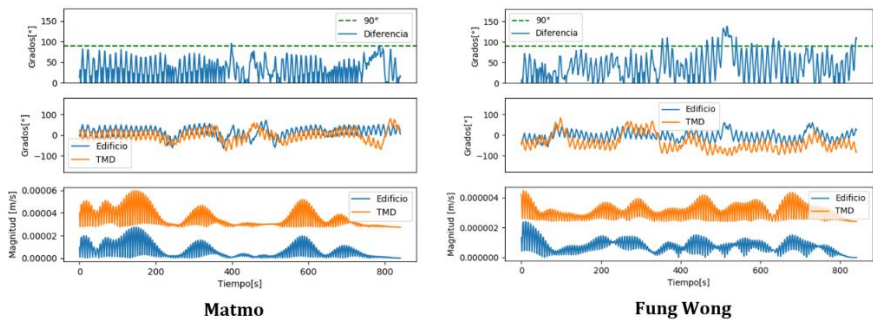


Figura 10. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.07 Hz a 0.088 Hz para tifones. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

Otra banda de tercio de octava que se encuentra en este rango de frecuencias inferiores a la fundamental es la de 0.088 Hz a 0.111 Hz, los resultados de esta para terremotos y tifones se muestran en las Figuras 11 y 12. En los eventos 2 y 7 cuando hay máximos de magnitud, la fase del edificio y el TMD es constante, y su diferencia tiende a cero, a veces se presentan unos desfases cercanos a 90° cuando hay mínimos de magnitud después del tiempo de origen del terremoto. Para los tifones (Figura 11), se presentan dos comportamientos, en Matmo es muy similar al de los terremotos, cuando hay amplitudes máximas la diferencia de fases pequeña, y cuando la amplitud es baja los desfases son grandes, para Fung Wong la diferencia de fases oscila entre valores cercanos a los 90° y 0°, debido a los constantes cambios de magnitud. En este rango de frecuencias baja el TMD tiende a tener magnitudes un poco mayores a las del edificio.

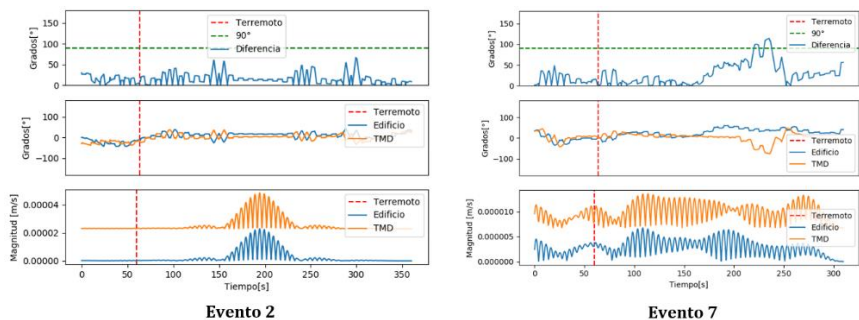


Figura 11. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.088 Hz a 0.111 Hz para terremotos. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

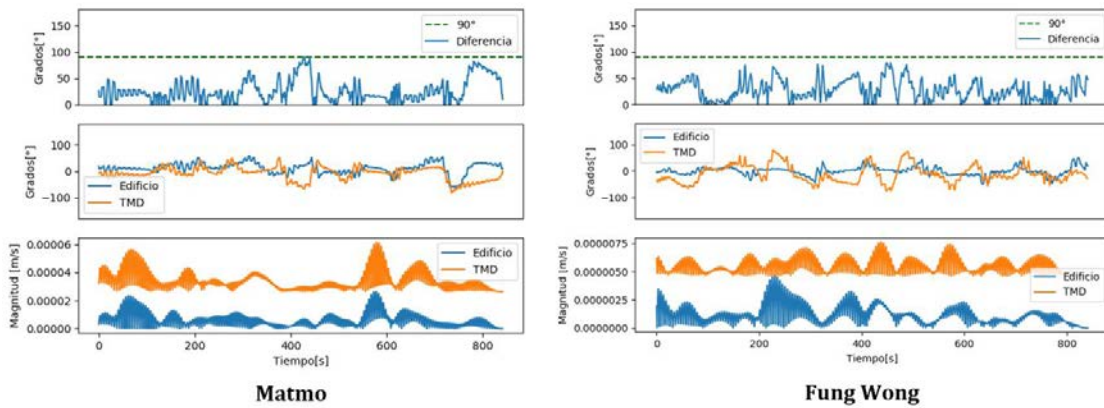


Figura 12. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.088 Hz a 0.111 Hz para tifones. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

4.2 Frecuencias cercanas a la fundamental

En la Figura 13 se presentan los resultados para la banda de 0.14 Hz a 0.176 Hz la cual tiene como frecuencia central 0.157 Hz, un valor muy cercano a la de resonancia. En todos los eventos se ve como después de que pasa el tiempo de origen de los terremotos hay incrementos en la diferencia de fases, mientras se presentan estas, la energía decrece o está en un mínimo. Las magnitudes para las frecuencias bajas y este rango son pequeñas (alrededor de 10^{-4} m/s). Los resultados para los tifones se presentan en las Figuras 14 y 15, para hacer un análisis más detallado de estos las gráficas se parten en ventanas de tiempo (A, B, C, D). En Matmo (Figura 14) en las ventanas C y D cuando hay máximos de magnitud se presentan máximos de desfase muy cercanos a los 90° y después de estos la magnitud tiende a bajar, en las ventanas A y B la diferencia toma valores muy bajos y no presenta cambios significativos cuando hay máximos de magnitud.

Para Fung Wong (Figura 15) se presentan diferencias constantes muy cercanas a los 90° , lo que quiere decir que el TMD está oscilando en dirección contraria al edificio la mayoría del tiempo. Las magnitudes que se tienen para los tifones en este rango son mayores (alrededor de 10^{-3} m/s) a las que se presentan en los terremotos. En este rango de frecuencias el movimiento del TMD toma valores mayores al del edificio, también se resalta que a diferencia de los terremotos el viento es una fuerza constante, por lo que es difícil determinar para los tifones si cuando hay diferencias grandes de fase la amplitud decrece.

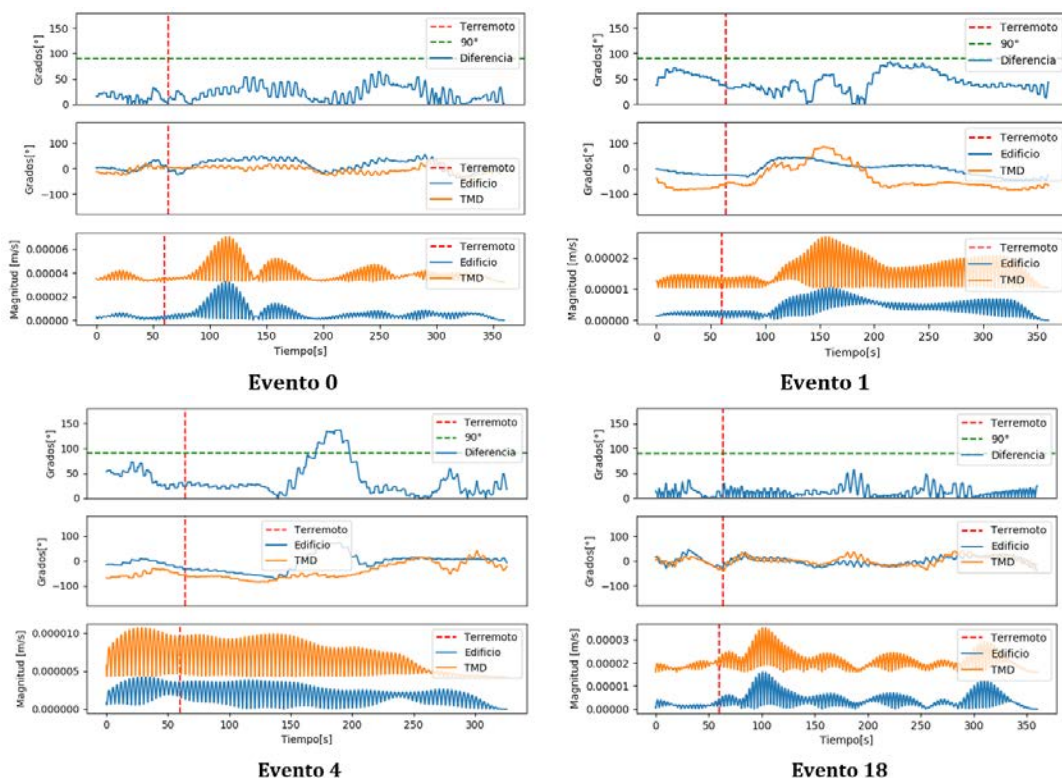


Figura 13. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.14 Hz a 0.176 Hz para terremotos. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

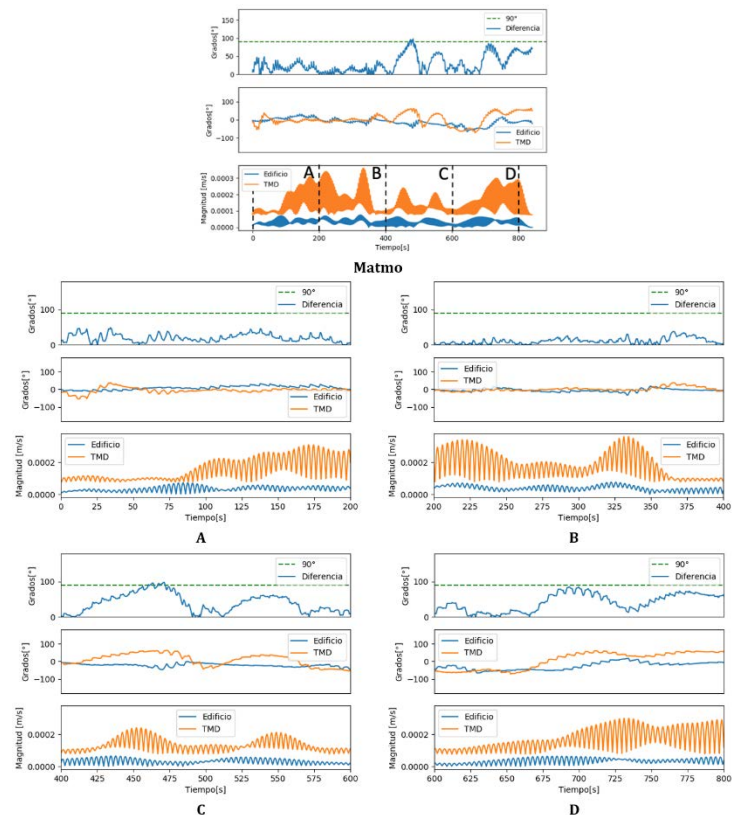


Figura 14. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.14 Hz a 0.176 Hz para Matmo. Ventanas con diferentes letras representan diferentes tiempos del tifón. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

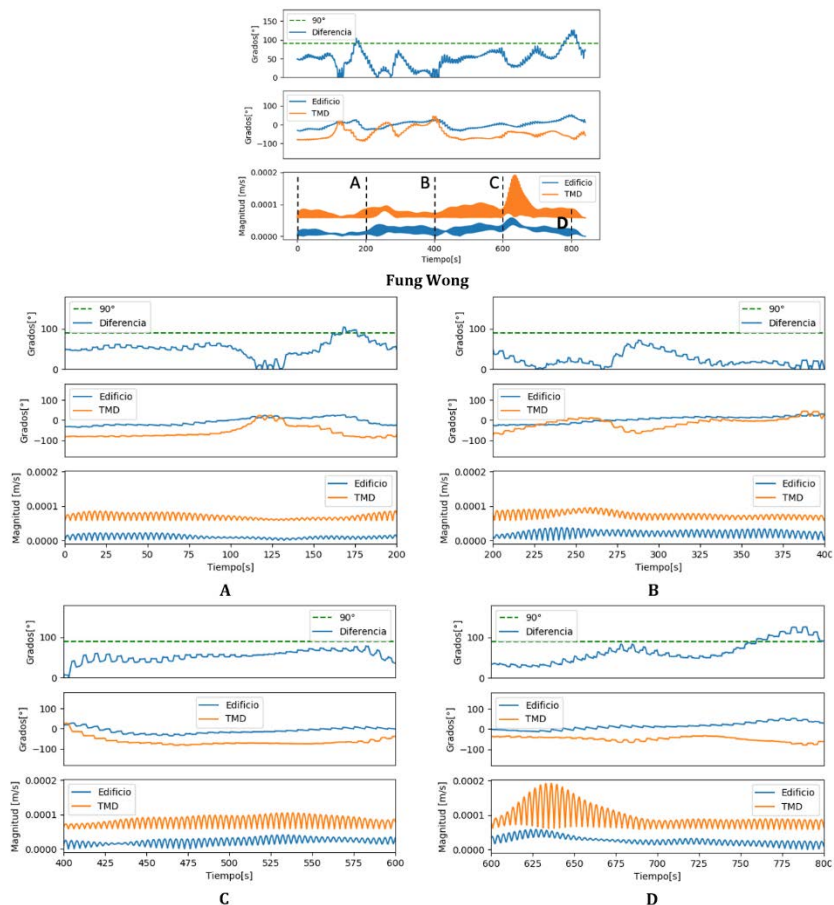


Figura 15. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.14 Hz a 0.176 Hz para Fung Wong. Ventanas con diferentes letras representan diferentes tiempos del tifón. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

4.3 Frecuencias superiores a la fundamental

Una de las bandas de tercio seleccionada para este rango de frecuencias es la de 0.353 Hz a 0.440 Hz, en este intervalo se encuentra el tercer armónico del edificio. En la Figura 16 se muestran los resultados para esta banda de frecuencias, en ambos eventos se ve que cuando hay máximos de magnitud la diferencia de fase aumenta alrededor de los 50°, normalmente la diferencia toma valores bajos, las magnitudes del edificio y el TMD en este rango toman valores muy similares.

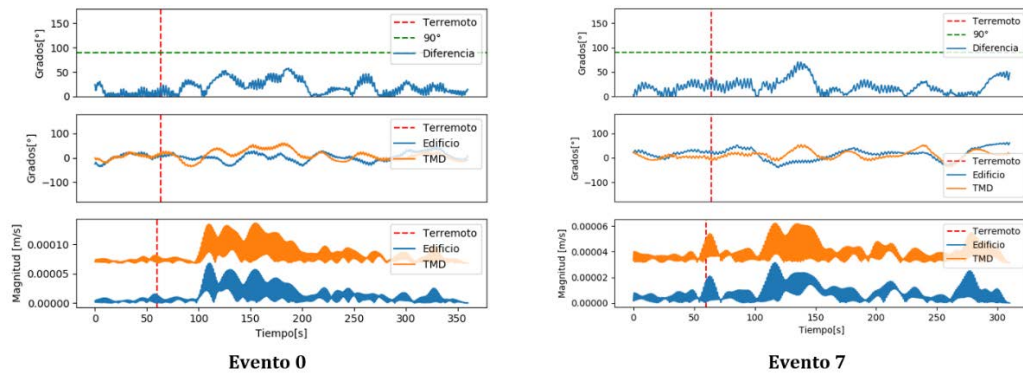


Figura 16. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.353 Hz a 0.440 Hz para terremotos. Ventanas con diferentes letras representan diferentes tiempos del tifón. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

Los resultados para la banda de 0.706 Hz a 0.889 Hz (en esta se encuentra el quinto armónico) se presentan en la Figura 17, en los eventos 1 y 7 hay algunos desfases cuando se presentan máximos de magnitud mientras que para los eventos 0 y 2 parece no haber cambios significativos cuando se presenta el terremoto, En este rango de frecuencias la magnitud del edificio es mayor a la del TMD.

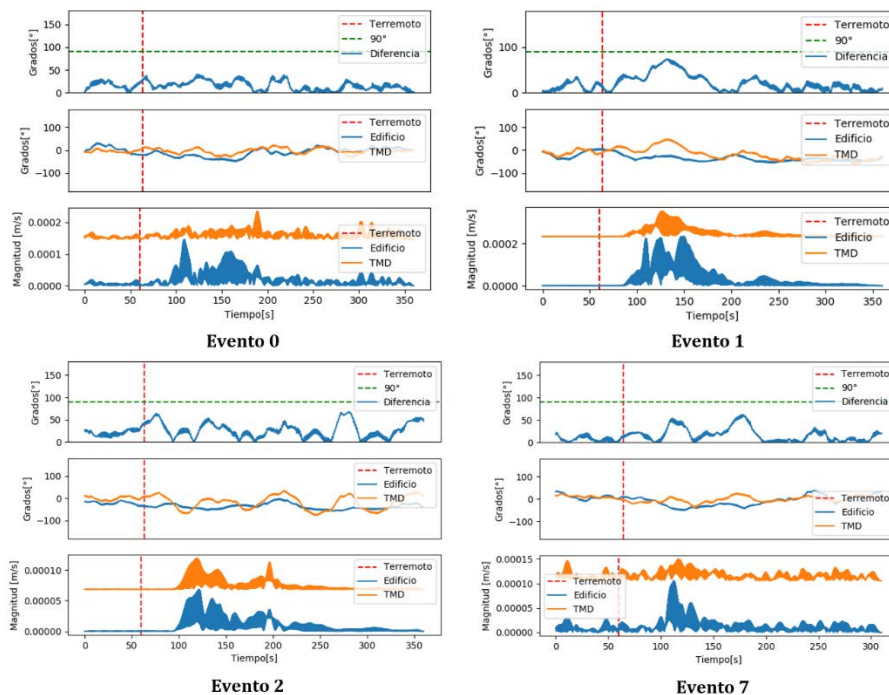


Figura 17. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.706 Hz a 0.889 Hz para terremotos. Ventanas con diferentes letras representan diferentes tiempos del tifón. (Inferior) Desplazamiento del edificio y el TMD con un offset vertical con respecto al edificio. (Intermedia) media móvil de fase para ambas estaciones. (Superior) valor absoluto de la diferencia de fase entre ambos

La última frecuencia de análisis es la de 0.889 Hz a 1.12 Hz (séptimo armónico), los resultados para terremotos se presentan en la Figura 18, en el evento 0 y 2 se incrementa un poco la diferencia cuando ocurre el evento, en el evento 1 no hay cambios significativos, el TMD tiene magnitudes muy bajas. En las Figuras 19 y 20 se muestran los resultados de esta banda para los tifones, en ambos se presentan diferencias de fase constantes alrededor de los 50°, en ocasiones cuando hay máximos de magnitud la diferencia tiende a ser mínima, es decir el TMD y el edificio se mueven igual. En estas altas frecuencias siempre el Edificio tiene magnitudes mayores al TMD, tanto para terremotos como para tifones.

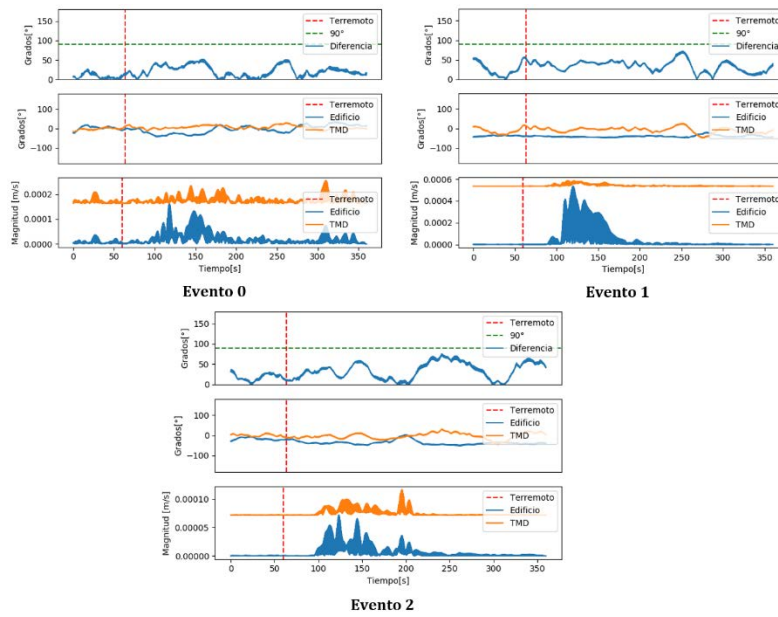


Figura 18. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.889 Hz a 1.12 Hz para terremotos.

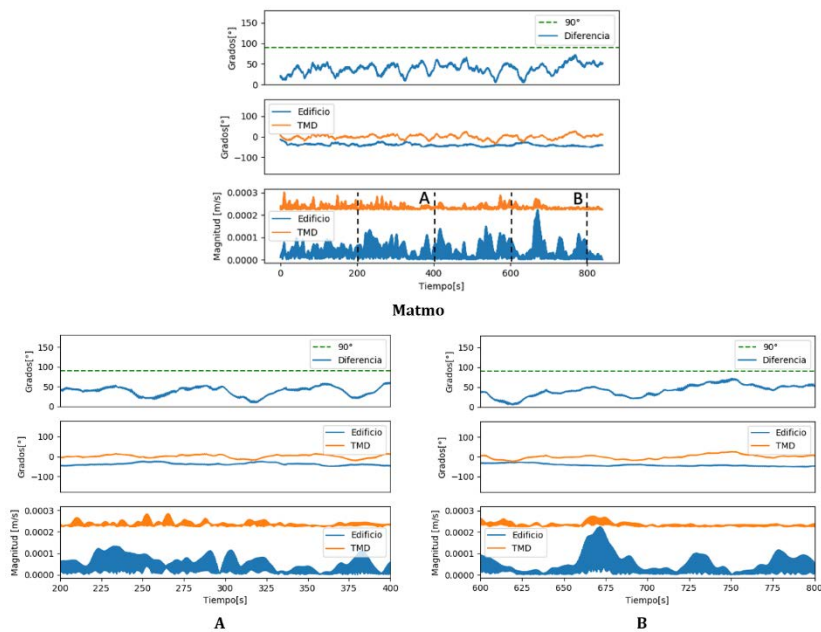


Figura 19. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.889 Hz a 1.12 Hz para Matmo

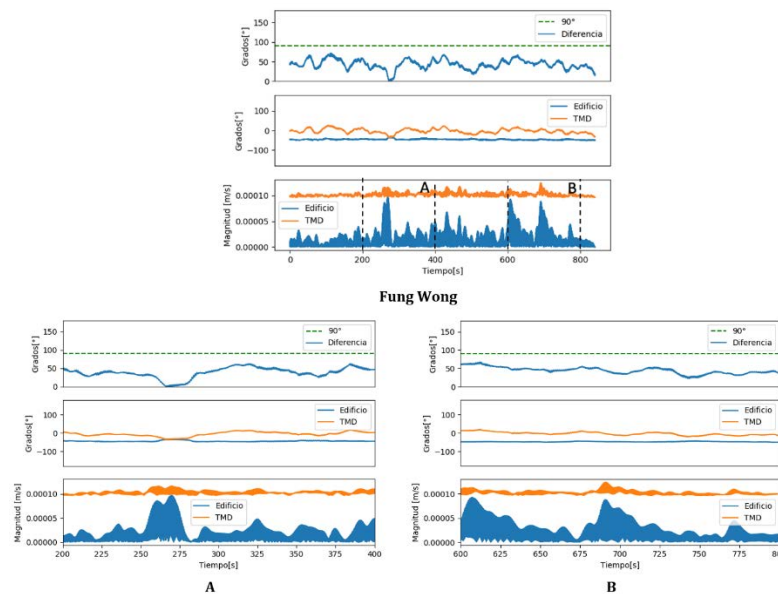


Figura 20. Análisis de magnitud y grado de desfase entre el TMD y el edificio en la banda de 0.889 Hz a 1.12 Hz para Fung Wong

5. CONCLUSIONES

Al observar la densidad espectral de los terremotos se puede ver que la energía en la base siempre es menor a la que se presenta en los pisos más altos, y en estos últimos se tiene el movimiento del edificio regido por sus componentes estructurales y modos de vibración, normalmente se excitan lo armónicos impares de la frecuencia fundamental y se tienen mayores magnitudes en las frecuencias más altas.

Los tifones excitan en mayor magnitud la torre en comparación a los terremotos, y en especial en un ancho de frecuencias más bajas por debajo de 1 Hz, donde se encuentra la frecuencia fundamental del edificio y algunos armónicos.

Para el rango de frecuencias bajas no hay cambios significativos cuando ocurren los tifones o terremotos, a medida que se acerca a la frecuencia fundamental, la diferencia de fase permanece constante y tiene a cero para altas magnitudes de desplazamientos, luego que el desfase aumente a valores cercanos a 90° se evidencia como ambas señales pierden amplitud llegando mínimos. Esto puede ser un indicio de la efectividad del TMD en estos momentos para este rango de frecuencias.

En la frecuencia fundamental para los terremotos y Matmo casi siempre que pasan los máximos de amplitud se presentan valores muy cercanos a 90° en la diferencia de fases, después de que estas ocurren la energía decrece o toma valores mínimos, en Fung Wong se tienen todo el tiempo diferencias constantes muy cercanas a los 90°, en este rango de frecuencias el TMD casi siempre responde a los eventos y alcanza valores muy cercanos a los propuestos en la teoría.

En altas frecuencias en ocasiones se presentan diferencias alrededor de 50° cuando hay máximos de magnitud, en otras ocasiones no hay cambios significativos, el TMD a veces responde con desfases pequeños cuando ocurren eventos.

Para finalizar al estudiar las diferentes bandas se ve como el TMD toma valores mayores de magnitud en la frecuencia fundamental y en bajas, para las altas la magnitud del Edificio es mayor.

Se evidencia entonces como por medio del análisis de los desplazamientos de dos estaciones estratégicamente ubicadas en la estructura se puede no solo monitorear el comportamiento de la estructura, sino también generar métodos para monitorear el funcionamiento del TMD.

REFERENCIAS

- [1] T. Haskett, B. Breukelman, J. Robinson y J. Kottelenberg, "Tuned mass dampers under excessive structural excitation", 2003.
- [2] J. M. J. Crocker, *Handbook of Noise & Vibration control*, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] A. Y. Tuan y G. Q. Shang, "Vibration control in a 101-storey building using a tuned mass damper," *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 17, n. 2, pp. 141-156, 2014.
- [4] P. Grootenhuis, "The control of vibrations with viscoelastic materials," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 11, n. 4, pp. 421-433, 1970.
- [5] D. A. Chikhalekar y M. M. Murudi, "Seismic Performance of Structure with Fixed Base, Base Isolated Structure and Structure with Viscous dampers," *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 2321-7308, 2015.
- [6] N. Varadarajan y S. Nagarajaiah, "Wind Response Control of Building with Variable Stiffness Tuned Mass Damper Using Empirical Mode Decomposition/Hilbert Transform," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, n. 4, 2004.
- [7] H. Frahm, "Device for damping vibrations of bodies," U. S. Washington, DC. Patente 00989958, 1911.
- [8] J. Ormondroyd y D. H. J.P., "The theory of dynamic vibration absorber," *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. 50, pp. 9-22, 1928.
- [9] S. Crandall y W. Mark, *Random Vibration in Mechanical Systems*, New York: Academic Press, 1963.
- [10] R. G. Jacquot y D. L. Hoppe, "Optimal random Vibration Absorbers," *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, vol. 99, pp. 612-616, 1973.
- [11] P. Wirsching y W. G. Campbell, "Minimal structural response under random excitation using the vibration absorber," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, pp. 303-312, 1974.
- [12] G. B. Warburton y E. O. Ayorinde, "Optimum absorber parameters for simple systems," *Earthquake. Engng. Struct. Dynam.*, n. 8, pp. 197-217, 1980.
- [13] M. Sohne, "MAURER Tuned Mass Dampers," Maurer Sohne, München, 1876.
- [14] S. A. P. P, S. B, S. N, G. B y P. H, "Vibration Control of Slab Breaker Machine by Passive Dual Mass Tuned Vibration Absorber," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 1, pp. 2112-2116, 2014.
- [15] C. Z, H. Z, Z. W y Y. J, "TMD design for seismic vibration control of high-pier bridges in Sichuan-Tibet Railway and its influence on running trains," *Vehicle System Dynamics*, vol. 57, pp. 207-255, 2019.
- [16] C. Z, F. H, H. Z y S. S, "Influence of bridge-based designed TMD on running trains," *Journal of Vibration and Control*, pp. 182-193, 2019.
- [17] M. Domaneschi, L. Martinelli y E. Po, "Control of wind buffeting vibrations in a suspension bridge by TMD: Hybridization and robustness issues," *Computers & Structures*, pp. 3-17, 2015.
- [18] M. Chey, J. Chase, J. Mander y A. Carr, "Semi-active tuned mass damper building systems: Design," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 39, n. 2, pp. 119-139, 2010.
- [19] K. Kwok, "Damping Increase in Building with Tuned Mass Damper," *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 1645-1649, 1984.

- [20] K. Kwok y B. Samali, "Performance of tuned mass dampers under wind loads," *Engineering Structures*, vol. 7, 1995.
- [21] H. D. B. P. R. M, "Semi-Active versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 109, 2010.
- [22] A. H y M. R, "Comparison of the seismic performance of a partial mass isolation technique with conventional TMD and base-isolation systems under broad-band and narrow-band excitations," *Engineering Structures*, pp. 110-123, 2018.
- [23] E. Matta y S. A. De, "Robust design of mass-uncertain rolling-pendulum TMDs for the seismic protection of buildings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, pp. 127-147, 2009.
- [24] Q. S. Li, L. H. Zhi, A. Y. Tuan, C. S. Kao, S. C. Su y C. F. Wu, "Dynamic behavior of taipei 101 tower: Field measurement and numerical analysis," *J. Struct. Eng*, vol. 137, n. 1, pp. 143-155, 2011.
- [25] D. Hartog, *Mechanical Vibration*, McGraw-Hill, 1956.
- [26] D. Hartog, "Tuned mass damper systems," *Eng. Struct*, pp. 43-53, 2002.
- [27] I. M. Abubakar y B. J. M. Farid, "Generalized den hartog tuned mass damper system for control of vibrations in structures," *WIT Trans. Built Environ*, vol. 104, pp. 185-193, 2009.
- [28] K. C. Chen, J. H. Wang, B. S. Huang, C. C. Liu y W. G. Huang, "Vibrations of the taipei 101 skyscraper caused by the 2011 tohoku earthquake, Japan," *Earth, Planets Sp*, vol. 64, n. 12, p. 1277-1286, 2012.
- [29] G. Carone, "WikiArquitectura," [En línea]. Available: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/taipei-101/#>. [Último acceso: 8 Abril 2019].
- [30] L. C. Chen, C. C. Chen, C. Y. Chen, S. W. Yeh, S. K. Zen y J. H. Chou, "The wind features of taipei 101 financial building," n. 1, pp. 725-728, 2006.

Sistema de monitoreo del consumo eléctrico de la iluminación o carga en un edificio

Alben Melo V.¹

Bairon F. Peña C.²

Manuel F. Acosta V.³

Luis M. Pulido O.⁴

Corporación Universitaria del Meta UNIMETA – Colombia

Este proyecto comenzó desde el semillero de ingeniería electrónica de la Corporación Universitaria del Meta como trabajo de investigación con estudiantes. Aquí se partió de otro proyecto terminado, Interruptores con WiFi para monitoreo y control Domótico [1]. Una de las finalidades de estos interruptores era lograr reducir los costos por el consumo de la iluminación, cuando se dejaban las luces encendidas en un edificio toda la noche por descuido. Allí la App permitía monitorear y controlar todos los interruptores vía WiFi para así apagar manualmente o temporizadamente las luces. Ahora se busca medir ese consumo energético, pero no solo en cada bombillo o lámpara del edificio, sino tratar de monitorear lo que más se pudiera. Este complemento servirá para poder hacer un seguimiento histórico y en tiempo real del consumo energético de las luminarias de un edificio, o de los circuitos de cargas como aires acondicionados, ventiladores, televisores, CCTV, entre otros. En este se planteó diseñar un prototipo electrónico que ayudará a monitorear el consumo eléctrico del edificio principal de la universidad, para ello se hizo una parametrización de las variables básicas, también se corroboraron los circuitos de distribución por cargas, pisos, fases y prioridad. Con este análisis de consumo se pretende impulsar otras dos etapas, la posible implementación de paneles solares para disminuir los costos de energía; y la viabilidad de un sistema ininterrumpido de energía. Para cualquiera de estas posibles etapas se debe tener un punto de partida, nada mejor que la información actual del consumo y la priorización del mismo. Se busca que al tener este dispositivo sea fácil de instalar cerca de caja de distribución y se pueda adaptar para medir los circuitos requeridos, por ejemplo, que se pudiera tener lectura y registro del consumo del circuito de iluminación al que corresponde un Breaker (Automático) o el consumo del Taco que controla los aires acondicionados. Toda esta información quedara guardada en una base de datos para su respectivo análisis.

1. INTRODUCCION

En este trabajo se muestra como desde un semillero se puede transversalizar el conocimiento en pro de un objetivo especial, además como de manera multidisciplinaria se apoya el desarrollo de dicha finalidad. Aquí se refleja también como se implementan los proyectos entre docentes y estudiantes. También como este tipo de proyectos genera trabajos de grado. El semillero GIBIO propone una metodología de trabajo basada en las fases, estas se planean para que los estudiantes las desarrollen y así mismo las documenten. Este documento presenta 4 partes que integran todo el proceso: La Necesidad, El Diseño, La Implementación y Los Resultados.

La Necesidad tiene lo que fundamenta este proyecto, lo que sería el planteamiento del problema y la justificación. Se hizo una consulta teórica del tema y de lo relacionado al mismo. Lo que se ha hecho y lo que existe al respecto. El Diseño contempla la parte inicial, en esta se hacen las primeras proyecciones de lo que se busca con el prototipo y como llenar las expectativas finales. Se plantean situaciones propias del contexto en el que funcionará el sistema.

La implementación es la ejecución del proyecto, aquí se desarrolla lo planeado en el Diseño y que satisfaga la Necesidad. En esta parte, el proyecto tiene un avance significativo, se puede decir que en más de la mitad. Esta ejecución contempla trabajo en laboratorio y trabajo en campo. Los resultados hasta el momento son parciales según los avances de la implementación, se tienen unos resultados teóricos y otros prácticos.

De cualquier forma, son bastante significativos para la investigación. Se busca dejar un prototipo personalizado que ayude a la medición y diagnóstico del consumo de energía eléctrica en un edificio que permita también hacer un análisis para la posible implementación de algún sistema alternativo de energía o un sistema de respaldo. *“Los cambios de civilización energética por los que ha atravesado la humanidad han implicado no solo la disponibilidad de una nueva fuente de energía, sino también un uso más eficiente de las ya existentes”* [2].

2. LA NECESIDAD

El desarrollo económico de un país va de la mano del consumo energético y por ello se buscan maneras de contrarrestar lo que el consumo le hace al planeta [3]. De igual manera, las Naciones Unidas con su Programa para el Medio Ambiente (PNUMA), indica que uno de los factores importantes es trabajar es sobre los estándares de eficiencia energética y mejoras en las tecnologías usadas [4]. El Banco Mundial de Desarrollo muestra un informe donde el consumo de electricidad en el sector comercial y de servicios públicos aumentó más de doce veces en el periodo, convirtiéndolo en el sector con el crecimiento más rápido, el cual consumió cerca del 22% de la electricidad en 2013 [5].

¹ alben.melo@unimeta.edu.co, albenmv@gmail.com

² bffc-96@hotmail.com

³ pa_cho125@hotmail.com

⁴ luis.pulido@unimeta.edu.co

En la actualidad el tema de implementar sistemas de generación de energías alternativas está en auge, tanto a nivel tecnológico como a nivel legislativo. En la ubicación geográfica que esta la ciudad de Villavicencio existen muchas condiciones que hasta ahora se están explorando para aprovecharlas en las energías alternativas. La tendencia regional está enmarcada por definir como objetivo el de duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética al 2030, esto en el marco de los avances en materia de energías sostenibles en América Latina y el Caribe [6]. Se quiere parametrizar cada circuito del edificio, comprobar los planos eléctricos y la instalación real; aunque se supone que esta información se debería estar disponible, buscando una proyección del proyecto para cualquier edificación, se podría incurrir en la situación en la que no halla disponibilidad de planos.

2.1 Alto consumo

El consumo energético en cualquier empresa, casa o institución, siempre es prioridad, para la cuestión de costos y es en estos momentos cuando más se requiere del ahorro y de la austeridad en el consumo de combustibles y generación de energía, se debería pensar en alternativas [7]. Al respecto, La iluminación representa casi el 20% del consumo eléctrico mundial y también tiene una participación del 6% de los gases del efecto invernadero, por ello hay estudios y evidencias claras de cómo la iluminación LED influye en el ahorro energético [8]. Siguiendo con la misma línea, Barrera [9] en su estudio evidencio que durante épocas de sequía se incrementa la generación de energía a base de carbón, gas, diésel y otros que aumentan la contaminación con el CO₂, esto muestra que la relación entre consumo y generación puede estar en desequilibrio y que hay que buscar alternativas. Así pues, el Concejo Mundial de Energía tiene una preocupación, como mantener el trilema energético equilibrado, seguridad energética, igualdad energética y sostenibilidad ambiental [10].

Los Sistemas de gestión integral de energía están enfocados a disminuir el consumo y aumentar la producción, en el sector industrial, usando la pentalogía de Taiichi Ohno; Medir, Conocer, Controlar, Gestionar y Mejorar [11]. Este proyecto se centra en Medir y Conocer ese consumo eléctrico del edificio. Hay 6 pisos más sótano, alberga los salones de clase y dos auditorios para más de 300 personas cada uno. Todos quieren saber porque tanto consumo y cómo hacer para reducirlo.

2.2 Medicion actual

El trabajo con electricidad implica mucho más que encender y apagar la luz, en este se tiene una rama fundamental que es la medición eléctrica, para ello se cuenta con grandes estudios e instrumentos para tal fin en media y baja tensión [12]. En todo sistema de suministro de energía hay una regulación técnica y legal que permite estandarizar este proceso. Tanto para el cliente como para la compañía eléctrica la medición del consumo eléctrico es sumamente importante [13]. Igualmente, la medición de los kWh que registra el contador eléctrico tiene una buena confiabilidad. La ecuación (1) presenta la potencia instantánea en un dispositivo mientras que la ecuación (2) muestra consumo energético, allí t es el lapso de tiempo de funcionamiento, por lo general 1 Hora.

$$P = V \cdot I \text{ (Watts)} \quad (1)$$

$$W = P \cdot t \text{ (Watts por Hora)} \quad (2)$$

En Colombia el Ministerio de Minas y Energía tiene el reglamento Técnico de Etiquetado que busca establecer medidas a fomentar el uso racional y eficiente de la energía, y que por medio del etiquetado de dispositivos eléctricos y electrónicos ofrezca información del desempeño, consumo y eficiencia energética [14]. Este mismo ministerio también regula la iluminación y el alumbrado público [15] allí también toca el tema de la energía. En la Figura 1 hay una etiqueta típica con la información necesaria del consumo de una lavadora.



Figura 1. Ejemplo de etiqueta

La legislación colombiana tiene contemplado la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional en la Ley 1715, con esta se pretende incentivar el uso de energías alternativas a cualquiera que

así lo desee, así un proyecto como el planteado puede apuntar a establecer las condiciones y capacidades técnicas para una futura implementación de paneles solares u otro sistema [16]. En la Figura 2 se puede apreciar los medidores eléctricos usados en la actualidad en el edificio para llevar el consumo del mismo. En estos solo se puede totalizar el mismo, tan solo se puede independizar el consumo para algunos locales comerciales, pero igual no es posible puntualizar que es lo que más marca al final de mes. Para poder ahorrar hay que saber primero que es lo que más se gasta.



Figura 2. Contadores del edificio

Un edificio en ausencia del fluido eléctrico debe tener un respaldo de energía para el mínimo funcionamiento de este. Como se ve en la Figura 3 hay una planta diésel que se encarga de este respaldo, esta tiene 8KVA de capacidad, por consiguiente, no puede soportar toda la carga del edificio, allí se hace necesario con más énfasis conocer de manera independiente el consumo, hay que priorizar que circuitos se deben respaldar según la capacidad de la planta.



Figura 3. Planta eléctrica del edificio

2.3 Historial

Lamentablemente con los sistemas de medición comunes no se puede tener un registro histórico ni detallado, tan solo la información que puede ofrecer la factura de la empresa de suministro de energía. En futuros estudios de factibilidad del consumo de energía de este edificio para la instalación de un sistema ininterrumpido de energía (UPS) se podrían tener en cuenta los datos recogidos. La Figura 4 muestra una factura común del servicio de energía, en esta se da el valor total consumido (KWh) en un periodo de tiempo, por lo general un mes. Pero no tiene en cuenta que circuitos o que cargas generaron tal consumo.

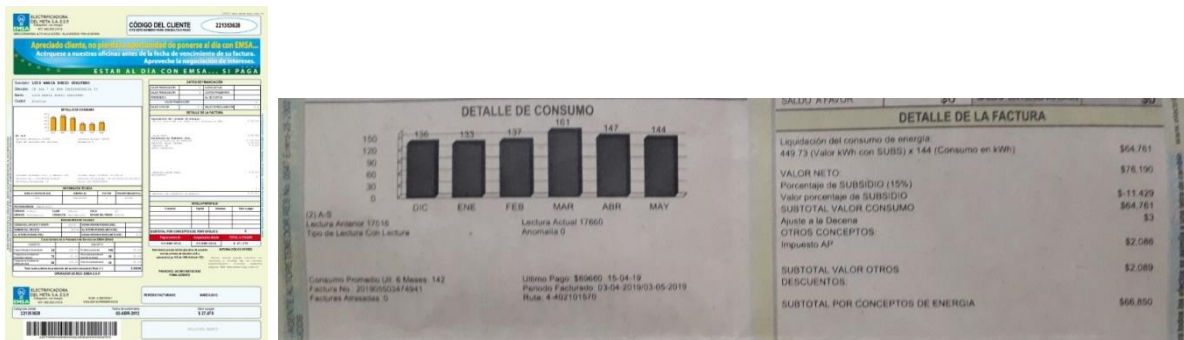


Figura 4. Factura del servicio de energía y detalle de consumo

2.4 Calidad de la energía

Los estudios de la calidad de la energía eléctrica se realizan para realizar un diagnóstico relativos a problemas de armónicos, desbalances de tensión y corriente, fluctuaciones de la tensión nominal. El registrador trifásico mide tensión, corriente, potencias activa, reactiva y aparente, distorsión armónica total de tensión y corriente, desbalance de tensión y corriente y frecuencia. Los resultados obtenidos en el mencionado estudio de calidad tiene como alcance específico realizar una serie de recomendaciones ante el no cumplimiento de criterios como la calidad, los valores nominales de las variables eléctricas deben fluctuar en unos rangos admisibles según la normatividad que aplique, seguridad (ante contingencias los valores de las variables eléctricas deben fluctuar en unos rangos admisibles según

la normatividad que aplique) y confiabilidad (el servicio de energía eléctrica se debe suministrar bajo las condiciones acordadas) [17].

Normalmente un estudio de la calidad de la energía requiere de un instrumento llamado “registrador trifásico”, este es similar al de la Figura 5, es un instrumento muy completo que puede estar alrededor de los \$32’000,000; tiene varias conexiones, toma varias mediciones, hace varios cálculos y almacena mucha información. Por más perfecto que parezca este dispositivo no alcanzaría a realizar las mediciones en más de 3 circuitos, además sería inoficioso utilizarlo para una tarea así.



Figura 5. Registrador trifásico

La medición de la calidad de la energía usa pinzas sobre los cables de los circuitos a medir, similar a lo propuesto por este proyecto, así se puede apreciar en la Figura 6. Desbalance de cargas en circuitos trifásicos, es uno de los análisis que se puede realizar con un instrumento tan avanzado como el registrador.

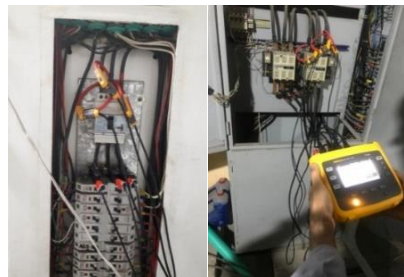


Figura 6. Medicion calidad de la energia

3. EL DISEÑO

Luego de establecer lo que se requiere, se comienza con unos diagramas de bloques, estos permiten visualizar las etapas de lo que será el prototipo, como se ve en la Figura 7.

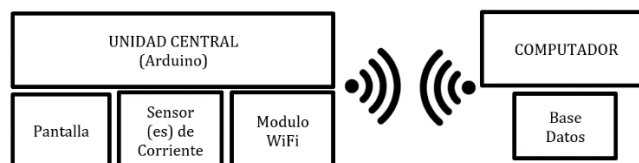


Figura 7. Diagrama de etapas

Se quería un dispositivo que estuviera cerca de la caja de circuitos a medir, que fuera cómodo de instalar, que su interfaz fuera amigable con el usuario, que tuviera comunicación inalámbrica con un computador para almacenar en una base de datos la información recopilada; además que el software desarrollado fuera capaz de tabular y graficar dicha información. Se decidió manejar un solo sensor para medir un circuito a la vez.

3.1 Los primeros diseños

Para iniciar a diseñar un sistema tan completo como el propuesto, se hicieron unos bosquejos en base a la funcionalidad y otros en base a la presentación. Como siempre los primeros montajes se hicieron en protoboard, esto permitió hacer los cambios necesarios para obtener el mejor circuito, antes de pasar al diseño PCB. El tamaño era relativamente pequeño, así que la caja a diseñar debía contener toda la circuitería, fuente de poder, memoria, conectores, etc.

3.2 Materiales y dispositivos

La idea de diseñar un sistema personalizado, propio, es utilizar y adaptar tecnología al servicio del proyecto. Además de que estos se consiguieran en el país, para posibles repuestos y mejoras. Para medición de corriente se cuenta con el

sensor SCT-013, el cual permite hacer mediciones hasta 100A sin necesidad de conectar o tocar el cableado eléctrico, No invasivo, similar a una pinza amperimétrica. Así se puede apreciar en la Figura 8, el sensor, la pinza y un multímetro. Donde se tiene que para medir corriente con el multímetro hay que abrir el circuito, asea desconectar un cable.



Figura 8. Sensor, Pinza Amperimétrica, Multímetro

Para la adquisición de los datos y almacenamiento de la información se trabaja de manera inicial el Arduino. Esta plataforma es de fácil programación y para el primer prototipo es el adecuado [18]. Se planea para una segunda versión, utilizar Raspberry que es una tarjeta de más capacidad y de más envergadura de trabajo [19]. Mientras tanto en la Figura 9 se muestra la tarjeta Arduino Uno y una pantalla LCD de 128x64 pixeles. La unidad de procesamiento es el Arduino que va interno en el prototipo, mientras que la LCD será la parte externa para visualizar las mediciones en tiempo real y el acumulado.

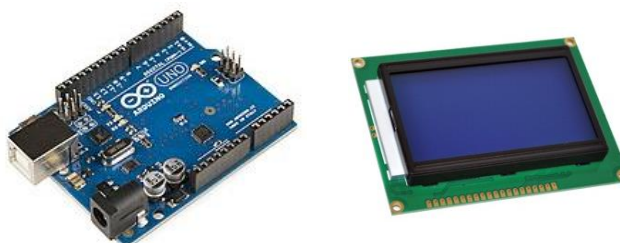


Figura 9. Arduino Uno y Pantalla LCD

También se observa las tarjetas para la comunicación entre el prototipo y el computador que almacena la información, Figura 10. La ESP8266 utiliza el protocolo IEEE 802.11 y tiene una potencia justa para comunicación usando mas acces point para tener una cobertura mas amplia. La otra tarjeta es un modulo para tarjeta de memoria micro SD, esta se usara para guardar información en el prototipo y posterior descarga, para tener un backup de la información en la base de datos, o si por fallas en la comunicación deja de guardar en el servidor. En esta tarjeta la capacidad esta limitada al valor de la misma, 4GB, 8GB o 16GB.

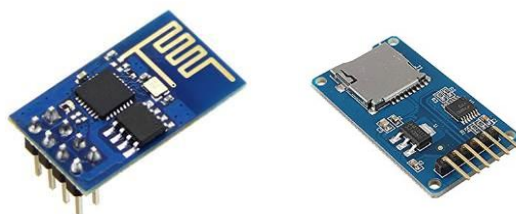


Figura 10. Módulos Wifi y microSD

3.3 El Primer Prototipo

Para proyectar el prototipo se comenzó con diseños previos en 2D y 3D. Revisando los circuitos electrónicos se concluyó que lo mejor era fabricar una sola unidad que contuviera todo, que se pudiera instalar cerca de la caja de circuitos, para así poder tener acceso de manera cómoda a las conexiones a medir. La Figura 11 tiene un bosquejo preliminar de la caja en acrílico para armar el prototipo de manera que se pueda instalar en la pared y que pueda visualizar información requerida. Como hay varios circuitos en las cajas de distribución, se podría implementar la medición de varias líneas al tiempo, por ejemplo 3 o 4 sensores más.

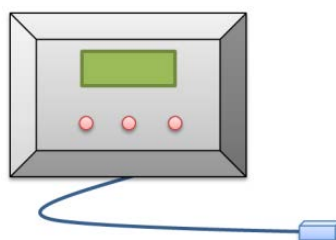


Figura 11. Prototipo

3.4 Software

Para desarrollar el programa que manejara la base datos se usara PHP y MySQL, estas aplicaciones son en entorno web [20], y tienen una capacidad lo suficiente para albergar la información de más de 5 sensores en un año. Los registros más importantes serán el valor de corriente y la fecha y hora de la medición, y esta se tomaría cada 30 segundos para el prototipo inicial. Estas muestras se guardarán en un Computador (PC) que estará conectado a la red WiFi del edificio (o en su defecto una red propia). La secuencia de la aplicación será calcular la potencia instantánea cada 90 segundos (40 Muestras cada Hora) para después hallar una potencia por Hora, en la siguiente ecuación se muestra el proceso planteado. 1 hora dividida en 40 muestras da 0.025, este es el valor a multiplicar para acumular la sumatoria en un lapso de una hora.

Potencia Instantánea (KW): P

Muestra de Corriente (A): $M_n (n=0, 1, 2, 3, 4\dots)$

Voltaje (V): $V_{ac} (117V \text{ aprox.})$

$$P = M_n \times V_{ac} / 1000$$

$$\text{Consumo (KWH)} = \sum_{n=1}^{40} (P \times 0.025)$$

Podría tener la medición del consumo acumulado, por software se puede establecer inicio de la medición. Para llevar un acumulado, en este se van sumando las potencias en el lapso de 1 hora y allí se obtendría el consumo en 1 hora (KWh). La Figura 12 muestra la interface de la base de datos, donde se crean y editan las tablas y registros, no es amigable para cualquier usuario, esta es para quien desarrolla el software del sistema.

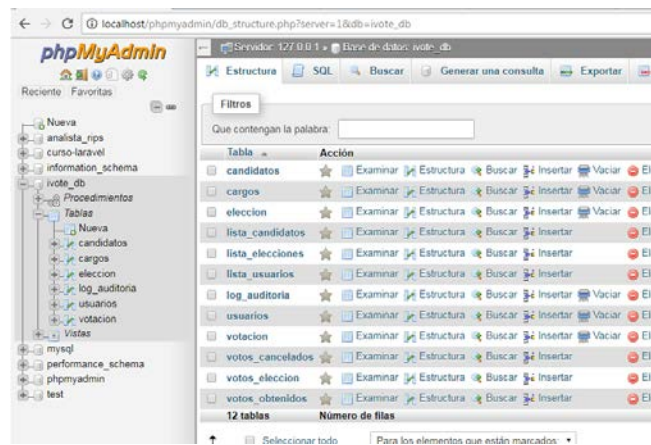


Figura 12. Interface de la Base de datos MySQL

Adicionalmente, hay que desarrollar una aplicación que es la que manipulara el usuario final, para ello se codificara en PHP y se diseñara una interface que visualice la información necesaria y que sea fácil de manipular y configurar. En la Figura 13 hay un diseño preliminar de la interface de usuario la cual muestra la potencia acumulada y la corriente de consumo en tiempo real, aunque no está terminada, la opción de configuración permitirá editar los periodos de medición, fechas y horas.

Circuito 1: Iluminacion Piso 2



Figura 13. Interface aplicación de monitoreo

La Figura 14 muestra un ejemplo de cómo las muestras toman una medición cada 90 segundos en una hora. Quiere decir que el KWH es una aproximación muy cercana al valor real.



Figura 14. Grafica de muestras vs potencia

4. LA IMPLEMENTACION

Para llevar a cabo la implementación del proyecto se establecieron etapas de trabajo, en ellas se busca hacer pruebas para poder analizar y realizar los cambios que se vallan requiriendo.

4.1 Edificio a trabajar

Es necesario conocer el consumo energético del edificio para cualquier estudio relacionado [21]. Siguiendo en concordancia se presenta este primer análisis, en la Tabla 1 se ve un listado de las cargas eléctricas más comunes.

Tabla 1. Tabla de carga y consumo

Piso/salón	Ventiladores	Luces	Tomacorrientes	TV
201	3	5	4	x
202	3	6	4	x
203	3	6	4	x
204	4	12	9	1
205	4	12	11	1
206	3	6	4	x
207	3	6	3	x
208	3	5	4	x

En la Figura 15 se aprecia el edificio en cuestión, de acuerdo a lo planteado y comparando la edificación, es una propuesta ambiciosa y de largo desarrollo.



Figura 15. Edificio Raúl y Lucía de UNIMETA

4.2 Pruebas de laboratorio

Este tipo de pruebas empieza con mediciones simples en cables de cautín o bombillo, así se compara los resultados. La pinza FLUKE será el patrón para calibrar el prototipo. El sensor genera una señal de voltaje análoga, al medir una corriente AC va a dar valores positivos y negativos como la Figura 16a; para poder digitalizarla y trabajarla con el microcontrolador hay que hacer una modificación para que esta señal sea solo de valores positivos como en la Figura 16b.

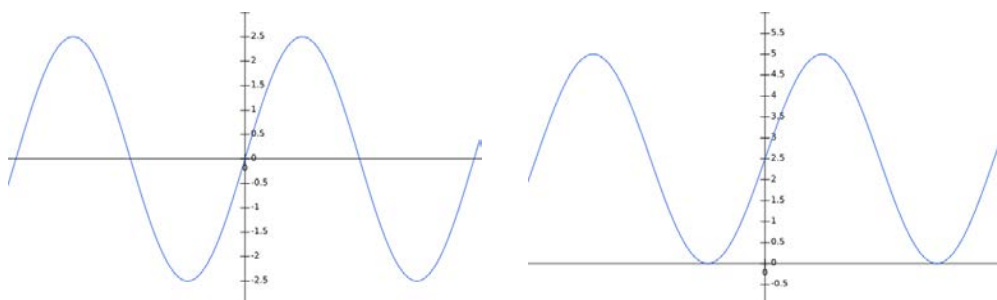


Figura 16. a. Señal analoga del sensor b. Señal analoga desplazada

Además de los valores positivos y negativos en la medición, hay que tener en cuenta otros aspectos no menos importantes. Las pruebas iniciales fueron sobre cargas resistivas, bombillos incandescentes o cautines; en análisis de circuitos se tiene que para cargas inductivas o capacitivas la señal de corriente y voltaje tienen un desfase [22], entonces para hallar la potencia va haber inconsistencias. Allí aparece el factor de potencia. Para el proceso de calibración, hay que tener en cuenta el hardware (circuitería) y el software (código), es importante manejar el voltaje eficaz (V_{RMS}) y el factor de potencia por medio de la codificación en el Arduino.

4.3 Pruebas de campo

Para la realización de pruebas directamente en el edificio, se tiene programado varias sesiones. Unas que son de calibración en campo, midiendo con la pinza amperimétrica y con el prototipo al mismo tiempo por periodos cortos (segundos o minutos) y en diferentes circuitos; otras que son por periodos largos (horas o días) pero en un circuito específico. Para encantar los tableros de circuitos hay que recurrir al reglamento de instalaciones eléctricas [23] para conocer y tener cuidado en los puntos a medir en el tablero. En la Figura 17 se observa un tablero de un piso del edificio, allí se realizarán las mediciones sobre las líneas de salida de los Automáticos (*breakers*) de los circuitos de iluminación principalmente.



Figura 17. Tablero de circuitos

5. LOS RESULTADOS

Este proyecto se está desarrollando aun, por consiguiente, los resultados son parciales, aunque se puede decir que son muy significativos debido a los avances. La planeación de lo que se quiere hacer y la realidad de la ejecución dan unas experiencias de buen talante a los estudiantes que hasta ahora están empezando a desempeñarse en un proyecto. Por una parte el trabajo planeado para laboratorio, que es lo que más han hecho durante la carrera, les demostró que sin orden el trabajo se puede extender y o dar los resultados esperados, mientras que el desarrollo en campo muestra nuevas perspectivas y plantea nuevas situaciones para resolver, entre ellas el quehacer logístico; pues este no se tiene en cuenta en la mayoría de la planeación y es un factor determinante, cumplir reglamentos para trabajar en zonas no habilitadas al público, permisos y autorizaciones para acceder a información propia de la institución, entre otras. Estos y algunos más factores retrasaron el desarrollo de varias pruebas y actividades propuestas.

5.1 Teóricos

Fue importante trabajar temáticas interdisciplinarias, tales como las de ingeniería eléctrica e ingeniería de sistemas para un trabajo proyectado desde ingeniería electrónica. Al conocer conceptos y legislación al respecto del sistema eléctrico colombiano. Para los estudiantes el planteamiento del proyecto significó mucho, en cuanto a la resignificación del conocimiento adquirido del plan de estudios. El contexto práctico de la ejecución del mismo lleva a los estudiantes a un nivel de experiencia superior al planteado en cualquier currículo. Cuando se hicieron las primeras consultas para la documentación del proyecto se encontró el Registrador Trifásico como instrumento de medición muy completo, y se pudo establecer que la Institución tenía uno, y que el laboratorio de Ingeniería Eléctrica contaba con él para sus prácticas, tiene una gran variedad de aplicaciones, inclusive lo que se planteó en este proyecto, medición de corriente en tiempo real. Esta por establecer los cálculos de error en las mediciones con el Prototipo y con un medidor genérico para el proceso de calibración, error absoluto y error relativo darán las pautas para ir perfeccionando el dispositivo [24].

5.2 Prácticos

Al medir circuitos de iluminación e ir a comprobar que luces estaban funcionando y que potencia nominal especificaba cada bombillo o lámpara se pudo constatar que no hay que estos datos son bajo condiciones ideales, por ejemplo; los valores de los voltajes en el edificio varían 112V, 116V e incluso se llegaron a tener valores de 123V. Hasta el momento de presentar este documento se había podido medir en diferentes circuitos por lapsos de tiempo no superiores a 5 horas. La recopilación de mediciones en la base de datos funciona bien, los únicos traspies han sido las fallas eléctricas en el suministro de energía para el *router* y el computador, estos deben estar siempre encendidos. Cuando se quiso

iniciar la caracterización de las cargas en el edificio, se pudo evidenciar que hay bastantes circuitos, y que casi no se tienen en cuenta, el funcionamiento del ascensor, el sistema contra incendios, la grifería y sanitarios que usan electrónica; pero al consultar los planos eléctricos fue difícil tener acceso, así que hubo que verificar directamente en la caja de circuitos las cargas correspondientes.

5.3 Sugerencias

El proyecto aún está en ejecución, los avances son significativos y se pueden hacer unos aportes que impulsaran una mejor aplicación de este trabajo.

Primero que todo el uso de Arduino es solo a modo de prototipo, como se ha explicado, para un desempeño más riguroso se debe diseñar un circuito con un microcontrolador independiente o en cambio se podría usar una tarjeta más robusta y de mejor desempeño para trabajo continuo.

Para que el prototipo tenga mayor impacto debería manejar al menos 5 sensores, con esto se lograría monitorear varios circuitos al tiempo, al respecto, estaría en el usuario establecer que medir, si por piso, por carga, por salón, o donde se quiera instalar el prototipo. Para llevar a cabo la finalidad de este proyecto, que es en el edificio principal de la institución, habría que poner a funcionar al menos 15 sensores.

Para que la conexión WiFi funcione al cien por ciento bien, con un gran número de sensores en el edificio, se debería probar con una red inalámbrica dedicada al sistema, para evitar congestión en el flujo de datos constantemente. Igualmente se debería tener un computador como servidor local para almacenar todos los registros de las mediciones, y después hacer su respectivo análisis.

La base de datos no se ha probado con varios sensores al tiempo, por consiguiente, no se tiene evidencia del registro de mucha información, del tráfico abultado de mediciones, así que falta hacer pruebas de este tipo.

La Corporación Universitaria del Meta es pionera en la región con su programa de ingeniería eléctrica y hace parte de las 3 únicas universidades de la región que tiene el programa de ingeniería electrónica. A pesar de esto no posee un laboratorio o sitio para realizar prácticas especializadas en energías renovables. Por esto, la universidad debería ser un ejemplo en la producción de energía limpia con cero emisiones para contribuir a su propio beneficio formativo, autosustentable y de innovación, encaminando a sus futuros profesionales que serán el pilar fundamental del desarrollo para la región. Por ello se quiere sugerir la implementación de paneles solares, aprovechando la terraza del edificio, si se logra el monitoreo y la caracterización de las cargas, se puede hacer un estudio de viabilidad para soportar parte del consumo con energía solar. Esto podría ayudar a disminuir el pago por el consumo energético. La Figura 18 tiene un panel típico para el uso de la energía fotovoltaica.



Figura 18. Panel solar

REFERENCIAS

- [1] K. Urrego & A. Melo, "Interruptores con WiFi para control y monitoreo Domotico (internet de las cosas)", *Investigación Formativa en Ingeniería*, 2ed. Medellín, Colombia, 2018.
- [2] F. Sánchez Albavera, "América Latina y la búsqueda de un nuevo orden energético mundial", *Nueva Sociedad* 204, 2006.
- [3] S. V. Astudillo León & A. S. Peralta Verdugo, "Análisis de la influencia de las variables tecnológicas en la disminución del consumo de energía eléctrica de refrigeradores domésticos, mediante la metodología de la dinámica de sistemas" Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2017.
- [4] UNEP., "Governing Council of the United Nations Environment Programme" Twenty-seventh session of the Governing Council/ Global Ministerial Environment Forum. Nairobi, 2013.
- [5] L. H. Balza, R. Espinasa & T. Serebrisky, "Necesidades de Energía para América Latina y el Caribe al 2040" Banco Interamericano de Desarrollo, 2016.

- [6] M. F. Coviello & B. Ruchansky, "Avances en materia de energías sostenibles en América Latina y el Caribe" *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*, 2017.
- [7] G. Arencibia-Carballo, "La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica", *REDVET - Revista electrónica de Veterinaria*, Vol. 17, No. 6, 2016.
- [8] L.M. Iannelli & S. Gil, "Ahorro de 1,5 GW en los picos de consumo eléctrico- Iluminación LED", Universidad Nacional de San Martín- Buenos Aires-Argentina, 2015.
- [9] E. J. Barrera Cabal, "Revisión de emisiones de co2 en colombia por la generación energía eléctrica para el sistema interconectado nacional en época de fenómeno de el niño entre los años 1990- 2016" Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2017.
- [10] WEC, "Energy Trilemma Index: Benchmarking the sustainability of national energy systems", *World Energy Council*, 2015.
- [11] C. Torres Navarro, M. Saleté Waltrick & C. Flores Canales, "Metodología para el seguimiento, medición y análisis energético de una planta manufacturera", *Revista de Ingeniería Energética*, Vol. 37, No 2, pp. 97-105, 2017.
- [12] F. Vera León, R. Mendoza Bravo & H. Plaza, "Estudio, Instalación, Aplicación de Normas y Descripción de los Sistemas de Mediciones de Potencia Eléctrica en Baja y en Media Tensión" Escuela Superior Politécnica Del Litoral (ESPOL), Guayaquil-Ecuador, 2011.
- [13] J. Flores Figueroa, M. A. Romero Ochoa, M. Soto Rodriguez & M. G. Vazquez Palma "Diseño de un medidor de energía eléctrica bidireccional y monitoreado mediante aplicación móvil" *Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, Vol. 7, No. 13, 2018.
- [14] Ministerio de Minas y Energías, "Reglamento Técnico de Etiquetado RETIQ", Res. 4-1012, septiembre, 2015. [Online]. Disponible: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/36731-Resolucion-41012-18Sep2015.pdf> [Accedido Mar. 26, 2019].
- [15] Ministerio de Minas y Energías, "Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP", Res.18-1331, Agosto, 2009. [Online]. Disponible: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/36906-Resolucion-40122-8Feb2016.pdf> [Accedido Mar. 16, 2019].
- [16] Congreso de La República, "Ley 1715 de 2014: Regulacion de la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional", Mayo, 2014. [Online]. Disponible:http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html [Accedido Mar. 21, 2019].
- [17] IEEE Standar, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1992
- [18] O. Torrente Artero, *Arduino: curso práctico de formación*. Libros RC. Madrid, 2013.
- [19] M. Richardson & S. Wallace, *Getting started with Raspberry Pi*. Maker Media. California, USA, 2013.
- [20] A. Cobo, P. Gómez, D. Pérez & R. Rocha, *PHP y MySQL: Tecnología para el desarrollo de aplicaciones web*. Ediciones Díaz de Santos, España, 2005.
- [21] O. Carmona, A. Vidal, A. G. Martínez, J. Conde & J. C. Tinoco, "Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda" *QUID No. 26*, 2016, pp. 29-38
- [22] R.L. Boylestad & L. Nashelsky. *Electronica: Teoria de circuitos*. Pearson education, 6ta Ed., 1997.
- [23] Ministerio de Minas y Energías, "Reglamento Técnico de Instalaciones Electricas RETIE", Res. 9-0708, Agosto, 2013 [Online]. Disponible:<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13> [Accedido Mar. 14, 2019].
- [24] O. J. Jácome Riera & J. G. León Amores, "Diseño y construcción de un sistema de medición inteligente para la gestión de la energía eléctrica y medición de agua potable en los hogares" Universidad de la Fuerzas Armadas, Latacunga, 2014.

Diseño de un dispositivo mecánico como apoyo a la rehabilitación física del canal carpiano y/o lesiones de muñeca

Brossnan F. Vargas G.¹

Daniel H. Albarracín²

Harol S. Ricaurte C.³

^{1,2} Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL

³ Instituto de Fracturas S.A.S. Yopal
Colombia

Este capítulo presenta el diseño de un dispositivo mecánico que permite replicar los ejercicios fisioterapéuticos para la rehabilitación física del Síndrome de Túnel Carpiano (STC) y/o lesiones de muñeca. La investigación se desarrolla en tres fases, en primera la fase se determinan las patologías y lesiones más comunes que afectan las extremidades superiores y sus incidencias en las diferentes edades y géneros, para identificar la población a la cual va dirigida el proyecto, en la fase dos, y con la asesoría de un profesional en fisioterapia, se seleccionan los ejercicios fisioterapéuticos más importantes para implementar en el diseño y se determinan los requerimientos mecánicos del dispositivo, y finalmente en la fase tres, recopilando la información adquirida y los requerimientos anteriores, se diseña el mecanismo, utilizando software CAD SolidWorks® con herramientas de simulación para determinar los materiales y verificar el cumplimiento de los movimientos requeridos.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de diseñar dispositivos para acelerar la rehabilitación fisioterapéutica de la muñeca y mano, surge debido a que la mano es la herramienta principal para desarrollar actividades cotidianas del ser humano, y es de vital importancia que se evite la pérdida de funcionalidad muscular esquelética y de los tendones flexores de la muñeca. Existen diferentes causas que pueden desarrollar patologías relacionadas al túnel carpiano como accidentes, lesiones, intervenciones quirúrgicas o enfermedades. El uso de la fisioterapia es de vital importancia en la rehabilitación y empleada en ejercicios cotidianos puede prevenir la patología del STC, realizando el movimiento de las articulaciones evitando la tensión muscular, ayudando a la recuperación de la motricidad después de que existan periodos de inmovilización, recuperar fuerza muscular, así mismo, retrasa la deformación de la mano en enfermedades reumáticas.

Existen diferentes dispositivos para la rehabilitación de la mano y muñeca, como El robot exoesqueleto Inmoto WRIST, la Mesa de Kanavel, Amadeo® de tyromotion, Sistema Diego® de tyromotion y otros diseños mecatrónicos de inspiración biológica para la actuación de una ortesis para rehabilitación y asistencia de manos. La relación que presenta estos dispositivos es que tienen un costo muy elevado, grandes dimensiones y no son portátiles, por esta razón el proyecto busca generar una solución generando un producto de calidad a bajo costo, portátil de fácil uso y adquisición.

Esta investigación proyecta diseñar un dispositivo mecánico, mediante un software de diseño, que permita replicar los ejercicios fisioterapéuticos para apoyar la rehabilitación física del túnel carpiano y/o lesiones de muñeca. Se tendrá como finalidad identificar, la composición de la mano y la muñeca, las afectaciones que generan la patología del síndrome de túnel carpiano y los ejercicios fisioterapéuticos para la rehabilitación del síndrome, así como establecer las dimensiones antropométricas de la población estudiada, la biomecánica para los movimientos de la muñeca y se determinan los grados de libertad del mecanismo.

La patología del túnel carpiano es uno de los principales problemas de salud de las personas que desarrollan tareas relacionadas con esfuerzos manuales intensos y movimientos repetitivos del miembro superior (mano y muñeca) [1], a partir de esto, se despertó el interés por realizar el dispositivo, que permita acelerar la rehabilitación física de la mano o muñeca en personas con patología de túnel carpiano, por medio de ejercicios fisioterapéuticos apoyados por un dispositivo mecánico. Se espera apoyar la labor del fisioterapeuta y de igual forma, que los pacientes mantengan su motivación y constancia al realizar los ejercicios, de este modo obtener los resultados deseados en la recuperación.

2. MÉTODO

2.1 Recopilación de datos

Este proyecto está basado en la rehabilitación física de patologías de la mano y la muñeca, los ejercicios de rehabilitación tienen como objetivo tratar algunos de los problemas o alteración de movilidad que sufre estas extremidades superiores, por esto, es muy importante reconocer la naturaleza de la mano y la muñeca, y entender así las anomalías, lesiones o enfermedades que pueden llegar a tener.

¹ brossnanvargas@unisangil.edu.co

² dalbarracin@unisangil.edu.co

³ harolsivens18@hotmail.com

La muñeca y la mano están constituidas por un conjunto de articulaciones complejas de una manera muy fina, y cuya función es la más importante del sistema muscular esquelético, ya que interviene en la gran mayoría de actividades de la vida diaria. Además, por su gran representación en la corteza cerebral motora, la mano es la porción de la extremidad superior más activa del cuerpo humano, tanto en los trabajos pesados como en los más finos y sutiles [2]. Podemos observar los huesos de la muñeca en la Figura 1. Algunas de las principales partes por las que esta constituidas las mano y la muñeca son:

- Huesos de la muñeca
- Ligamentos y tendones
- Músculos
- Extensores y flexores de la muñeca

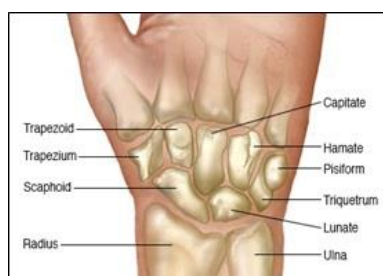


Figura 1. Huesos de la muñeca [3]

2.2 Patologías de la muñeca y mano

Cuando se hable de patología se debe considerar una pérdida de alguna funcionalidad del elemento anatómico. Si las personas sienten dolencia al realizar un movimiento o carecen de movilidad de la mano, ya sea en zona carpiana o en las falanges, se trata de alguna anomalía que debe ser estudiada y tratada. Las patologías de la mano son muy variadas, abarcan alteraciones genéticas, lesiones traumáticas, degenerativas o tumorales, como se muestra en Figura 2 [4]. Algunas de las principales patologías que atacan a esta extremidad superior son:

- Torceduras y distensiones
- Tendinitis
- Artritis
- Artrosis de mano
- Fractura distal de radio
- Síndrome del túnel carpiano (STC)



Figura 2. Tendinitis [5]

2.3 Epidemiología

Es el síndrome de atrapamiento nervioso más frecuente. Corresponde a una mono-neuropatía causada por compresión mecánica del nervio mediano. Esta puede ser aguda, secundaria a una fractura de EDR o luxos de las fracturas del carpo; o crónica de distintas etiologías. Se caracteriza por presentar sintomatología mixta (motor y sensitiva), provocado por un aumento de presión en el túnel carpiano, compartimento inextensible formado por los huesos del carpo y el ligamento carpiano transverso de la muñeca [6]. Su prevalencia es 0,1-10% de la población siendo mucho más frecuente en mujeres. Existen factores de riesgo extrínsecos: el embarazo, hipotiroidismo e insuficiencia renal que aumentan la presión dentro del túnel por edema; y otros intrínsecos: neuropatía diabética, AR, gangliomas, tumores y tendinopatías frecuentemente asociadas a actividades repetitivas generalmente de tipo laboral [6], podemos ver algunos de sus síntomas en la Figura 3.

2.4 Causa por movimientos repetitivos

El uso repetido de algunas herramientas manuales como el teclado y la utilización de pad-mouse no ergonómicos pueden generar este Síndrome. Pero hay que tener en cuenta que el uso de teclado y mouse son sólo algunos de los

causantes [8]. Existen diversos factores de riesgo que lo pueden causar, como la torsión de la muñeca, flexión y extensión repetida de la misma, sus esfuerzos repetidos en posturas forzadas y las maniobras de presión con los dedos o la palma, como se muestra en la Figura 4. Hay una serie de actividades asociadas al síndrome del túnel carpiano como son afilar, lijar, teclear, empaquetar, remachar, martillar, pulir, abrillantar, enladrillar, fregar y las tareas de montaje. Cabe añadir que los oficios en los que comúnmente se llevan a cabo dichas actividades y por tanto sus profesionales corren más riesgo de padecer este traumatismo son: matarifes, cocineros, carpinteros y cajeros [9].



Figura 3. Síndrome de túnel carpiano [7]



Figura 4. Factor de riesgo por mala ergonomía en el trabajo [10]

2.5 Como se trata el STC

Los tratamientos para el síndrome del túnel carpiano deben comenzar lo antes posible, según las indicaciones del médico. Las causas subyacentes como la diabetes o la artritis deben tratarse primero. Generalmente el tratamiento inicial implica descansar la mano y la muñeca afectadas durante al menos 2 semanas, evitando actividades que puedan empeorar los síntomas, e inmovilizando la muñeca con una tablilla para evitar mayor daño al girarla o doblarla. Si hay inflamación, aplicar una bolsa de hielo puede ayudar a reducir la hinchazón [6]. En casos de STC avanzados se puede tratar de las siguientes formas:

- Tratamientos no quirúrgicos
- Ejercicio
- Terapias alternativas
- Cirugía

Podemos observar en la Figura 5 como se vería la cirugía de STC.

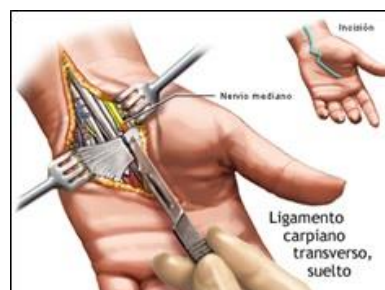


Figura 5. Cirugía de síndrome de túnel carpiano [11]

2.6 Incidencia del síndrome de túnel carpiano

El STC tiene como etiología directa la relación con labores que impliquen movimientos ligeros y repetitivos de la mano, por eso cualquier persona que realice alguna de las labores como; operarios de computadoras, dactilógrafos, cosmetólogos, cajeros, cocineros, mecanógrafos, sastrería, entre otros. Las personas que realizan actividades relacionadas a las anteriores pueden ser propensos a padecer STC, sin embargo, la edad también influye en el

desarrollo de este síndrome, a continuación, se observara la incidencia de esta patología con respecto la edad. El síndrome de túnel del carpo es una manifestación anormal, sobre todo por debajo de los 10 años (edad pediátrica), por lo que muchos pediatras no están familiarizados con este síndrome. La forma de presentación patológica difiere de la del adulto, y ello, asociado a la dificultad del niño para explicar la sintomatología, hace que su diagnóstico sea tardío, además, el STC infantil suele ir asociado a causas específicas; la más frecuente son las enfermedades de depósito lisosoma (alteraciones genéticas) [12].

Considerando que, a partir del año 1989 se han registrado solo 3 casos en infantes menores a 10 años con síndrome de túnel del carpo en España [12], como consecuencia de estas bajas cifras y pocos registros encontrados durante la investigación, este rango de edades podría ser descartado para el análisis de datos y medidas necesarias en la elaboración del proyecto. En cuanto al caso de los jóvenes entre los 11 y 29 años, en la actualidad ha crecido la atención a jóvenes con 18 años o menos, debido a la tendencia en crecimiento de los niveles de consumo de estos equipos Smartphone en el mercado [13]. Sin embargo, solo el 10% de los casos de STC son en menores de 31 años, y puede ser bilateral (ambas manos) hasta en un 50% de los casos [14]. Por ende, el porcentaje de este STC en jóvenes es bajo, por esto no se toma en cuenta este rango de edades a la hora de aplicar medidas específicas en el diseño del proyecto.

Por otra parte, la incidencia en adultos es mucho mayor, cuya frecuencia en la población general es alta, variando de 9,2 a 10% a lo largo de la vida. En estudios realizados en diversas localidades en los Estados Unidos, se ha calculado una prevalencia de esta enfermedad en la población general de 125 a 515 por 10 000 habitantes; pero recientes estimaciones de su prevalencia en la población general la sitúan en un 0,6% en hombres y en un 5,8% en mujeres [15]. igualmente, las personas con diabetes u otros trastornos metabólicos que afectan directamente los nervios del organismo y los hacen más susceptibles a la compresión también se encuentran en alto riesgo. El síndrome del túnel carpiano generalmente se produce en los adultos [6].

Así mismo, se evidencia que el síndrome del túnel del carpo prevalece en las mujeres cuatro veces más, en edades comprendidas entre 45 y 54 años, en relación a los hombres en la tercera edad. En el 15% de los casos, el síndrome del túnel del carpo es idiopático (de causa desconocida), y el resto se asocia con fractura de Colles, artritis reumatoide, agentes hormonales, diabetes mellitus, ocupación, y uso excesivo de las manos [16]. En Colombia el síndrome del túnel carpiano (STC) viene siendo uno de los principales problemas de salud en los trabajadores, según “el informe ejecutivo de la segunda encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el sistema general de riesgo, hasta el 2012, La patología musculo esquelética con mayor reconocimiento por las ARL es el Síndrome de túnel del carpo con un promedio del 42,5% frente a las demás patologías” [17].

Finalmente, el síndrome del túnel carpiano en Colombia ocupa el primer puesto de morbilidad laboral según el ministerio del trabajo. En el año 2017 Colombia presento una población de aproximadamente 22 millones de personas trabajando activamente en edades de 18 años en adelante, el 70% de esta población trabajadora se encuentra en edades entre 29 a 60 años [18], el mismo rango de edades donde el STC presenta mayor incidencia de afectación en los colombianos, por lo tanto, este proyecto va dirigido a la población con mayor prevalencia y que son más propensos a padecer el STC, la metodología y diseños del proyecto se basaran en rehabilitación fisioterapéutica, datos antropométricos y medidas de diseños, en las edades mencionadas anteriormente (29 a 60 años).

2.7 Rehabilitación

Con respecto a la información adquirida anteriormente, teniendo un conocimiento más profundo sobre la extremidad superior de la muñeca y mano, así mismo, establecida la población a la cual va ir dirigido el proyecto, es necesarios profundizar en el tema de la rehabilitación física, los ejercicios terapéuticos que se van a manejar y las medidas antropométricas. todo este conjunto de parámetros es de vital importancia para la implementación del diseño del mecanismo del proyecto.

- *Conceptos básicos de rehabilitación.* Según la Organización mundial de la salud (OMS), la rehabilitación aplicada a la incapacidad, se entiende por rehabilitación la aplicación coordinada de un conjunto de medidas médicas, sociales, educativas y profesionales para preparar o readaptar al individuo con un objeto de que alcance la mayor proporción posible de capacidad funcional [19].
- *Concepto de rehabilitación médica.* Según la Organización mundial de la salud (OMS), es la parte de la asistencia médica que trata de desarrollar las capacidades funcionales y psicológicas del individuo y, si es preciso, su mecanismo de compensación, a fin de permitirle llevar una existencia autónoma y activa [19].

2.8 Fisioterapia

De acuerdo con la OMS, la fisioterapia es el arte y ciencia del tratamiento físico por medio de la gimnasia reeducativa, el calor, el frío, la luz, el masaje y la electricidad, entre los objetivos del tratamiento figuran el alivio del dolor, el aumento de la circulación, la prevención y corrección de incapacidades y la recuperación máxima de la fuerza, la

movilidad y la coordinación [19]. La fisioterapia comprende también la ejecución de pruebas eléctricas y manuales para la determinación de la importancia de la alteración de los impulsos nerviosos y de la energía muscular, y de pruebas para precisar las aptitudes funcionales, así como la medición de la amplitud del movimiento articular y de la capacidad vital, a fin de facilitar al médico el establecimiento del diagnóstico y de registrar los progresos [19].

- *Orientación espacial.* La posición anatómica se define con la persona de pie con brazos a los lados, extendidos y con las palmas de las manos hacia delante. A partir de esto, podemos hacer “cortes” o planos de sección del cuerpo humano, como se muestra en la Figura 6 [19].
 - *Sagital:* corte longitudinal del cuerpo (o segmento) que va de anterior a posterior.
 - *Coronal:* corte longitudinal del cuerpo (o segmento) que va de un lado al otro (sentido medio-lateral).
 - *Transversal:* corte transversal del cuerpo (o segmento). Del punto de vista espacial tenemos la siguiente distribución:
 - *Anterior:* hacia delante (frente) de la persona.
 - *Posterior:* hacia atrás de la persona.

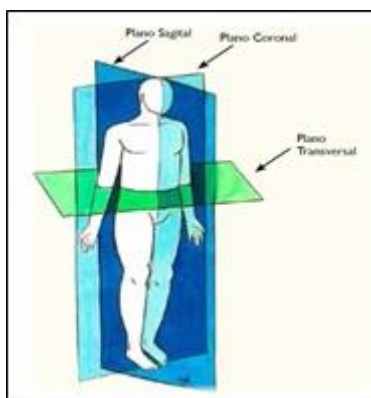


Figura 6. Planos de sección en la orientación espacial de un cuerpo en posición anatómica [20]

En el caso de la mano, anterior es sinónimo de volar (o palmar) y posterior es sinónimo de dorsal, como se muestra en la Figura 7, Así mismo, para el pie se denomina plantar para la planta del pie y dorsal para el dorso del mismo [19].

- *Lateral:* que se aleja de la línea media.
- *Medial:* que se acerca hacia la línea media.
- *Proximal:* que se acerca al origen del segmento en discusión.
- *Distal:* que se aleja del origen del segmento.

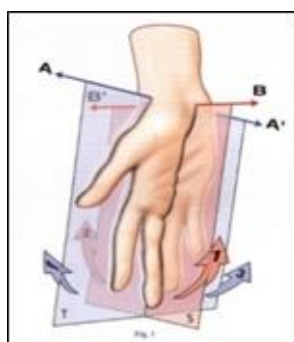


Figura 7. Planos de sección en la orientación espacial de una mano [21]

- *Movimientos* [19]:
 - *Movimiento activo:* movimiento resultado de la acción muscular de la persona. El mismo individuo moviliza sin ayuda.
 - *Movimiento pasivo:* movimiento resultado de la movilización por una fuerza externa. No hay acción muscular de la persona.
 - *Flexión:* reducción del ángulo entre los segmentos proximal y distal de una articulación, como se muestra en la Figura 8 A.
 - *Extensión:* aumento del ángulo entre los segmentos proximal y distal de una articulación, como se muestra en la Figura 8 B.

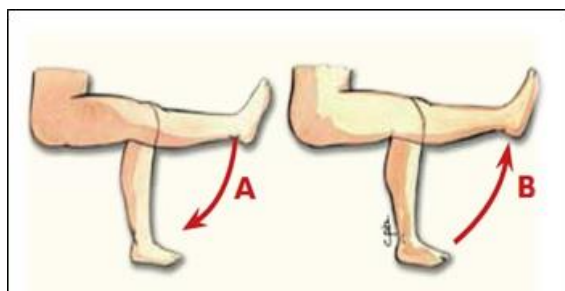


Figura 8. Flexión (A) y Extensión (B) de la rodilla [20]

- *Abducción*: movimiento hacia lateral, como se muestra en la Figura 9 B.
- *Aducción*: movimiento hacia la medial, como se muestra en la Figura 9 A.
- *Rotación interna* (o medial): giro de la superficie anterior de la extremidad hacia medial.
- *Rotación externa* (o lateral): giro de la superficie anterior de la extremidad hacia lateral.
- *Pronación*: movimiento conjunto de codo y muñeca en que el antebrazo rota internamente llevando la cara palmar hacia posterior, como se muestra en la Figura 10 A.
- *Supinación*: movimiento conjunto de codo y muñeca en que el antebrazo rota externamente llevando la cara palmar hacia anterior, como se muestra en la Figura 10 B.

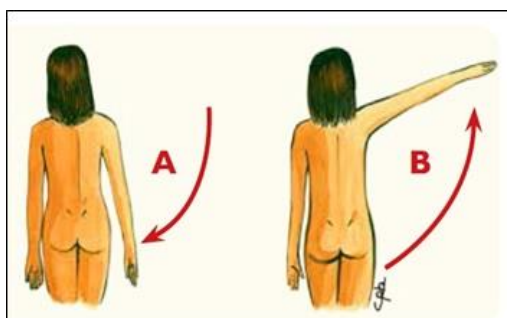


Figura 9. Aducción (A) y Abducción (B) [20]

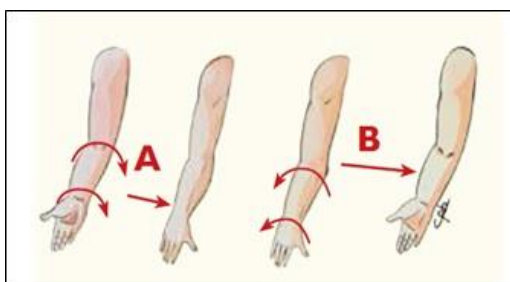


Figura 10. Pronación (A) y supinación (B) [20]

2.9 Ejercicios fisioterapéuticos para el síndrome de túnel carpiano

El tratamiento específico será determinado por el médico basándose en lo siguiente: en edad, estado general de salud e historia clínica. Qué tan avanzada está la enfermedad, procedimientos o terapias.

- *Etapas de clasificación del STC.* Existen dos etapas para clasificar el STC las cuales son:
 - *Pre quirúrgica:* comprende la disminución del dolor, edema, evitar retracciones, mejorar la amplitud del movimiento articular y aumentar la fuerza muscular.
 - *Postquirúrgica:* comprende la disminución del dolor, edema, evitar adherencia en cicatriz, mantener y/o mejorar la amplitud de movimiento articular y aumentar la fuerza muscular.

Según el estado de su lesión, el fisioterapeuta elegirá las diferentes técnicas manuales y/o instrumentales. El tratamiento de fisioterapia debe estar asociado a un reposo relativo de la articulación (para no agravar la lesión) y a medidas de prevención (para evitar que vuelva a ocurrir). En muchas ocasiones, se pueden prescribir férulas de descanso para la muñeca. Se determina la etapa pre quirúrgica para el desarrollo del proyecto debido a que los principales objetivos de las terapias son disminuir la inflamación y el dolor que ocasiona el síndrome del túnel

carpiano, recuperando la funcionalidad de la articulación de la muñeca y mano, logrando realizar los movimientos necesarios para desempeñar las actividades cotidianas. Además, el fisioterapeuta puede realizar masoterapia y estiramientos pasivos. Esto ayudará a relajar y dar flexibilidad a los tendones y musculatura flexora de la muñeca. En muchas ocasiones, cuando la inflamación de los tendones disminuye, la presión sobre el nervio mediano y el dolor desaparecen. Los siguientes ejercicios de estiramientos son los realizados en una terapia de rehabilitación para la primera etapa de STC, cada uno de los ejercicios debe realizar 10 repeticiones de 10 segundos cada una.

- *Ejercicio de neurodinamia nervio mediano.* Estiramiento del nervio mediano con movimiento de extensión con supinación, es un ejercicio para los músculos anteriores del antebrazo y estiramiento de los músculos del cuello como se muestra en la Figura 11.

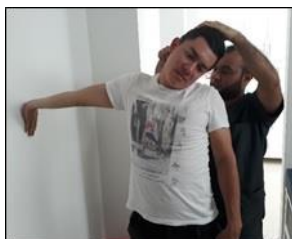


Figura 11. Neurodinamia nervio mediano

- *Ejercicio de estiramiento de los flexores del antebrazo y muñeca.* Este estiramiento de los músculos flexores se ubican las palmas de las manos en una parte plana y con los dedos mirando hacia atrás y sin doblar los codos, con el cuerpo levemente inclinada para ejercer una fuerza como se muestra en la Figura 12.

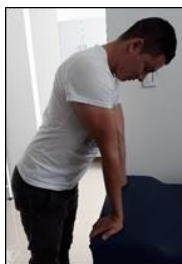


Figura 12. Estiramiento de flexores del antebrazo y muñeca

- *Masaje de la muñeca.* Se flexibiliza el ligamento transversal del carpo, los músculos de antebrazo y mano con movimientos circulares y extendidos a lo largo del antebrazo, buscando todos los flexores de la muñeca, como se muestra en la Figura 13, si el masaje se realiza junto con el estiramiento de extensión con supinación (como se observa en la Figura 11) tendrá un mayor rendimiento.

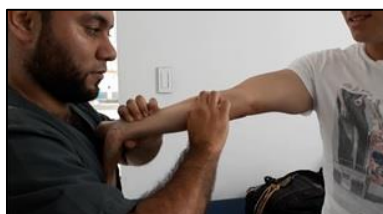


Figura 13. Masaje de muñeca

- *Flexión de la articulación de la muñeca.* De pie o sentado colocando el antebrazo sobre una mesa con la mano cerrada (haciendo puño), abierta o casi cerrada se realizan lentamente movimientos de flexión de la muñeca, en el momento que existe este movimiento de la mano el nervio mediano se desplaza proximalmente al antebrazo como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Ejercicio pasivo de Flexión de la muñeca

- *Extensión de la articulación de la muñeca.* De pie o sentado y con el antebrazo apoyado sobre una mesa, se lleva la mano hacia arriba, ayudándose con la mano sana para conseguir la máxima extensión (flexión dorsal), en el momento que existe este movimiento de la mano el nervio mediano se desplaza hacia adelante como se observa en la Figura 15, mantener la posición 5-10 segundos y volver a la posición inicial de reposo.



Figura 15. Ejercicio pasivo de extensión de la muñeca

- *Ejercicios de desviación cubital y radial.* Con la mano abierta y dedos extendidos, se realizan movimientos con la muñeca dirigiendo la mano, primero hacia afuera como en la Figura 16A, a esto se le llama desviación cubital, se mantiene 5-10 segundos para posteriormente relajar volviendo a la posición de reposo. Se continúa moviendo la mano hacia dentro como en la Figura 16B generando una desviación radial, mantener otros 5-10 segundos y volver a la posición de reposo.

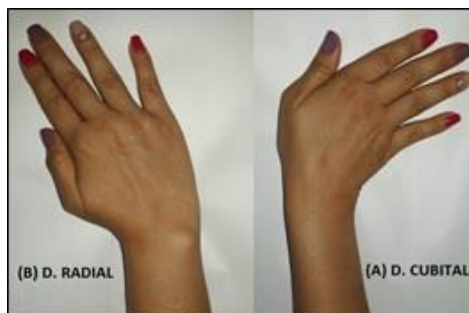


Figura 16. Ejercicios de desviación radial y cubital

- *Ejercicios de pronación y supinación.* con las manos vacías y extendidas, se realizan movimientos de pronación y supinación para trabajar el recorrido articular, de pie o sentado a una mesa, con el brazo apoyado sobre un cojín y el codo doblado, se gira la mano para intentar mirar la palma generando el movimiento de supinación (Figura 17A), Posteriormente se gira en el otro sentido, intentando mirar el dorso de la mano generando el movimiento de pronación (Figura 17B), ambos ejercicios se mantienen por 10 segundos y descansar.



Figura 17. Ejercicios de movimiento de supinación (A) y movimiento de pronación (B)

2.10 Selección de ejercicios fisioterapéuticos para la implementación en el diseño

Como se ha dicho anteriormente, la finalidad u objetivo de la fisioterapia es recuperar todos los arcos de movilidad de la articulación de la muñeca, siendo los principales la pronosupinación, desviaciones radial y cubital y flexo extensión de la muñeca. Estos movimientos son los que permiten que la persona realice actividades cotidianas como abrir una puerta, peinarse, tomar café, cepillarse, etc. Es fundamental que la persona que presente diagnóstico de STC en primera etapa realice una debida terapia de estiramientos con los ejercicios mencionados anteriormente, teniendo en cuenta los principales movimientos a recuperar, se definen los siguientes ejercicios fisioterapéuticos para implementar en el proyecto:

- Ejercicios de desviaciones cubital y radial
- Ejercicios de flexión y extensión

2.11 Dimensiones antropométricas

La Antropometría es la encargada de estudiar las dimensiones corporales de las personas, de acuerdo con las características de los grupos poblacionales. La antropometría es necesaria para la comprensión del hombre o la toma de decisiones que afectan nuestra forma de relacionarnos con el mundo, razón por la cual, ha sido una herramienta utilizada por diferentes profesiones. Para los diseñadores, es fundamental en el desarrollo de objetos con los cuales las personas deben interactuar, ya se trate de herramientas, maquinaria, mobiliario, ropa, juguetes, etc. [22].

- *Postura adecuada del paciente y sus dimensiones antropométricas.* las causas del síndrome del túnel carpiano, son muchas y variadas, una de ellas son los malos hábitos a la hora de realizar labores en el trabajo, en la casa, etc. Por este motivo es fundamental que a la hora de realizar los ejercicios fisioterapéuticos se deba tener una adecuada postura de trabajo, a continuación, en la Figura 18, se presentan las respectivas dimensiones antropométricas de las posturas adecuadas para la realización de los ejercicios fisioterapéuticos ya establecidos para la aplicación del proyecto [22]. En la Tabla 1 se observan las dimensiones de las posturas de trabajo mostradas en la Figura 18.

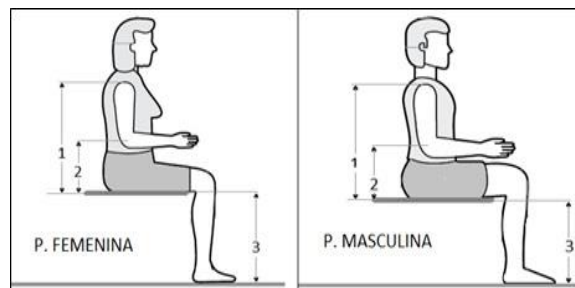


Figura 18. Postura de trabajo del sexo femenino y masculino adecuada para la realización de los ejercicios fisioterapéuticos [22]

Tabla 28. Postura y dimensiones antropométricas del sexo masculino y femenino, edades de 20 a 59 años [22]

Dimensiones	Fem. 20 - 59 años (n = 785)				Masc. 20 - 59 años (n =1315)			
	\bar{X}	Percentiles			\bar{X}	Percentiles		
		5	50	95		5	50	95
1 Altura acromial	55.0	51.2	55.2	58.7	58.8	54.2	58.8	63.2
2 Altura radial	22.9	19.0	23.1	26.4	23.7	19.4	23.8	27.7
3 Altura de la fosa poplíteica	38.3	35.1	38.3	41.9	42.3	38.7	42.4	46.1

- *Medidas antropométricas de la mano, muñeca y antebrazo.* De acuerdo con la información anterior se obtuvieron datos de las dimensiones antropométricas desde los 20 a los 59 años en ambos sexos de la población laboral colombiana, los que se muestran en la Figura 19. Las dimensiones antropométricas de cada parte de la Figura 19 se ven reflejadas en la Tabla 2.

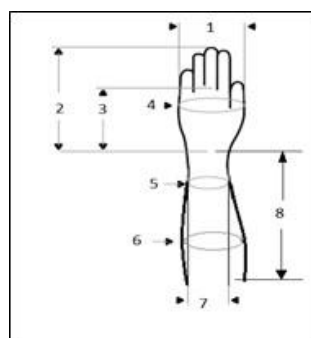


Figura 19. Medidas antropométricas de la mano, muñeca y antebrazo [22]

Tabla 29. Dimensiones antropométricas de la mano del sexo masculino y femenino, edades de 20 a 59 años [22].

DIMENSIONES	Fem. 20 - 59 años (n = 785)				Masc. 20 - 59 años (n =1315)			
	\bar{X}	Percentiles			\bar{X}	Percentiles		
		5	50	95		5	50	95
1 Anchura de mano	7.4	6.9	7.5	8.1	8.4	7.7	8.4	9.1
2 Largura de la mano	16.6	15.5	16.6	18.0	18.3	16.8	18.3	19.9
3 Largura palma de la mano	9.3	8.4	9.2	10.1	10.2	9.3	10.3	11.2
4 Perímetro metacarpiar	17.9	16.5	17.9	19.4	20.3	18.7	20.3	22.1
5 Perímetro de la muñeca	14.6	13.5	14.6	16.0	16.4	15.1	16.4	17.9
6 Perímetro antebrazo	23.5	20.9	23.4	26.8	26.8	24.0	26.8	29.8
7 Anchura de muñeca	4.9	4.5	4.9	5.5	5.5	5.0	5.5	6.0
8 Longitud del antebrazo	23.26	21.05	23.30	25.47	25.64	23.40	25.60	27.88

De acuerdo a la Tabla 2 se realiza una gráfica de comparación de los datos obtenidos de la población laboral femenino y masculino de Colombia, como se muestra en la Figura 20, para identificar y diferenciar con mayor facilidad las dimensiones antropométricas de cada una, para esto, se tomaron los datos promedios de cada una de las dimensiones.

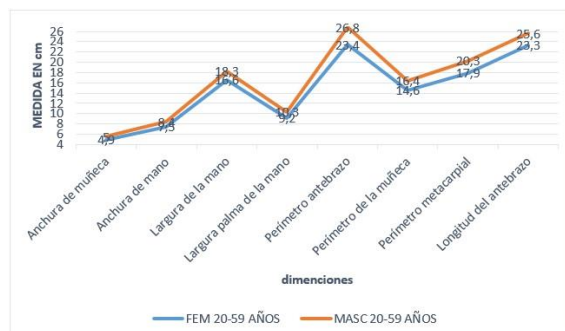


Figura 20. Gráfica comparativa de las dimensiones antropométricas de la mano, muñeca y antebrazo del sexo masculino y femenino, edades de 20 a 59 años

Dado que el prototipo del mecanismo del proyecto se podrá adaptar a las diferentes medidas del rango de edades establecidas (29 a 60 años), tanto femeninas como masculinas, para su diseño se utilizarán las dimensiones de mayor volumen del promedio de la población estudiada, siendo las dimensiones masculinas las que presentan esta característica, como se puede evidenciar en la (Figura 20).

2.12 Biomecánica de la muñeca

La biomecánica es la disciplina que estudia los aspectos mecánicos que se producen en los organismos biológicos, que comprende a los segmentos óseos como palancas, las articulaciones como los puntos de apoyos, los músculos agonistas como la fuerza de potencia, y la sobrecarga como las fuerzas de resistencia. En relación con los elementos biomecánicos en el complejo articular de la muñeca, considerando el conjunto de huesos, articulaciones y músculos que lo forman, se observa que este sistema permite el desarrollo de distintos tipos de movimientos complejos en diferentes planos del espacio, como se observa en la Figura 21 [23].

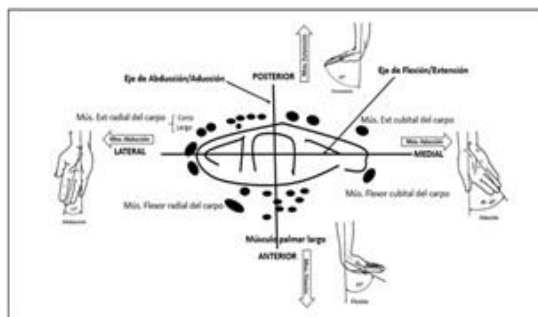


Figura 21. Movimientos de la muñeca en diferentes planos del espacio [24]

- Movimientos de flexión de la articulación de muñeca.** El movimiento de flexión, inclinación de la palma de la mano hacia la cara anterior del antebrazo, se inicia en la segunda hilera del carpo que provoca la tensión de los ligamentos de la articulación medio carpiana (principalmente el ligamento piramidal-trapecio-trapezoide) para acabar moviendo el escafoide (que moverá el semilunar y piramidal) [24]. Arco de movilidad en flexión: de 0° a 80°- 85°, como se visualiza en la Figura 22. Durante la flexión intervienen las articulaciones intercarpianas en aproximadamente un 60% y la articulación radio carpiana en un 40%.

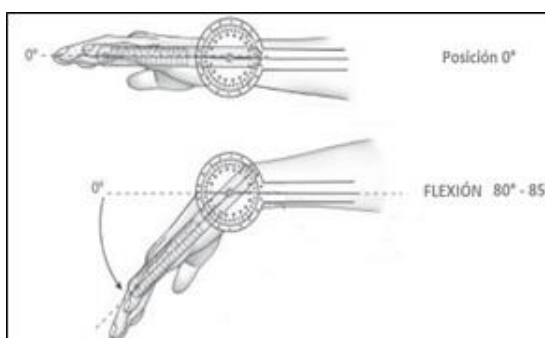


Figura 22. Arco de movimiento de la articulación de la muñeca en flexión [25]

- *Movimientos de extensión de la articulación de muñeca.* El movimiento de extensión, aproximación de la cara dorsal de la mano hacia el dorso del antebrazo, y, a diferencia del movimiento de flexión, este movimiento se debe fundamentalmente a la articulación radio carpiana, que aporta aproximadamente el 66% del rango y menos a las articulaciones medio carpianas que contribuyen con el 34%. Esto se debe a que la cara articular del radio se extiende dorsalmente más que las caras articulares distales del semilunar y el escafoides. La extensión de la muñeca se reduce si se asocia a la extensión previa de los dedos [24]. Arco de movilidad en extensión: de 0° a 70°-80°, como se visualiza en la Figura 23.

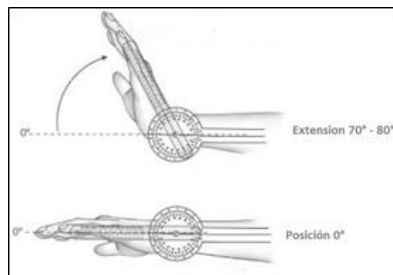


Figura 23. Arco de movimiento de la articulación de la muñeca en extensión [25]

- *Movimientos de desviación radial de la articulación de muñeca.* El movimiento de abducción es la inclinación radial de la muñeca, dado que la estiloides cubital es más corta que la radial. Este movimiento se inicia en la segunda hilera del sistema de huesos del carpo que se mueve hacia el radio, mientras la primera hilera se mueve hacia cubital además de flexionarse, en este movimiento el escafoides y el semilunar se desplazan medialmente, llegando este último a articularse con el ligamento triangular interno. El 60% de este movimiento es responsabilidad de la articulación medio carpiana [24]. El arco de movilidad tiene una amplitud que oscila entre 20 y 25 grados con la muñeca en supinación, como se observa en la Figura 24.

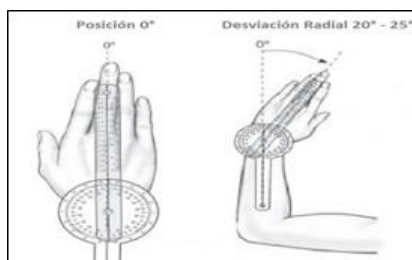


Figura 24. Arco de movimiento de la articulación de la muñeca en desviación radial [25]

- *Movimientos de desviación cubital de la articulación de muñeca.* El movimiento de aducción, inclinación cubital de la muñeca, se inicia en la segunda hilera que se mueve hacia cubital mientras que la primera se mueve a radial, generándose movimientos contrarios a la abducción en las dos hileras del hueso del carpo. Al igual que el movimiento de abducción, el 66% del movimiento es responsabilidad de la articulación medio carpiana [24]. El arco de movilidad tiene una amplitud que oscila entre 35 y 45 grados, como se observa en la Figura 25.

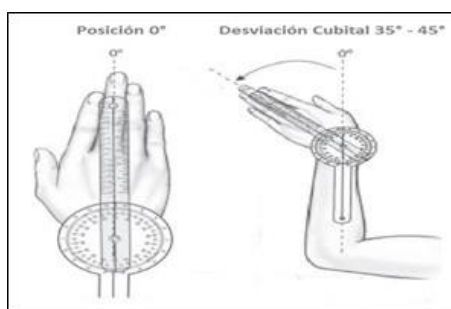


Figura 25. Arco de movimiento de la articulación de la muñeca en desviación cubital [25]

Para simplificar, se realiza una tabla con los rangos de los cuatro arcos movimientos de la articulación de la muñeca expuestos anteriormente para facilitar la comprensión de los datos, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos de arcos movimientos de la articulación de la muñeca

Movimiento	Rango
Flexión	0° a 80° - 85°
Extensión	0° a 70° - 80°
Desviación radial	0° a 20° - 25°
Desviación cubital	0° a 35° - 45°

2.13 Grados de libertad (GDL)

Por grado de libertad (GDL) se entiende el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones del mecanismo respecto a tierra en cualquier instante [26]. Para describir los grados de libertad de un mecanismo, se debe de conocer los diferentes tipos de articulaciones que existen, resumiéndolas en la tabla 3, con sus respectivos GDL. En muchos casos resulta posible conocer la movilidad de un mecanismo a partir del número de eslabones y la cantidad y tipo de los pares que los enlazan. El criterio de Grübler para mecanismos planos establece que la movilidad está dada por la ecuación (1) [26].

$$M= 3(N - 1) - 2(J1)- J2 \quad (1)$$

Donde:

M = movilidad (GDL).

N = número de eslabones.

J1 = número de pares con un grado de libertad.

J2 = número de pares con dos grados de libertad.

Los GDL de un ensamble de eslabones predicen por completo su carácter. Hay varias posibilidades:

- M Positivo: Se tendrá un mecanismo, y los eslabones tendrán movimiento relativo.
- M=1: El mecanismo puede ser impulsado con un solo movimiento de entrada y se dice que es desmodrónico.
- M = 0: se tendrá una estructura, y ningún movimiento es posible.
- M Negativo: se tendrá una estructura precargada, estáticamente indeterminada en la que hay exceso de ligaduras, por lo que ningún movimiento es posible y algunos esfuerzos pueden también estar presentes en el momento del ensamble.
- *Grados de libertad del mecanismo.* Utilizando la ecuación (1) se determinará los grados de libertad del mecanismo, teniendo en cuenta que serán 2 eslabones los que tendrán movimiento y la base, teniendo 3 eslabones y 2 articulaciones:

$$M = ?$$

$$N = 3$$

$$J1 = 2$$

$$J2 = 0$$

$$M= 3(3 - 1) - 2(2)- 0$$

$$M = 2$$

Se determina que el diseño del dispositivo mecánico tendrá 3 grados de libertad, uno para el movimiento de flexión y extensión en el plano cartesiano vertical y otro para el movimiento de desviación radial y cubital en el plano cartesiano horizontal con dos articulaciones tipo rotación.

3. RESULTADOS

Se desarrolla el diseño final del proyecto con respecto a las determinaciones tomadas en la metodología, como lo son, la patología principal, la población seleccionada, los ejercicios fisioterapéuticos a implementar, las dimensiones antropométricas para la construcción del diseño, la biomecánica de la muñeca, los grados de libertad del mecanismo y el software de diseño.

3.1 Software de diseño SolidWorks®

Es un programa de diseño mecánico en 3D con el que puedes crear geometría 3D usando sólidos paramétricos, la aplicación está enfocada a diseño de producto, diseño mecánico, ensambles, y dibujos para taller. SolidWorks® diseña de forma que va dejando un historial de operaciones para que se pueda hacer referencia a ellas en cualquier momento. tiene soluciones para industrias de plásticos, lamina delgada, eléctrica, simulación y análisis por elementos finitos, el programa incluye un módulo inteligente de detección de errores de diseño y módulos para diseño sustentable. Como herramienta de diseño 3D es fácil de usar, puede evaluar ensambles de varias piezas y producir dibujos de fabricación, se pueden manejar los datos en su sistema de administración PDM y llevar un control de las versiones de dibujos.

Al diseñar se puede evaluar el impacto ambiental del diseño, simular virtualmente las condiciones y análisis en situaciones reales y optimizar su desempeño. El programa está basado en un motor de modelado de sólidos y también contiene comandos de creación, edición de superficies complejas, además es asociativo entre los modelos 3D y sus dibujos.

3.2 Diseño el mecanismo

Teniendo en cuenta la necesidad de crear un mecanismo de rehabilitación física que sea de bajo costo y asequible para la población en general, se construyó el siguiente diseño para el dispositivo mecánico que permita replicar los ejercicios fisioterapéuticos seleccionados para la rehabilitación física del síndrome del túnel carpiano y algunas lesiones de muñeca. El diseño se realizó en 4 partes:

1. *Soporte de antebrazo y codo (pieza 1)*. La pieza 1 es la encargada de soportar la unión del antebrazo y codo, donde es necesario mantener en estado estático (sin movimiento) a la hora de realizar los ejercicios fisioterapéuticos y así evitar ejecutar de manera errónea las terapias, como se muestra en la Figura 26, esta pieza cumple con las medidas antropométricas necesarias para diseñar el mecanismo y ser adaptable a diferente tipo de personas que padecen de esta patología.

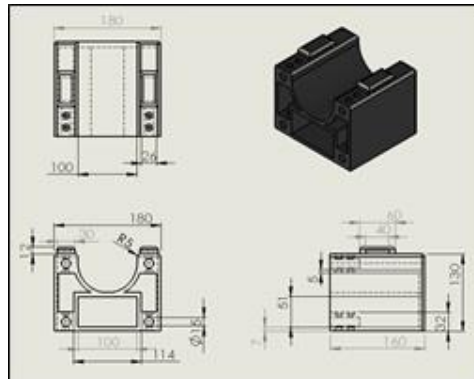


Figura 26. Pieza 1: Soporte de antebrazo y codo

La simulación de esfuerzo ayuda a predecir el comportamiento de una pieza bajo los efectos de una carga, así como a detectar posibles problemas en las etapas iniciales del ciclo de diseño, como se muestra en la Figura 27.

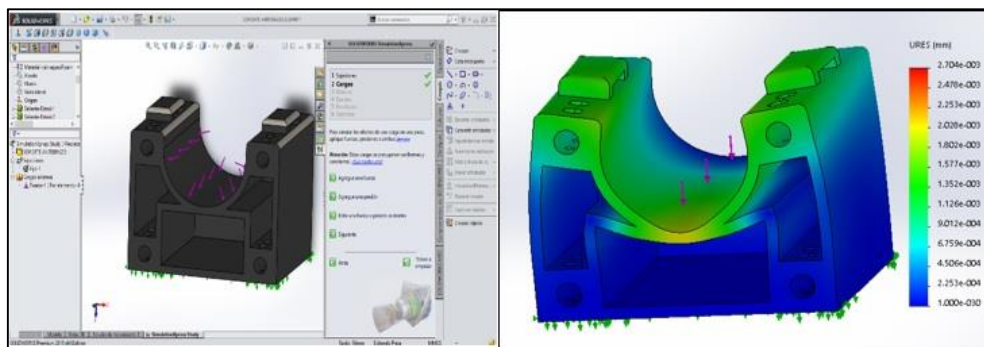


Figura 27. Simulación de esfuerzo en la pieza 1

El software SolidWorks® contiene una herramienta llamada SimulationXpres, la cual aplica cargas y sujeciones a una pieza, especifica su material, la analiza y ve los resultados, toda esta información se incluye en el estudio de simulación.

Para la simulación de los efectos de las cargas, es importante identificar la fuerza que se va aplicar al mecanismo, y para ello, teniendo en cuenta que los ejercicios fisioterapéuticos van dirigidos a las extremidades superiores del cuerpo, se determinó que la fuerza que será aplicada en la simulación será de 45 kg, la cual es ejercida por la mano dominante de un hombre en un promedio de edad de 30 a 39, siendo esta fuerza la mayor encontrada en un estudio realizado en Barquisimeto Venezuela [27]. Como el software para la simulación utiliza medidas en Newton (N), se hace la conversión de kg a N y da como resultado una fuerza de 441 N.

2. *Soporte de la articulación de la muñeca y el antebrazo (pieza 2)*. La pieza 2 es la encargada de soportar parte del antebrazo y la unión con la mano (muñeca), el cual es el lugar principal donde se va ejercer el mayor trabajo de fisioterapia, esta pieza tiene las medidas necesarias para permitir el movimiento libre de la articulación de la muñeca, a su alrededor estar cubierta por un protector para el brazo el cual también contara con la función de sujetador para evitar que los ejercicios se realicen mal, como se muestra en la Figura 28.

La pieza 2 contiene 4 salientes cilíndricos especiales y a la medida para anclarse a la pieza 1 junto con tornillería, así como en la parte inferior de la pieza está el encaje que permitirá darle estabilidad al motor que se vaya a utilizar. simulaciones de esfuerzo de la pieza 2 se muestra en la Figura 29.

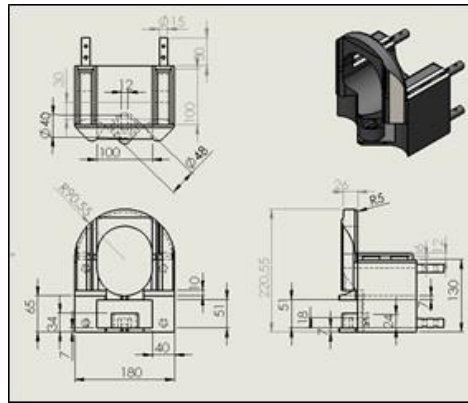


figura 28. Pieza 2: Soporte de la articulación de la muñeca y antebrazo

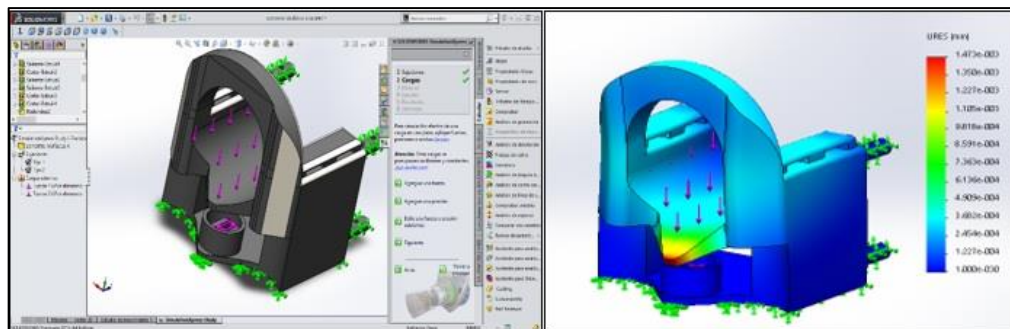


Figura 29. Simulación de esfuerzo en la pieza 2

3. *Soporte del eje de movimientos de desviación radial y cubital (pieza 3).* la pieza 3 se destaca por ser la que genera uno de los grados de libertad del mecanismo, desarrollando los movimientos de desviación cubital y desviación radial, sirviendo también de escalón para conectarse con el soporte de la mano, como se visualiza en la Figura 30. Simulación de esfuerzos de la pieza 3 se muestra en la Figura 31.

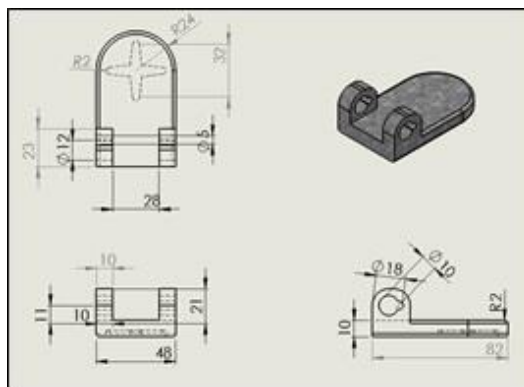


Figura 30. Pieza 3: Soporte del eje de movimientos de desviación radial y cubital

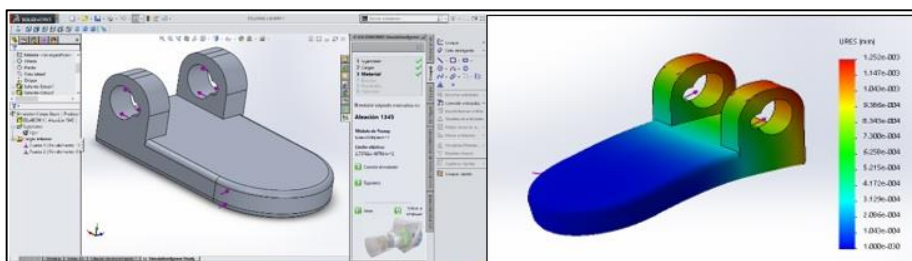


Figura 31. Simulación de esfuerzo en la pieza 3

4. *Soporte de la mano con eje de movimientos de flexo extensión (pieza 4).* la pieza 4 es la encargada de guiar el movimiento de los ejercicios fisioterapéuticos de la mano, es quien va ir recorriendo los movimientos de flexo extensión y desviaciones cubital y radial, va articulada junto con la pieza 3, la encargada de general los movimientos de desviación, como se observa en la Figura 32. simulación de esfuerzos de la pieza 4 se muestre en la Figura 33.

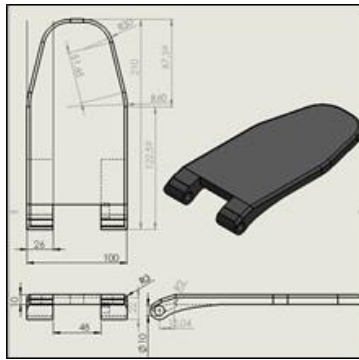


Figura 32. Pieza 4: Soporte de la mano con eje de movimientos de flexo extensión.

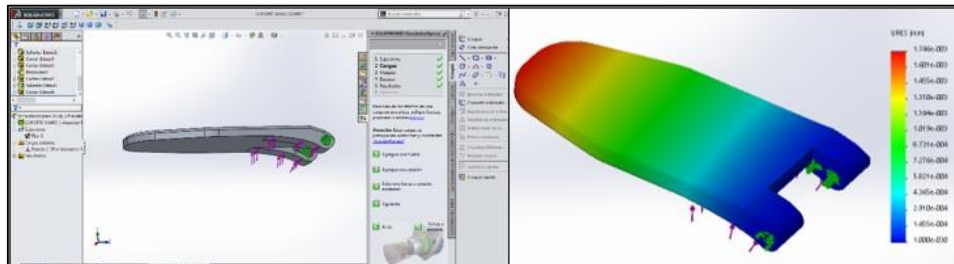


Figura 33. Simulación de esfuerzo pieza 4

5. *Resultados de la simulación de esfuerzo en las 4 piezas.* luego de ejecutar y observar la deformación máxima que puede alcanzar las piezas, se obtienen resultados como el factor de seguridad (FDS) el cual tienen un parámetro específico de 1, cuando FDS es inferior a 1 significa que el material en la ubicación de la fuerza ha fallado, si es igual a 1 se refiere a que el material en esa ubicación está empezando a fallar y si el factor es mayor a 1 quiere decir que el material está seguro y sin probabilidades de fallas, al igual que en tensiones de von mises la imagen tiene un código de colores, donde rojo es donde hay mayor concentración de fuerza y azul es donde hay menor concentración.

De acuerdo con las simulaciones realizadas a cada una de las piezas se determinó que el material que presentan mejor rendimiento en las simulaciones realizadas en el software de diseño SolidWorks® es el aluminio, teniendo ventajas como su fabricación no es muy elevada económicamente y es un material liviano.

3.3 Ensamble de las piezas del mecanismo

Teniendo ya listas las 4 piezas del mecanismo, con sus respectivas simulaciones de fuerza y aplicación de material con el que pueden ser construidas para su correcto funcionamiento, se procede hacer el ensamblaje de las piezas para terminar el diseño del dispositivo mecanismo que permite replicar los ejercicios fisioterapéuticos ya establecidos para la rehabilitación del síndrome del túnel carpiano y/o lesiones de muñeca, en la (figura 34) se muestra una imagen explosionada del diseño.

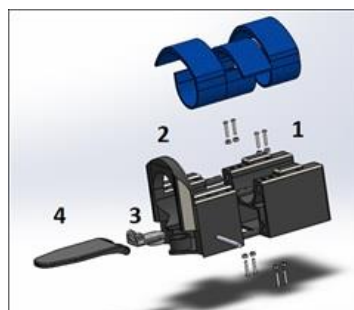


Figura 34. Diseño explosionado

Como se observa en la Figura 34, se obtiene una vista explosionada del diseño para tener un mejor detalle de su construcción, están enumeradas cada una de las piezas mostrando su ubicación y junto con ella están los accesorios los cuales son un brazaletes que va adaptado al entorno donde se ubica el antebrazo para un ajuste con el dispositivo, y así, brindar mayor estabilidad a la hora de realizar los ejercicios fisioterapéuticos, también se encuentran 8 tornillos y 8 tuercas que son las encargadas que unir las piezas 1 y 2 para dar estabilidad a la estructura en general y un eje que une las piezas 3 y 4 para generar el movimiento flexo extensor de muñeca, el diseño ensamblado se observara en la Figura 35.

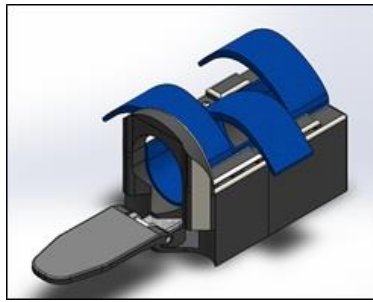


Figura 35. Diseño completo

Las dimensiones del dispositivo son 510 milímetros (51 cm) de largo, 180 milímetros (18 cm) de ancho, una altura máxima de 220 milímetros (22 cm), una altura media a la medida del antebrazo de 142 milímetros (14.2 cm) y un peso únicamente de las 4 piezas en aluminio de 3441.81 gramos (3.4 kg). Para dimensionar mejor el diseño, en las figuras 34 y 35 se creó una vista simulada de una persona de estatura promedio junto con el diseño, en una mesa con dimensiones antropométricas necesarias para la adecuada utilización de dispositivo mecánico, en un entorno que podría recrear una mejor visualización del diseño en dimensiones reales, como se muestra en la Figura 36.

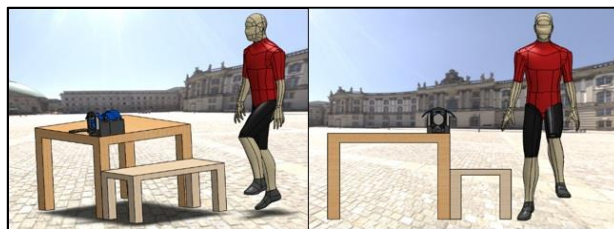


Figura 36. Dimensionar el diseño del mecanismo

A continuación, se observa el diseño ejecutando los 4 movimientos determinados durante los capítulos anteriores.

- *Movimiento de flexión y extensión de la muñeca.* Este movimiento genera un rango máximo de 0° a 85°, el cual se consigue con el diseño realizado, como lo muestran la Figura 37.

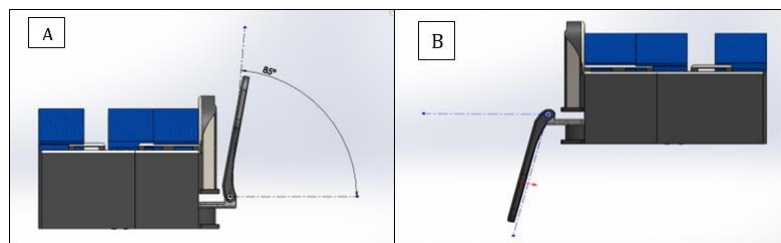


Figura 37. Movimiento de extensión de la muñeca a 85° (A) y movimiento de flexión de la muñeca a 85° (B)

- *Movimiento de desviación cubital y radial.* Este movimiento produce un rango máximo de 0° a 45°, el diseño tiene la capacidad de generar este movimiento como se muestra en la Figura 38.

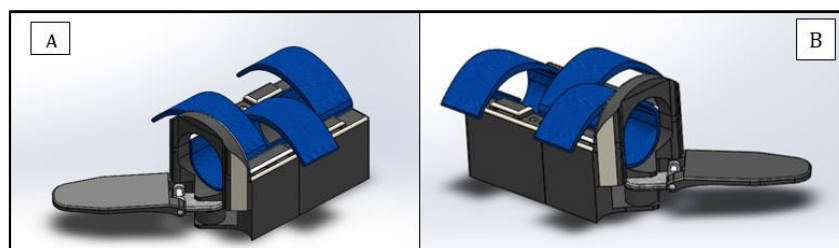


Figura 38. Movimiento de 45° de desviación cubital (A) y movimiento de 45° de desviación radial (B)

4. CONCLUSIONES

La utilización de las extremidades superior del cuerpo humano son de vital importancia en el diario vivir de cada persona, es recomendable tomar todas las precauciones necesarias para mitigar cualquier tipo de enfermedad que pueda atacar el funcionamiento de las mismas, ya que en el desarrollo de la recolección de datos se evidencio que muchas de las causas de llegar a padecer alguna patología que afecte el normal funcionamiento de las manos, las cuales son una de las principales herramientas de trabajo, se debe a los malos hábitos a la hora de desarrollar tareas de uso diario como lo son, manejar, chatear, levantar objetos, malas posturas cuando se utiliza un computador, cocinar, etc.

Estas actividades que parecen ser normales y no causar daño, pueden generar con el tiempo un daño significativo en la motricidad de las manos y llevar a padecer patología como puede ser el síndrome del túnel carpiano el cual puede causar daños severos al nivel de tener que ser tratados quirúrgicamente, sino es tratado a tiempo debidamente con ejercicios de estiramiento o fisioterapia cuando existen muchas dolencias.

La fisioterapia es una de las principales herramientas para prevenir, tratar o recuperar el funcionamiento de alguna parte del sistema musculo esquelético que se vea afectado por una enfermedad, lesión o patología. Durante la investigación se pudo observar que algunos ejercicios fisioterapéuticos pueden ser utilizados para la rehabilitación de una, dos o más lesiones y patologías, como por ejemplo los estiramientos terapéuticos en el cuello, parte de la espalda y hombro, pueden llegar generar mejora sensitivas y motrices en la mano y articulación de muñeca.

Es fundamental empezar a crear ideas o mecanismos de innovación tecnológica que permitan apoyar esta área de la rehabilitación física, viendo que en el departamento de Casanare no se han empezado a implementar proyectos mecatrónicos o electrónicos de rehabilitación que permitan apoyar al paciente duran y después de haber sufrido algún fallo en su sistema musculo esquelético.

Existen diversos métodos de crear dispositivos electrónicos que cumplan con las necesidades básicas de una rehabilitación física, uno de estos métodos es el diseño de prototipos por medio de software, como el utilizado en este proyecto, SolidWorks® durante el desarrollo de la investigación sirvió de plataforma para la creación del diseño final de un dispositivo mecánico para la aplicación en fisioterapia.

Durante la creación del diseño final, se utilizaron herramientas de este software que permitieron determinar características importantes para la implementación del proyecto, con la oportunidad de simular eventos reales, como la aplicación de fuerzas en la estructura, permitió identificara cual era el material más indicado para una posible elaboración de un prototipo, brindando también la posibilidad de observar las fallas estructurales con simulaciones de pruebas de esfuerzo, al igual que simulaciones de movimiento que permitieron ver el comportamiento del mecanismo para la implementación de los ejercicios terapéuticos los cuales fueron flexo extensión de la muñeca y movimientos de desviación radial y cubital, también permitiendo tener en cuenta la posibilidad de hacer mejoras para la implementación de una segunda etapa del proyecto, utilizando como herramienta la impresión en 3D para prototipos de pruebas y siguiendo las recomendaciones del fisioterapeuta asesor en incluir los movimientos de pronación y supinación, teniendo en cuenta que también son muy importantes para el objetivo del proyecto que es recuperar todo el arco de funcionalidad de las extremidades superiores.

REFERENCIAS

- [1] Departamento nacional de planeación. (2015). Índice departamental de innovación en Colombia. Online [Sep 2018].
- [2] B, Silverstein. L, Fine. And T, Armstrong. (1987). Occupational factors and Carpal Tunnel Syndrome. Online [Junio 2018].
- [3] J, Daza. Test de movilidad articular y examen muscular de las extremidades. (1era ed.). Bogotá, D.C. Panamericana. 1996
- [4] Mayo clinic. (2018, Oct 05). Huesos de la muñeca. Online [Junio 2018].
- [5] A, Pérez. L, Bautista. (2014). Sistema lúdico para ejercicios de terapia de la zona carpiana y falanges. Online [Julio 2018].
- [6] Prades policlínica. (2018). Tendinitis de muñeca. Online [Junio 2018].
- [7] Ortofarma. (2016, Ago 18). Síndrome de túnel carpiano. Online [Julio 2018].
- [8] U.P.T.C. (2017). ergonomía en el uso del computador. Online [Junio 2018].
- [9] Evaluación de riesgos ergonómicos (ERGO). Movimientos repetitivos: cuales son los principales traumatismos. 2016.
- [10] Desordenes musculo esqueléticos. (2016, Feb 15). Online [Sep 2018].
- [11] Medlineplus. (2017). Cirugía para reparar síndrome de túnel carpiano. Online [Sep 2018].
- [12] [12] G. Aznar, N. ailouti, J.M. espadaler, O. garcia, A. garcia, O. vall,(2008, Jun 19). síndrome del túnel carpiano idiopático bilateral en un niño menor de 10 años. Online [Junio 2018].
- [13] S, Villa Martínez. (2014). los Smartphone y su incidencia en el síndrome del túnel carpiano. Online [Julio 2018].
- [14] L, Alonso. A, Alvares. L, Gómez. L. Islas. (2008, Marzo). Síndrome del túnel carpiano. Online [Sep 2018].
- [15] G, García. E, Gómez y E, Gonzales. (2009). Síndrome del túnel del carpo. Online [Ago 2018].
- [16] A, Gómez. M, Serrano. (2003, Oct). síndrome del túnel del carpo. Online [Sep 2018].
- [17] Ministerio del trabajo. II encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el sistema general de riesgo. Colombia. 2013. 50 p. Online [Mar 2018].
- [18] Fuente de información laboral en Colombia. Estadísticas población ocupada. Colombia. 2017. Online [Mar 2018].
- [19] OMS. Comité de expertos de la OMS en rehabilitación médica. Online [Sep 2018].
- [20] ortopedia y traumatología básica. Chile. 2014. Cap 1. 9 p. Online [Junio 2018].
- [21] M. Álvarez. (2014, Sep 07). Biomecánica de la muñeca. Online [Sep 2018].
- [22] R, Avila. M, Gonzales. L, Prado. (2015, Mayo). Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile. Online [Sep 2018].
- [23] A, Viladot Voegeli. Lecciones básicas biomecánicas del aparato locomotor. España. Springer. 2001. Cap. 10. 150 p.
- [24] C, Medina. R, Benet. F, Martínez. (2016). El complejo articular de la muñeca: aspectos anatófisiológicos y biomecánicos, características, clasificación y tratamiento de la fractura distal del radio. Online [Julio 2018].
- [25] A, Ubando. (2013, Abr 25). Goniometría miembro superior. Online [Ago 2018].
- [26] Universidad de Oviedo. (2006). Grados de libertad y ecuación de Grübler. España: universidad de Oviedo. Online [Sep 2018].
- [27] I, Bowen. D, Mendoza de Sosa. (2001, Junio). Valores de la fuerza de la mano en adultos sanos. Online [Junio 2018].

Dosificación de nutrientes en un cultivo hidropónico de Lactuca Sativa

Dionel Castro S.¹
Emilsen Yazmin A.²
Daniel E. Cufiño G.³
Juan D. Gil R.⁴

Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL – Colombia

La hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas usando disoluciones minerales en vez de suelo agrícola. Las raíces reciben una solución nutritiva y equilibrada disuelta en agua con algunos de los elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas, que pueden crecer en una solución mineral únicamente, o bien en un medio inerte. Este proyecto desarrolla la forma de controlar la dosificación de nutrientes en un cultivo hidropónico de lechugas mediante los parámetros de conductividad eléctrica y PH que necesita la planta para un mejor desarrollo, el parámetro de conductividad eléctrica controla la dosificación de la solución nutritiva y el sensor de pH controla la oxigenación del agua por lo cual controlando estos dos parámetros se obtendrá mejores resultados en las plantaciones.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe mayor cuidado por la salud y la nutrición, pues en tiempos actuales en los que se vive se tiene una alimentación poco saludable (comidas alto en: carbohidratos, grasas, calorías, etc.) que resultan perjudiciales y afectan la salud, además los cambios climáticos que están afectando a la Tierra en cuanto a cambios de temperatura, tierras poco fértiles y desabastecimiento de agua, factores que influyen en el valor nutricional de la comida [1]. Contribuyendo a esta problemática en la actualidad existen sistemas de cultivos hidropónicos, pero la mayoría no automatizados, que requieren la intervención permanente de la persona para medir las variables del proceso, y realizar el control manual de la dosificación de nutrientes. De modo que esto conlleva a que se generen más errores humanos lo cual va a generar más costos y deficiencia en el resultado. el propósito de este proyecto es Diseñar un prototipo automatizado de un cultivo hidropónico de lechugas controlando la dosificación de nutrientes mediante sensores y actuadores, por medio de una plataforma de programación de Arduino. Por otra parte, el monitoreo más frecuente de los niveles de pH y conductividad eléctrica, junto con la ejecución de acciones de control inmediatas, contribuyen a mantener un entorno óptimo para las plantas promoviendo un adecuado crecimiento y desarrollo.

La hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas usando disoluciones minerales en vez de suelo agrícola. Las raíces reciben una solución nutritiva y equilibrada disuelta en agua con algunos de los elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas, que pueden crecer en una solución mineral únicamente, o bien en un medio inerte, como arena lavada, grava o perlita, entre muchas otras. Las plantas absorben los minerales esenciales por medio de iones inorgánicos disueltos en el agua y minerales que se encuentran dentro de ellas. En condiciones naturales, el suelo actúa como reserva de nutrientes minerales, pero el suelo en sí no es esencial para que la planta crezca. Cuando los nutrientes minerales de la tierra se disuelven en agua, las raíces de la planta son capaces de absorberlos. Cuando los nutrientes minerales son introducidos dentro del suministro de agua de la planta, ya no se requiere el suelo para que la planta prospere. Casi cualquier planta terrestre puede crecer con la hidroponía, aunque algunas pueden hacerlo mejor que otras. La hidroponía es también una técnica estándar en la investigación biológica y en la educación, y un popular pasatiempo [2].

El estudio de la hidroponía data desde hace 382 a. C. pero la primera información escrita es de 1600, cuando el belga Jan Van Helmont documentó su experiencia acerca de que las plantas obtienen sustancias nutritivas a partir del agua. El primer trabajo publicado sobre crecimiento de plantas terrestres sin suelo fue, *Sylva Sylvarum* (1627) de Francis Bacon. Después de eso, la técnica del agua se popularizó en la investigación. En 1699, John Woodward cultivó plantas en agua y encontró que el crecimiento de ellas era el resultado de ciertas sustancias en el agua obtenidas del suelo, esto al observar que las plantas crecían peor en agua destilada que en fuentes de agua no tan purificadas. Con ello publicó sus experimentos de esta técnica con la menta verde [3]. En cuanto a la solución nutritiva, se busca proveer a la planta de los 13 elementos minerales principales por sus efectos en ella: Nitrógeno, Potasio, Fósforo, Calcio, Magnesio, Azufre, Hierro, Manganeso, Zinc, Boro, Cobre, Silicio, Molibdeno [4].

La conductividad eléctrica es un parámetro relacionado con el total de sales disueltas en el agua que permite conocer si la solución excede o carece de la cantidad de nutrientes para los cultivos. En casos de pequeños proyectos para sistemas re circulantes como NFT o contenedores como raíz flotante se puede cambiar toda el agua y si tiene instalado un sistema de riego para hidroponía en sustrato, se puede preparar la solución nutritiva conforme se vaya requiriendo sin embargo en producciones medianas o grandes los procesos antes mencionados ya no serían redituables por lo que se sugiere medir la solución nutritiva con regularidad y compensar la falta de nutrientes o el exceso según sea el caso.

¹ dcastro@unisangil.edu.co

² earias@unisangil.edu.co

³ danielcafiño@unisangil.edu.co

⁴ jgil@unisangil.edu.co

El rango de electro conductividad recomendable es de 1.5 mS a 3 mS o de 750 a 1500 ppm. Por debajo de este rango la planta podría tener carencias nutricionales se debe agregar solución nutritiva (minerales), hasta que llegue al rango antes mencionado, por lo contrario, cuando el medidor marca arriba de 3 mS o 1500 ppm entonces se debe agregar agua a la solución para diluir la cantidad de sales [5].

El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia, las siglas pH significan potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones. El pH se puede medir en una solución acuosa utilizando una escala de valor numérico que mide las soluciones ácidas (mayor concentración de iones de hidrógeno) y las alcalinas (base, de menor concentración) de las sustancias. Cuando el pH no se controla al nivel adecuado la planta pierde su habilidad de absorber algunos de los nutrientes elementales requeridos para su crecimiento. Para cada planta hay un nivel adecuado de pH que produce el crecimiento y productividad máxima. El pH óptimo en un cultivo de lechugas crece en condiciones ácidas con niveles de pH inferiores a 7.0, sin embargo, la mayoría de las plantas sobreviven en el rango de pH de 5.0 a 7.5 [7].

2. MÉTODO

Para el desarrollo del proyecto de investigación se realiza cuatro diferentes etapas, las cuales se enuncian y describen a continuación:

2.1 Investigación

En esta etapa se procede a recopilar información y estado del arte acerca de los nutrientes utilizados en hidroponía de lechugas y los sensores utilizados en la medición de conductividad y pH. En la Tabla 1 se puede observar los nutrientes necesarios, propuestos por diferentes autores para el óptimo desarrollo de esta planta.

Tabla 30. Nutrientes

Nutrimiento (mg. L ⁻¹)	Shippers et al., 1980	Ananda et al., 2000	Premuzic et al., 2006	Valverde et al., 2009	Scuderi, et al., 2009	Johnson, 2011	Cooper, 2017
N	205	198	252	190	212	105	236
NO ³ -	195	135	-	130	198	-	-
NH ⁴ -	10	63	-	60	14	-	-
P	50	70	54	35	57	33	60
K	210	228	312	210	234	138	300
Ca	190	143	169	150	170	85	185
Mg	30	30	48	45	40	25	50
S	39	117	65	70	48	33	68
Fe	3	1.5	0.35	1	-	2.3	12
Cu	0.06	0.03	0.32	0.1	-	0.01	0.1
Mn	0.5	0.3	0.78	0,5	-	0.26	2
Mo	0.1	0.005	0.35	-	-	-	-
Zn	0.08	0.03	0.48	1.15	-	0.024	0.1

En el proyecto se utilizó una solución completa llamada TRIPLE Q NPK, la cual se presenta en la Figura 1. Es un fertilizante complejo, compuesto, fuente de Nitrógeno, Fósforo y Potasio de relación nutricional 1:1:1 en suspensión concentrada, la composición de la solución se observa en la Tabla 2, diseñado para ser aplicado en todos los cultivos y en cualquier etapa fenológica en que se encuentren. Además, estimula el crecimiento, desarrollo de las plantas y también controla el pH y la conductividad eléctrica [8]. El propósito del control a diseñar consiste principalmente en evitar o disminuir de manera considerable la intervención humana para el control de las variables, de manera que el cultivo pueda crecer en condiciones óptimas. De acuerdo a la necesidad, se establecieron los siguientes parámetros de control (Tabla 3).



Figura 21. Solución TRIPLE Q NPK

Tabla 2. Composición de solución TRIPLE Q NPK

Composición garantizada	
Nutriente	valor (g/l)
Nitrógeno total (n)	150,0 g/l
Nitrógeno amoniacal (n)	17,0 g/l
Nitrógeno ureico (n)	133,0 g/l
Fosforo asimilable (p2o5)	150,0 g/l
Potasio soluble en agua (k2o)	150,0 g/l
pH en solución al 10%	6.79
TRdensidad a 20°C	1,26 g/cm³
Conductividad eléctrica (1:100)	4,54 ds/m

Tabla 3. Tabla de parámetros de control

Descripción	Acciones a realizar
EC < 1.0 PH < 5.0	Encender bomba dosificadora de nutrientes y bomba de oxigenación de agua
PH < 5.5	Encender bomba de oxigenación de agua
PH > 6.0	Apagar bomba de oxigenación de agua
EC > 3.0 PH > 7	Apagar bomba dosificadora y bomba de oxigenación

2.2 Selección de los sensores, implementos electrónicos y tarjeta de desarrollo.

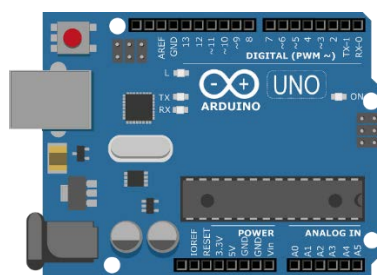
Se realizó una disolución del polvo de sericina en agua destilada a una concentración del 2% (w/v) empleando una autoclave a las mismas condiciones mencionadas anteriormente. La solución obtenida se vertió en recipientes plásticos de 7 mL, se congeló a -80 °C durante 24 h, y posteriormente se liofilizó (liofilizador marca Labconco). Las esponjas obtenidas fueron almacenadas en un desecador hasta su posterior caracterización.

2.2.1 Caracterización de los sensores

Con base en la información obtenida en la etapa precedente, y conforme a los parámetros de control establecidos se procedió a seleccionar los más convenientes en términos de funcionalidad y bajo costo para cada una de las variables del sistema, así como los actuadores y la tarjeta de desarrollo.

2.2.2 Tarjeta de desarrollo

Se seleccionó la tarjeta de desarrollo Arduino UNO (Figura 2), basada en el microcontrolador ATmega328P. Además del costo, la versatilidad y facilidad de programación fueron factores clave en la selección de Arduino UNO como la plataforma para el desarrollo del prototipo. Arduino UNO incorpora una memoria Flash de 32kB, 14 pines de entrada/salidas digitales, y 6 entradas digitales, que, aunque juntas resultaron suficientes para ejecutar el programa principal, y manejar los sensores, actuadores [9]. Arduino UNO, por otra parte, soporta el bus I2C, que resultó ideal para comunicarse con más de un periférico utilizando únicamente dos pines del microcontrolador.

**Figura 2.** Arduino uno

2.2.3 Sensor pH

Bajo criterios de funcionalidad y costo se seleccionó el kit "Analog pH Meter Pro" (Figura 3), que permite medir el nivel de acidez o alcalinidad de una dilución entregando una señal analógica. En la Figura 4 se evidencia el Módulo de Conexión para Arduino. Se alimenta con 5V lo cual permite ser utilizado por microcontroladores como Arduino, PIC y otros. Es capaz de medir el nivel de PH entre 0 y 14, con una precisión de 0.1. Se debe realizar una calibración previa a su uso.

Características "Analog pH Meter Pro" [10]:

- Voltaje: 5V
- Corriente de trabajo: 5-10mA
- Rango de medición de PH: 0-14
- Rango de temperatura de detección: 0-80 °C

Tiempo de respuesta: $\leq 5s$
 Tiempo de sedimentación: $\leq 60S$
 Temperatura de trabajo: $-10 \sim 50^\circ$ (nominal 20°)
 Humedad: 95% HR (nominal 65% HR)
 Dimensiones: $42 \times 32 \times 20$ (mm)
 Señal de salida: analógica
 Potenciómetro para ajuste de ganancia
 Agujeros de montaje de la placa M3 (4 agujeros)



Figura 3. Sensor PH

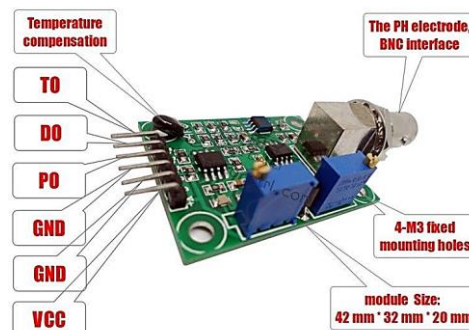


Figura 4. Módulo de Conexión para Arduino

Como se puede observar en la Figura 4, hay dos potenciómetros, el que está más pegado al conector BNC de la sonda es el que regula el *offset*, el otro es el del límite de pH.

- *Offset*: el rango de media de la sonda oscila entre valores negativos y positivos. El 0 representa un pH de 7.0. Para poder utilizarlo con Arduino este circuito añade un valor de offset al valor medido por la sonda, de esta forma el ADC, solo tendrá que tomar muestras de valores positivos de tensión. Por lo tanto, se reforzará un pH de 7.0 desconectando la sonda del circuito y cortocircuitando la parte interna del conector BNC con la exterior. Con un multímetro se mide el valor del pin Po y se ajusta el potenciómetro para que sea 2.5V.
- *Límite de pH*: Este potenciómetro es para establecer un valor del límite del circuito sensor de pH que hace que el LED rojo se encienda y la señal de pin Do se ponga en ON.

Además, se debe calcular la conversión del voltaje que dará el sensor de pH para lo que se necesitaran s dos valores de referencia de pH y medir el voltaje que devuelve el sensor en el pin Po. Lo más recomendable es utilizar una solución se calibración en sobre, también las hay en líquido, pero es más fácil conservar las de sobre. Estas soluciones se venden en diferentes valores, aunque los más comunes son pH 4.01, pH 6.86 y pH 9.18 [11]

2.2.4 Sensor de electro conductividad

Se procede a la búsqueda de un sensor industrial, robusto y de bajo costo que pueda permanecer sumergido y se adquirió el modelo CE transmisor CE sensor TDS sensor de conductividad para 4-20ma 0 - 5 V RS485. como se ilustra en las Figuras 5 y 6 respectivamente.

Parámetros técnicos sensor de conductividad:

Rango CE: Opcional: 0 - 4400uS/cm
 Precisión de la CE: $\ll +2\%$ F.S
 Rango de TDS: Opcional: 0-200PPM, 0-2000PPM, 0-20000PPM
 Precisión TDS: $\ll +2\%$
 Fuente de alimentación DC: 12 V ~ 24 V
 Salida de señal: DC: 0-5 V

Potencia: < 1 W
 Ambiente de servicio: 0 °C a 100 °C
 Dimensiones totales: 65*46*28,5mm & sup3



Figura 5. Sensor de Conductividad

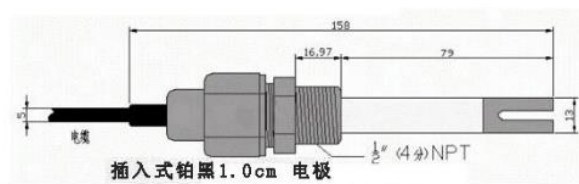


Figura 6. Electrodo de sensor de conductividad

- **Calibración de sensor.** El electrodo del sensor, en el entorno de medición, la señal se ve afectada debido a la contaminación, para garantizar que el sensor pueda usarse normalmente durante mucho tiempo, es necesario hacer una corrección de forma regular a través de la calibración del transductor (una vez al mes). dependiendo de las muestras de agua del ciclo de calibración específico.
- **Calibración del transductor y detección de calidad del electrodo**
 1. Lavar el electrodo con agua destilada sin CO2 y secar con paño limpio y suave.
 2. Verificar que el sensor este totalmente conectado
 3. Presione el botón de calibración hasta que el indicador sea amarillo claro y suelte el botón.
 4. Pulsa el botón de calibración rápido dos veces hasta que la luz roja parpadee, el transmisor está en proceso de calibración cero. (Este proceso dura 30 segundos), después de que la luz de calibración esté en rojo.
 5. Tan pronto el indicador de calibración este en color rojo claro se prepara el líquido de calibración estándar de 14.13 mS/cm después se sumerge el electrodo, en el líquido de calibración.
 6. Luego de introducir el electrodo presiona el botón de calibración rápidamente, una vez que el indicador de calibración parpadea verde, el transmisor entra en el proceso estándar de calibración (Este proceso es de 30 segundos de largo), después de que el indicador de calibración sea verde normalmente en 20 segundos, y luego amarillo parpadea 20 segundos para guardar los datos de calibración.
- **Inspección de calidad del electrodo (automática) y datos:** Si el electrodo se daña en el proceso de calibración, el electrodo no coincide, las luces rojas y verdes parpadean, estas luces intermitentes se apagan, 20 segundos después del final de la calibración, los datos de calibración no están guardados. Si el electrodo no tiene problemas, durante el proceso de calibración el transmisor enciende la luz amarilla de calibración normalmente, está se activa durante 20 segundos [12].

2.2.5 Bomba peristáltica

Dado que el sistema debe entregar volúmenes muy pequeños desde recipientes no presurizados (nutrientes), se decide trabajar con una bomba peristáltica (Figura 7) de bajo costo.



Figura 7. Bomba peristáltica

La bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, es decir, tiene una parte de succión y otra de expulsión, por lo que es utilizada para bombear una gran variedad de fluidos. El fluido es transportado por medio de un tubo flexible colocado dentro de la cubierta circular de la bomba [13].

Especificaciones de la Bomba:

Fuente de alimentación: DC 12V

Ambiente de trabajo: Temperatura de 0 a 40 °C,

Flujo Medio: El flujo de la conexión de la bomba peristáltica depende del nivel de potencia aplicado entre los terminales positivo y negativo.

Caudal: 0-100 ml / min

Rango de velocidad: 0,1 a 100 rpm

RPM del motor: 5000 rpm

Diámetro 27,6 x altura 37.9 (mm)

Tamaño de la cabeza Diámetro 31,7 x altura 20.1 (mm)

Equipado con tubo de la bomba (ID x OD): 2,5 mm de diámetro interior x 4.7mm de diámetro exterior [14].

2.2.6 Bomba oxigenadora

La bomba oxigenadora (Figura 8), es un equipo eléctrico de gran importancia, e indispensable para el equilibrio del cultivo, se encarga de ayudar a que el dióxido de carbono se convierta en oxígeno, su función es hacer que el agua circule a en la piscina, con la finalidad de que no se estanque. La bomba genera corriente y movimiento en el agua, eliminando cualquier residuo contaminante, además contribuye a distribuir los nutrientes presentes en la piscina y mantiene limpia el agua [15].



Figura 8. Bomba oxigenadora

2.3 Diseño del controlador, programación e implementación sobre la tarjeta de desarrollo.

En esta etapa se diseñó el sistema de control y se realizó la programación sobre la tarjeta de desarrollo.

2.3.1 Código de Programación en Arduino

```
//control de dosificación de nutrientes //
int Sensor1 = A0; //sensor. ph
int Sensor2 = A1; //sensor conductividad
float voltaje1;
float voltaje2;
float conductividad;
int BOMBA = 7;
int LEDBOMBA = 6;
int PECERA = 11;
int LEDPECERA = 5;
void setup() {
  pinMode(BOMBA, OUTPUT);
  pinMode(LEDBOMBA, OUTPUT);
  pinMode(PECERA, OUTPUT);
  pinMode(LEDPECERA, OUTPUT);
  voltaje1 = 0;
  voltaje2 = 0;
  conductividad = 0;
}
void loop() {
  int vsensor1 = analogRead(Sensor1);
  int vsensor2 = analogRead(Sensor2);
  voltaje1 = 5 / 1023.0 * vsensor1;
  double voltaje2 = 5 / 1023.0 * vsensor2;
  float Ph = 7 + ((2.5 - voltaje1) / 0.18); conductividad = (voltaje2 * ((4400e-6) / 5.000))*1000;
  if (conductividad < 1.0 || Ph < 5.0 )
```

```

{
digitalWrite (BOMBA, HIGH);
digitalWrite (LEDBOMBA, HIGH);
digitalWrite (PECERA, HIGH);
digitalWrite (LEDPECERA, HIGH);
}
else
{
digitalWrite (BOMBA, LOW);
digitalWrite (LEDBOMBA, LOW);
}
if (Ph < 5.5)
{
digitalWrite (PECERA, HIGH);
digitalWrite (LEDPECERA, HIGH);
}
else if (Ph >= 6.3)
{
digitalWrite (PECERA,LOW);
digitalWrite (LEDPECERA, LOW);
digitalWrite (BOMBA, LOW);
digitalWrite (LEDBOMBA, LOW);
}
}
}

```

2.3.2 Implementación del sistema

Durante el proceso de selección de componentes se desarrolló una parte fundamental que es la investigación de cada sensor por medio del datasheet, el cual brinda información detallada de pines y tablas de especificaciones de funcionamiento, ya teniendo esta información se empezó hacer el conexionado de cada componente a la tarjeta de desarrollo, como se observa en la Figura 9, pero antes de esto se hizo la calibración de los dos sensores principales que son el de pH y conductividad eléctrica con una solución especial para dicho proceso, ya obteniendo una calibración deseada se procede hacer el código en Arduino en donde se declara la parte de control; es importante tener mucha precaución en la parte de programación ya que de los sensores se obtienen son voltajes los cuales se requiere hacer una conversión teniendo en cuenta los diseños de parámetros de cada sensor. En la Figura 10, se observa la parte frontal del proyecto ya finalizado. Para esta etapa final de implementación fue necesario hacer pruebas de las cuales se obtuvo el resultado esperado.



Figura 9. Componentes electrónicos



Figura 10. Vista frontal del dosificador de nutrientes

3. RESULTADOS

El proyecto tuvo el comportamiento deseado. Inicialmente con la dosificación de nutrientes se tuvo que cambiar el valor de conductividad, esta corrección se obtuvo en los primeros diez minutos de funcionamiento, con 3 litros de agua. Una vez corregida esta variable, el sistema activo la bomba de oxigenación con el fin de corregir el valor de pH que se encontraba por debajo del límite inferior.

A partir de una hora, el sistema se mantiene estable dentro de los parámetros establecidos, con el valor de conductividad y PH, sobrepasando en algunas ocasiones el límite superior, con lo cual se requiere intervención del usuario para añadir agua al sistema. Lo anterior se debe a efectos de rápida absorción de agua de la planta y por contar con un tanque de agua de pequeña capacidad para las pruebas de desempeño.

4. CONCLUSIONES

Con la técnica hidropónica o cultivo sin suelo, se puede diseñar un proyecto de producción continua; que permite cuantificar el número de plantas de acuerdo al espacio disponible, la nutrición, la temperatura, el tiempo de siembra-cosecha, de acuerdo a la fecha requerida; que puede ser a todo lo largo del año, de la misma planta o de plantas diferentes y también elaborar la programación requerida que irá de acuerdo a la fecha de entrega y a la utilidad esperada.

Aplicando esta técnica de cultivo podemos obtener vegetales totalmente libres de contaminación, en volúmenes realmente importantes a bajo costo y sin perjuicio para el planeta.

La utilización de soluciones nutritivas es una forma de darle a la planta los elementos nutritivos directo a la raíz, ayudando al ahorro del agua y evitando el exceso de humedad.

De los registros obtenidos, se pudo evidenciar que el control de dosificación funcionó como se requería. Cuando los valores se encontraron fuera de rango, el control actuó bajo los parámetros establecidos, estabilizando primero la conductividad y posteriormente el pH. Sin embargo, se evidencia que el sistema es bastante estable, posiblemente debido a que la prueba se realizó con un número limitado de plantas en un tanque de baja capacidad de agua. Una vez estabilizados los parámetros, se puede evidenciar que los valores permanecen poco variantes en el tiempo.

El presente proyecto abre la puerta a la aplicación de tecnologías integrales al ámbito de los cultivos hidropónicos con destinación a los hogares, de manera que se pueda contar con cultivos en casa bajo condiciones óptimas para su crecimiento.

REFERENCIAS

- [1] Universidad Internacional de Valencia, "Alimentación y salud: Consecuencias de una dieta poco saludable." 2018. Available: <https://www.universidadviu.com/alimentacion-salud/> [Accessed: May, 2019].
- [2] L. Alpizar, "Hidroponía: Cultivo sin tierra: Elementos básicos para desarrollar la técnica simple de cultivar plantas sin tierra en pequeños espacios." Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2004.
- [3] El holandés picante, "La historia de la hidroponía y su importancia para el futuro." Online. Available: <https://elholandespicante.com/plantas/la-historia-la-hidroponia/> [Accessed: May, 2019].
- [4] María Online, "La hidroponía y sus características." Online. Available: <https://www.maria-online.us/health/article.php?lg=es&q=Hidropon%C3%ADa> [Accessed: May, 2019].
- [5] Hydro Environment, "Calidad del agua en hidroponía." Online. Available: https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=148. [Accessed: May, 2019].
- [6] Significados, "Significado de pH." Online. Available: <https://www.significados.com/ph/>. [Accessed: May, 2019].
- [7] Lenntech, "pH y alcalinidad." Online. Available: <https://www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm>. [Accessed: May, 2019].
- [8] Soluciones Nutritivas, "Triple Q." Online. Available: <https://www.solucionesnutritivasltd.com/producto/triple-q/>. [Accessed: May, 2019].
- [9] J Diaz, "Placa Arduino Uno." 2016. Online. Available: <http://www.iescamp.es/miarduino/2016/01/21/placa-arduino-uno/> [Accessed: May, 2019].
- [10] AMG Kits, "Sensor de PH (Sonda + Tarjeta acondicionadora." Online. Available: <https://amgkits.com/home/239-sensor-de-ph-para-arduino-sonda-tarjeta-acondicionadora.html>. [Accessed: May, 2019].
- [11] Scidle, "Cómo usar un sensor de pH con Arduino." Online. Available: <https://scidle.com/es/como-usar-un-sensor-de-ph-con-arduino/> [Accessed: May, 2019].
- [12] Aliexpress, "CE transmisor CE sensor TDS sensor de conductividad para 4-20ma 0-5 V-0 V-10 V RS485 analógico tensión de salida. Online. Available: <https://es.aliexpress.com/i/32958461746.html> [Accessed: May, 2019].
- [13] QuimiNet, "¿Qué son las bombas peristálticas?" Online. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/que-son-las-bombas-peristalticas-32689.htm> [Accessed: May, 2019].
- [14] Electronilab, "Bomba de Dosificación peristáltica - 12 VDC." Online. Available: <https://electronilab.co/tienda/bomba-de-dosificacion-peristaltica-12-vdc/> [Accessed: May, 2019].
- [15] Hydro Environment, "¿Cómo oxigenar la solución nutritiva?" Online. Available: https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=110 [Accessed: May, 2019].

Sistema de alimentación eléctrica para celulares a partir de energía renovable y accionado por botellas Pets

Emilsen Y. Arias C.¹

Laudy V. Fernández R.²

Brayan S. Pérez M.³

Fundación Universitaria de San Gil UNISANGIL – Colombia

La capacidad de las baterías ha crecido de forma exponencial durante los últimos doce años de manera sostenida, aunque curiosamente en 2017 se ha producido una pequeña bajada que ha colocado a dicho año en una media inferior a la de 2016 [1], estos consumos acelerados se han intentado sostener aumentando la capacidad de las baterías y siendo estas un tanto rezagadas, se pensó en desarrollar un prototipo que generará la carga adecuada para un celular a través de un sistema autónomo alimentado con energía solar. Además de que se plantea el accionado por botellas de politereftalato de etileno (PET), para su accionamiento, siendo estas un ejemplo singular de mayor consumo [2], para generar un reciclaje del material. El proyecto está pensado en apoyar el reciclaje (botellas plásticas). Se lleva a cabo usando Arduino como controlador, en el cual a uno de sus pines análogos le llegará la tensión recibida por el panel solar y un regulador. Se observará en una pantalla de cristal líquido (LCD) los datos, como el ingreso de botellas y el tiempo restante de carga.

1. INTRODUCCIÓN

A través de los años se ve un incremento de la población en Colombia. La población total en el 2016 era de 48,653,000 [3], de este año en adelante se observa una tasa de incremento anual del 0.98%, registrando en el último censo realizado (2019) una población de 49,921,868 [4]. Esto ocasiona un crecimiento en el costo de vida, implicando la expansión de energías no tan amigables con el medio ambiente, proporcionada en su gran mayoría (~80 %) por los combustibles fósiles [5]. Además de su alto valor de producción incrementa el cambio climático, causado por el aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (gei), especialmente, por el CO₂ [6]. A esto se suma el mal manejo de los residuos, que en su mayoría son plásticos o un derivado de ellos, que duran años en desintegrarse, alrededor de 100 y 1000 años de forma natural [7], sabiendo que su aprovechamiento va más allá de un uso puntual.

Cada vez es más notoria la dependencia de las personas hacia sus equipos celulares y, la constante necesidad de comunicación a través de redes sociales o el uso de las diversas aplicaciones [8], generando un consumo mayor en la batería del móvil respecto a un solo uso; llamadas. Esta proliferación de la movilidad y la difusión de tecnologías móviles han conducido al aumento de la dependencia de las fuentes de energía, como ocurre con la necesidad de los enchufes [9]. Entre tanto, consumidores de energía a gran escala, como es el caso de la industria, están buscando soluciones alternativas a nivel minorista para disminuir sus facturas de electricidad de manera sostenible, y la energía renovable podría ser parte del portafolio de soluciones [10].

Por ello se planteó en este trabajo el diseño de un prototipo que abarque el uso de energías renovables y sea capaz de utilizar elementos como lo son los envases PET, que son un ejemplo muy singular en el consumo de bebidas [2]. Este proyecto se localizará en UNISANGIL sede Yopal, allí su cafetería abastece productos Pet, dando como resultados una cantidad aproximada al mes de alrededor de 5400 recipientes en jornadas de máximo 6 días por semana como lo expresan sus dueños. Estos elementos serán 'la llave' para accionar el sistema del prototipo de Punto de carga para celulares, quién a su vez se alimenta de manera autónoma con la energía captada y procesada por paneles solares.

Aunque son varias las ideas generadas para poder alimentar un dispositivo eléctrico a través de energía renovable. Este prototipo se encargará de otorgar carga eléctrica a través de dos conexiones hasta los celulares. Siendo que se han hecho planteamientos con ramificaciones distintas para solucionar el problema de obtener y mantener la carga del celular, ninguna de ellas con las mismas características en la región de la Orinoquía.

2. MÉTODO

2.1 Proceso de transferencia de energía

Un sistema fotovoltaico aislado o autónomo, se trata de un sistema auto abastecedor, ya que aprovecha la irradiación solar para generar la energía eléctrica necesaria en el suministro de una instalación (vivienda, pozo, sistema de riego, sistema de telecomunicación, etc.) [9], la energía obtenida de él se planea redireccionar al puerto de carga para dos diferentes tipos de puerto de carga de teléfonos móviles. El modo que el dispositivo generará una carga a través de él será siempre y cuando este reciba un "pago" de una botella plástica, detectada por un fin de carrera. Dichas baterías poseen 4 etapas; Bulk, Absorción, Flotación y Ecuilibración. Con ayuda de un regulador, la batería no sobrepasará un 100 % de carga [2], una vez esto, ella proporcionará la corriente necesaria para auto descarga controlando la carga

¹ earias@unisangil.edu.co

² Lauvanfer@hotmail.com

³ Stjf52@hotmail.com

completa, de esta manera al no obtener incidencia del sol, se descargará lentamente hasta recibir un ingreso nuevo de energía. Aunque los paneles solares son una gran alternativa para la energización de las diferentes plantas que se presentan, sigue siendo muy costoso su implementación a gran escala. Es por ello que con la idea de un prototipo a base de un panel solar y el diseño del mismo se busca obtener el máximo de su capacidad de producción con el fin de alimentar dos celulares y sostenerse por sí mismo. La batería mantendrá el funcionamiento durante las noches.

2.2 Estudio de factibilidad

Un estudio realizado por los autores, llevó a la conclusión de que la ubicación exacta de dicho proyecto sería en la cafetería de Unisangil. El estudio se basó en:

- *Ubicación regional:* Gracias a las gráficas obtenidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se observa la temperatura. En la Figura 1, se presentan los promedios de temperatura del año y se puede notar que el valor mayor es de 20°C, lo cual sigue siendo un buen factor para la implementación de paneles fotovoltaicos, por su incidencia.

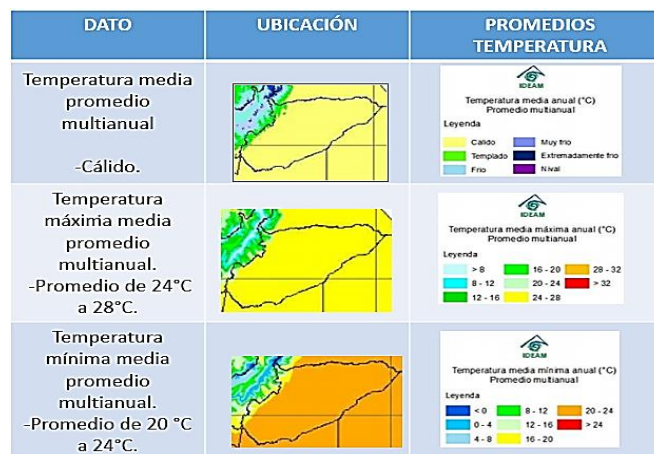


Figura 1. Temperaturas promedio registradas a nivel departamental tomadas por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Observando los datos de promedio del IDEAM que se registran en la Figura 2, los valores de precipitación de 10.5 -11.0, indican que el Índice de Concentración y Precipitación (PCI) tiene una alta estabilidad. Esto debido a que “los mayores valores del PCI indica alta estabilidad, es decir grandes diferencias entre las temporadas secas y lluviosas. Valores pequeños, indican poca diferencia entre los meses lluviosos y los meses secos [11]”. Mientras que en la parte de aridez los valores entre 1.40 y 2.00, indican que hay épocas de lluvias y no hay mucha desertificación. Las áreas menores a 0,75, son las más secas.

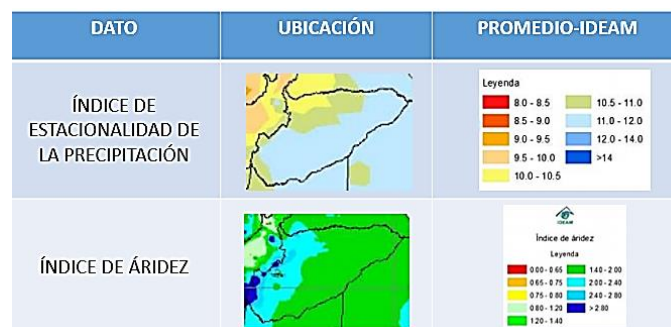


Figura 2. Promedio de estaciones y aridez en Casanare (IDEAM)

En las Figuras 1, 2 y 3 se puede observar que el departamento de Casanare es un punto óptimo para llevar a cabo el presente proyecto. Gracias a los datos obtenidos por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), se establece una regularidad de brillo solar con la que el proyecto resulta factible.

- *Datos obtenidos acerca del consumo de productos con botellas PETS.* Una investigación para establecer el promedio diario de bebidas en envases plásticos, establece como resultados una cantidad aproximada de 120 jugos, 48 pony malta y 48 productos entre botellas de agua personal y saborizadas, generando en promedio un total de 216 botellas diarias y produciendo al mes alrededor de 5400 recipientes en jornadas de máximo 6 días por semana. Los resultados obtenidos se obtuvieron por un conteo superficial en la jornada nocturna durante el periodo de una semana, más la información proporcionada por los dueños de la cafetería establecida en UNISANGIL sede Yopal.

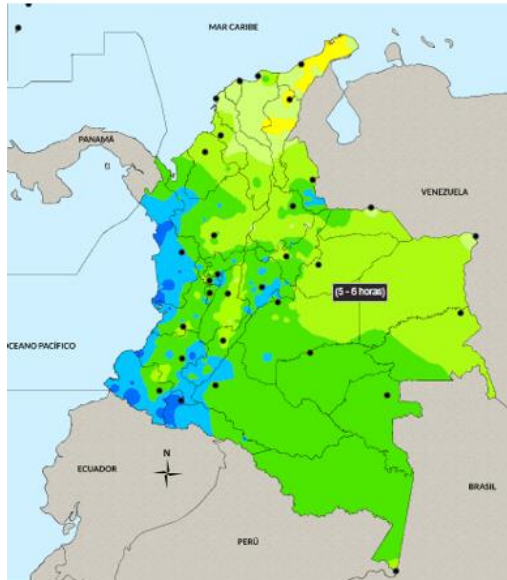


Figura 3. Brillo solar medio diario, anual

2.3 Desarrollo del proceso

Para llevar a cabo el proceso, se hace la investigación de un panel que se ajuste a los parámetros requeridos, como que la tensión convertida sea la suficiente para recargar los celulares. A partir de este punto se trabaja en el desarrollo del código para el controlador Arduino, quien será el encargado de dar paso a la tensión para que esta llegue al celular.

1. *Selección de panel solar.* Se fijó un panel solar de 20W (Figura 4) con un regulador PWM. La tensión que suele dar el panel solar es hasta 18 V, y el regulador suele estabilizarlo a 12 V.



Figura 4. Panel solar de 20W en base

2. *Desarrollo del Código.* Para empezar, se establece el uso de la LCD para visualizar en ella el número de botellas detectadas y el tiempo restante de carga:

```
lcd.begin (16, 2); // for 16 x 2 LCD module
lcd.setBacklightPin(3, POSITIVE);
lcd.setBacklight(HIGH);
lcd.home (); // set cursor to 0,0
```

```
pinMode(entrada, INPUT_PULLUP);
pinMode(salida, OUTPUT);
digitalWrite(salida, LOW);
```

```
Serial.begin(9600);
```

En el primer lazo, lo que se desarrolla es el conteo de las botellas registradas. Normalmente habrá un estado en cero para determinar que el fin de Carrera no está detectando alguna botella plástica. Cuando el fin de carrera es accionado, empieza el conteo con el comando "cont++" lo que irá sumando de uno en uno:

```
void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:
estado = digitalRead (entrada);
```

```

if ( estado == LOW) { //Fin de carrera está normalmente cerrado.
  cont ++;
  Serial.println(cont);
  while (estado == LOW) { //antirebote
    estado = digitalRead (entrada);
    delay(100);
  }
}

```

Lo que se observa en esta parte del código es, si la variable cont es igual o mayor a 5, pone la salida en alto durante un determinado tiempo, este tiempo va disminuyendo de 1 en 1 hasta llegar a 0. Por ahora por ser etapa de prueba, el programa fue diseñado para que transcurrido un conteo de 5 botellas PETS, diera salida al cargador durante un minuto:

```

if (cont >= 5) {
  lcd.clear ();
  cont = 0;
  lcd.setCursor (0, 0);
  lcd.println("Cargando... ");
  digitalWrite(salida, HIGH);
  for (int resto = tiempo; resto > 0; resto--)

```

3. *Modelados*. Los siguientes modelados se realizaron a través del programa Inventor de Autodesk. Se planteó inicialmente una visión frontal e interna (Figura 5).

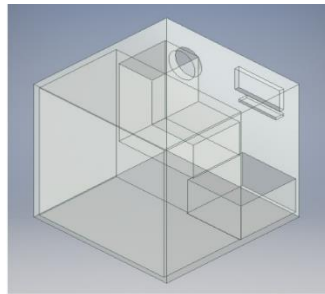


Figura 5. Modelado mecánico

Las dimensiones de este modelado son de 1m x 1mx1m, la parte posterior de la caja contiene un espacio vacío al fondo con el fin de utilizarlo como almacén. El orificio circular que se observa, es el lugar del ingreso de las botellas. En la Figura 6 se muestra el diseño de la sección frontal e interna.

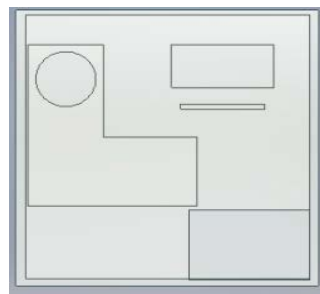


Figura 6. Vista externa del sistema por accionamiento de botellas politereftalato de etileno (PETS)

Se realiza un modelado de la estructura física de la zona que recibirá las botellas plásticas (Figura 7). Este se realiza pensando en la visibilidad de los datos por parte del usuario en la misma cara de la estructura por donde se ingresan las botellas.



Figura 7. Regulador de tensión Pulse Width Modulation (PWM) solar

4. *Construcción.* Se utiliza un regulador (PWM solar charge controller) con el fin de controlar la carga solar proveniente del panel (Figura 7). Dado que es una tensión variable hasta 18.5 V, se regula a 12 V la tensión de salida la cual se almacenará en una batería de 7,5 A.

Se establecen las conexiones entre Arduino y la pantalla LCD para observar los datos de ingreso y tiempo restante de carga (Figura 8). Se utiliza un Relé, debido a que la tensión de salida del Arduino no es suficiente y corre peligro de caerse. El relé no solo incrementa la tensión, sino que también la estabiliza. Debido a que la tensión es mayor a los 5V utilizados para el cargador de celular, se hace uso de un regulador LM7805.



Figura 8. Conexión Arduino a pantalla Liquid Crystal Display (LCD)

3. RESULTADOS

La batería conectada al panel es de 12 V y 7,5 A, capacidad más que suficiente para alimentar un celular, cuya entrada debe ser de 5V DC. Se logra evidenciar en el proyecto que el fin de carrera generó una respuesta mayor respecto al sensor qr1114 en el momento de detectar la señal del objeto. Se considera que el prototipo con cada PET depositado alcanza a generar una carga aproximada al 15% del celular, siempre y cuando este se encuentre apagado, por el momento, el sistema solo da paso a la tensión de salida cuando el conteo es igual a 5 botellas.

Las HSP son las horas diarias que, con una Irradiancia solar ideal de 1000 W/m² proporciono la misma irradiación solar total que la real de ese día. Estas horas comprenden desde las 8am a 4pm [15], siendo el medio día el más alto. Es allí donde se detecta la mayor capacidad de trabajo del panel del presente proyecto. La salida de tensión que llega a los celulares siempre va a ser de 5V, debido al uso del regulador LM805. Al contar con una batería de 12V almacenando la energía del panel solar, se logra evidenciar que ésta se descarga en un lapso de tiempo de 8 días por que no es necesario incluir un seguidor solar al panel.

REFERENCIAS

- [1] I. Ros, "Un vistazo a la evolución de las baterías para smartphones," 2017. Online: <https://www.muycomputer.com/2017/11/12/evolucion-las-baterias-smartphones/>
- [2] J. Medina, C. Saldaña, V. Hernández, S. Becerra, "Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de Tereftalato (PET)." *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos*, México, 2011.
- [3] OMS, "Colombia," 2016. Online: <https://www.who.int/countries/col/es/>.
- [4] Countrymeters, "Población de Colombia 2019." Online: <https://countrymeters.info/es/Colombia>.
- [5] L. Ferrari, "Energías fósiles: Diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas." *Rev. Mex. Física*, 59(2), 36-43, 2013.
- [6] H. Andrade, C. Arteaga, & M. Segura, "Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia)," *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.* 18(1), 103-118, 2016.
- [7] Ecoticias, "¿Cuánto tarda nuestra basura en descomponerse?" 2012. Online: <https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/71460/pila-bolsa-plastico-lata-cerveza-cuanto-tardan-desintegrarse>.
- [8] M. Aspillaga, S. Agüero & S. Cárdenes, "Impacto social de la telefonía celular en la población joven. Ciudad de Catamarca, República Argentina. Año 2009," *Comun. y Soc.* 15(17), 75-103, 2013.
- [9] UPME, "Estudio: Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia," UPME-BID, ATN/FM-12825-CO. 2015.
- [10] IBERDROLA, "Efectos ambientales de la producción y distribución de energía eléctrica: Acciones para su control y corrección. s.f. Online: https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/sostenibilidad/docs/efectos_energia.pdf.
- [11] IDEAM, "Boletín climatológico mensual", 2011. Online: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>.

Algoritmo de secuenciación de trabajos para sistemas *job shop* flexible y *flow shop* flexible mediante solución heurística

Daniel C. Rodríguez G.¹

Juan S. Navas G.²

Diego A. Cadena Q.³

Ana M. Pérez O.⁴

Sergio M. Garavito C.⁵

Universidad de la Sabana - Colombia

El problema de la planificación y control de la producción se reconoce como un problema complejo dentro de las organizaciones dado que involucra la asignación de recursos escasos para lograr la satisfacción del cliente. Por lo tanto, es importante desarrollar métodos que permitan alcanzar estos objetivos y que permitan a su vez evaluar la solución en un tiempo razonable [1] El objeto de estudio de esta investigación es el problema de la programación del Flow Shop Flexible (FSF) y Job Shop Flexible (JSF) o problema de secuenciación de tareas con máquinas en paralelo, para el cual se propone la aplicación de un algoritmo que utiliza una heurística con la que se pretende establecer la secuencia de tareas y a la vez optimizar una medida de efectividad, en este caso minimizar el tiempo total requerido para la terminación de todas las tareas o *makespan*. Para la solución de los sistemas de producción, se planteó un algoritmo de secuenciación de tareas con una aplicación en la herramienta Visual Basic basados en la heurística SPT cíclica con el objetivo de ocupar las máquinas de forma que se eliminen los tiempos de espera de las máquinas disponibles para garantizar una alta ocupación de estas. El algoritmo propuesto soluciona problemas tipo FSF y JSF en un tiempo computacional razonable, se evalúa en el proceso de siembra industrial de la caña de azúcar de manera teórica. Finalmente, al aplicar la regla de despacho FIFO se cumple el objetivo planteado de minimizar el *makespan*, sin embargo, aumentando en cinco máquinas la operación de siembra con LPT se cumple la fecha límite con menor número de máquinas.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria colombiana existen diferentes sectores en los que aún no se ha implementado una política eficiente para la programación de trabajos y máquinas en el área de producción que tenga en cuenta el ambiente de trabajo, las restricciones del problema y pueda, de manera concreta, evaluar una medida de efectividad específica. Esto genera que en la programación solo tengan en cuenta criterios provistos por la empresa asumidos empíricamente por la experiencia en el área de producción. Es por esto por lo que términos como ambientes de trabajos, reglas de despacho, métodos de programación, indicadores de producción, entre otros, sean términos desconocidos.

El objeto de estudio de esta investigación es el problema de la programación de operaciones y secuenciación de tareas de sistemas FSF y JSF o problema de secuenciación de tareas con máquinas en paralelo. Se propone la aplicación de una heurística en el algoritmo solución con la que se pretende establecer la secuencia de tareas y a la vez optimizar una medida de efectividad que en este caso es minimizar el tiempo total de terminación de todas las tareas o *makespan*. En la industria los ambientes JSF son difíciles de programar debido a la alta complejidad computacional que requieren este tipo de problemas NP-Hard y estos problemas de Planeación de la Producción se resuelven empleando técnicas heurísticas o metaheurísticas debido a que la naturaleza misma del problema genera una explosión combinatorial en el espacio de soluciones [2]. Por esto, existen diversos tipos de software que son reconocidos por un pequeño sector de empresas y varios de estos cuentan con licencias muy costosas dificultando que sea implementado una política de secuenciación de trabajos en medianas y pequeñas industrias.

Los problemas JSF y FSF utilizan para la secuenciación de los trabajos métodos como la heurística NEH, programación lineal, programación no lineal, algoritmo genético clásico y sus derivados como el de Chu-Beasley, entre otros. Estos métodos convergen a procesos extensos e iterativos. La aplicación de la programación lineal, programación no lineal y algoritmos genéticos, requieren un alto costo computacional debido a que son considerados problemas de tipo NP-Hard computacionalmente intratables, por lo cual, no se pueden resolver de manera óptima para grandes problemas de escala industrial. [3] Por otro lado, el análisis requerido para una decisión acertada en industrias no cuenta con el tiempo ni los recursos suficientes para realizar una secuenciación óptima de las máquinas y trabajos; como consecuencia se obtiene un exceso de tiempos muertos dificultando el control de las fechas de terminación.

El objetivo principal de la investigación es encontrar un algoritmo que permita secuenciar las máquinas de un sistema tipo FSF y JSF con el objetivo de minimizar el tiempo de terminación del proceso. Para la transformación del ambiente JSF a FSF los trabajos que en sus requerimientos no necesitan pasar por alguna operación, tomará todos los tiempos asociados de esa operación del trabajo como cero.

¹ danielroga@unisabana.edu.co

² juannago@unisabana.edu.co

³ diegocagu@unisabana.edu.co

⁴ anapeos@unisabana.edu.co

⁵ sergiogaco@unisabana.edu.co

Para el desarrollo del modelo se planteó un algoritmo de secuenciación de los trabajos a través de la herramienta Visual Basic de forma SPT cíclica con el objetivo de ocupar las máquinas para eliminar los tiempos de espera de los equipos disponibles y así garantizar una alta ocupación de estos. Además, se tuvieron en cuenta otra serie de reglas de despacho tales como LPT y FIFO. En el caso estudiado, la regla tipo FIFO maneja la mejor respuesta para el objetivo de minimizar el tiempo total de ciclo en la aplicación teórica del proceso de siembra industrial de la caña de azúcar. Sin embargo, al aumentar el número de equipos de siembra, la regla de despacho LPT cumple el plazo de 280 horas con el menor aumento de número de máquinas.

2. MARCO CONCEPTUAL

- *Algoritmo*: Es un conjunto de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permiten realizar una actividad mediante pasos sucesivos [4].
- *Flow Shop (FS)*: Problema de secuenciación de tareas en sistemas de producción lineal que consiste en programar la secuencia de procesamiento de N tareas en M máquinas, de tal forma que se optimice una medida de efectividad como el tiempo total de finalización o makespan. El caso general de este sistema de producción considera que todas las tareas deben ser procesadas en el mismo orden en cada máquina [4].
- *Flow Shop Flexible*: Problema de secuenciación de tareas en líneas de flujo con máquinas en paralelo que consiste en programar los trabajos en varias etapas de procesamiento en serie, donde cada etapa tiene una o más máquinas paralelas idénticas. Este sistema tiene varias consideraciones, por ejemplo, la línea produce varios tipos de productos, cada uno debe ser procesado en cada etapa, en una misma se pueden procesar varias tareas simultáneamente, la secuencia de los trabajos debe ser igual para todo el proceso, el tiempo de procesamiento de cada tarea depende de la etapa y el procesamiento de un trabajo en una máquina no puede ser interrumpido [4].
- *Flow Shop Híbrido*: Problema de secuenciación de tareas en líneas de flujo con máquinas en paralelo que o son idénticas. En ese sistema los trabajos pueden saltar etapas, pero no pueden volver a una etapa ya visitada y los tiempos de preparación son dependientes de la secuencia [4].
- *Función Objetivo*: La función objetivo define la medida de efectividad del sistema como una función matemática de las variables de decisión. La solución óptima será aquella que produzca el mejor valor según sea el caso. [4]
- *Heurística*: Son algoritmos que encuentran soluciones de buena calidad para problemas combinatoriales complejos con esfuerzos computacionales relativamente pequeños, pero que desde el punto de vista teórico renuncian a encontrar la solución global del problema [4].
- *Parámetros*: Los parámetros son los valores conocidos que relacionan las variables de decisión con las restricciones y función objetivo [4].
- *Programación de tareas*: Es la asignación secuencial de trabajos a un conjunto de máquinas. Las tareas pueden seguir un orden o no dentro del grupo de máquinas [4].
- *Programación lineal*: Es una técnica de programación matemática la cual se caracteriza porque tanto el espacio de soluciones como la función objetivo tienen un comportamiento lineal [4].
- *Job Shop (JS)*: Los trabajos han de pasar por etapas diferentes para realizar distintas operaciones. La dimensionalidad del problema del JS viene dada por $n \times m$, siendo n el número de trabajos y m el número de máquinas. Se caracteriza por la producción de lotes relativamente pequeños de una amplia variedad de productos, los cuales tienen muy poco grado de estandarización. En estos ambientes se emplean equipos de escasa especialización, que se agrupan en centros de trabajo a partir de la función que desarrollan. [1] El crecimiento exponencial del número de posibles soluciones hace que este problema sea reconocido como NP-Hard [5].
- *Job Shop Flexible*: Los trabajos que se deben procesar pueden asignarse a cualquier máquina de un conjunto de máquinas establecido, donde los tiempos de operación o costos asociados al trabajo en las máquinas pueden ser diferentes, además de que los trabajos pueden seguir una ruta de procesamiento distinta. Por lo tanto, el Flexible Job Shop Scheduling Problem (FJSSP) es planear y organizar un conjunto de tareas que deben procesarse en un conjunto de recursos con restricción de operación [6].

3. ANTECEDENTES

Los sistemas productivos se caracterizan por ser un conjunto de operaciones que permiten realizar un producto mediante una serie de etapas. Uno de los ambientes de trabajo más reconocidos corresponde al ambiente de tipo JS, en donde cada uno de los trabajos puede llegar a contar con una ruta distinta de operaciones. Existe una extensión muy conocida de las secuencias tipo taller llamada JSF, donde cada uno de los trabajos puede tener una ruta distinta, sin embargo, en cada etapa de operaciones se cuentan con máquinas en paralelo que pueden realizar dicha operación. Los sistemas tipo JS y JSF son comúnmente encontrados en talleres de producción, donde se presentan alta variedad de productos y poco volumen de producción [7].

En la industria, los entornos de trabajo que han sido considerados pueden llegar a ser tan variados hasta el punto en que cada caso puntual puede ser considerado como un entorno específico dado que este puede ser adaptado para cada una de las especificaciones y limitaciones de un ambiente laboral. Sin embargo, existe una notación general donde varios ambientes de trabajo, también conocidos como *FrameWorks*, pueden ser categorizados dependiendo de una serie de características específicas con el objetivo de obtener un número limitado de *FrameWorks* con reglas generales de solución dada una función objetivo. Además, diversos investigadores han propuesto una serie de métodos que han permitido encontrar varias soluciones para distintos tipos de problemas JS, algunos de estos métodos son la programación por cuello de botella móvil y búsqueda local [7].

El problema de programación óptima de la producción para escenario de dos o tres máquinas fue planteado por Donald B. Johnson teniendo en cuenta los tiempos de preparación de las máquinas. Dicho algoritmo aplicado a dos máquinas consiste formar dos conjuntos A_i y B_i de tareas teniendo en cuenta los tiempos de procesamiento. Para esta asignación, se comparan los tiempos de proceso del trabajo j en la máquina 1 y en la máquina 2, si $p_{1j} > p_{2j}$ se asigna ese trabajo en el conjunto B_i , de lo contrario, si $p_{1j} < p_{2j}$ se asigna el trabajo a A_i ; la programación se realiza secuenciando primero A_i con la regla SPT y luego se secuencia B_i con LPT. La extensión de este algoritmo a tres máquinas sólo se puede realizar siempre y cuando la máquina intermedia (2) está siendo dominada por alguna de las otras dos máquinas (1 o 3), esto quiere decir que el tiempo de proceso más largo del trabajo i en la máquina 2 sea menor o igual al tiempo de proceso más corto de las demás máquinas. Una vez verificado lo anterior, se procede a construir dos máquinas artificiales cuyos tiempos de proceso serán $p'_{1j} = p_{1j} + p_{2j}$ y $p'_{2j} = p_{2j} + p_{3j}$ respectivamente, la secuenciación y asignación se realiza de la misma forma que para dos máquinas [8].

Varios autores propusieron el método de *branch and bound* como una técnica exacta de solución para problemas de tipo FSF que garantiza soluciones óptimas. Años más tarde se propuso un nuevo tipo de *branch and bound* que consiste en calcular el límite inferior, dividirlo y eliminar los nodos; ellos emplearon el método con el objetivo de minimizar el *makespan*, sin embargo, se dice que el método sirve para otras medidas de desempeño. Más tarde, utilizaron un algoritmo genético para perfeccionar el método anteriormente propuesto mejorando los límites inferiores y las soluciones haciéndolas más cercanas a los mismos [9].

Para problemas de tipo JSF, Kennedy y Eberhart propusieron el método de asignación *Particle swarm optimization (PSO)* que es un algoritmo evolutivo cuyo sistema es inicializado con una población (*swarm*) de soluciones aleatorias. Cada posible solución (partícula) "vuela" en el espacio del problema D-dimensional con una velocidad ajustada dinámicamente a la experiencia de vuelo de este y de sus compañeros. Por otro lado, un algoritmo de programación que fue propuesto por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi (1983) es el *simulated annealing algorithm* el cual es considerado como una versión mejorada de búsqueda local en la cual la solución inicial se mejora varias veces haciendo pequeñas alteraciones locales hasta que no haya más posibilidades de alteración que arrojen un mejor resultado [10].

Entre las aplicaciones del JSF se encuentra el caso de una empresa de la industria metalmecánica que, en la necesidad de alinear la estrategia de manufactura con la estrategia de operaciones, realizó una identificación general de su proceso de manufactura en la que identificaron su sistema de producción de este tipo [11]. Otro caso, es el de una empresa proveedora de servicios que aplicó un algoritmo evolutivo híbrido para la programación de los órdenes de los clientes en fábricas de inyección de plástico. [12] Por otro lado, entre las aplicaciones de sistemas de producción tipo FSF está el uso de algoritmos genéticos para reducir el *makespan* en la industria textil [13].

4. MÉTODO

Se debe tener en cuenta que antes de realizar cualquier programación para máquinas en paralelo se deben secuenciar los trabajos mediante una regla de despacho en la primera máquina debido a la jerarquía de complejidad que se maneja en este tipo de problemas. De acuerdo al libro Scheduling de Pinedo [14], la programación de máquinas en paralelo en una estación es una extensión de problemas para una máquina usando reglas de despacho tales como: FIFO (First In - First Out), donde los trabajos se ejecutan en orden de llegada; SPT (Shortest Processing Time), los trabajos se programan en orden creciente del tiempo de proceso; LPT (Longest Processing Time), para este caso los trabajos se programan en orden decreciente del tiempo de proceso; EDD (Earliest Due Date), los trabajos se ordenan crecientemente según su fecha de entrega; y MDD (Modified Due Date), los trabajos se programan de acuerdo al valor del criterio MDD que tome cada trabajo en orden creciente [15]. Se utiliza la siguiente notación: Un problema de programación de la producción se describe por una tripleta $\alpha / \beta / \gamma$:

- El campo α indica el entorno de las máquinas (número de máquinas y tipo de ambiente de producción).
- El campo β describe las características y restricciones de procesamiento de los trabajos.
- El campo γ especifica el objetivo del problema.

El problema por resolver es $P_m/Prec/C_{max}$, significa que en m máquinas en paralelo los trabajos deben cumplir sus relaciones de precedencia y cuyo objetivo es minimizar el tiempo de finalización de todos los trabajos [16].

El algoritmo es desarrollado ya que los métodos actuales para secuenciar los trabajos en el sistema de producción JSF son de alta complejidad para analizar y solucionar, tanto así que para tratar de encontrar una solución óptima a una función objetivo ya planteada, se puede llegar a tardar años tan solo en dar una solución; por ejemplo, el problema MT 10 que está compuesto de 10 máquinas y 10 trabajos se publicó en 1963 y su solución óptima se encontró solo en 1988 por Adams et al. [17].

La herramienta utilizada para la aplicación del algoritmo en este caso es Microsoft Excel que, a diferencia de programas como SAP ERP, AMD, ASPROVA, ORTEMS [18] se constituye como una herramienta computacional muy poderosa y accesible. Excel tiene gran utilidad en la enseñanza de las ciencias y la Ingeniería, particularmente, en la enseñanza de los métodos numéricos. Pese a que existen en el mercado programas computacionales muy sofisticados, tales como MATLAB, MATHEMATICA, etc., no son tan accesibles como Excel, que usualmente forma parte del paquete básico de software instalado en las computadoras que funcionan bajo el sistema Windows de Microsoft [19].

A través del programador Visual Basic de Excel, se puede aplicar el algoritmo siendo este robusto y de fácil adaptación a los requerimientos del proceso de cada empresa en particular. Por otro lado, la heurística implementada corresponde a una variación del SPT cíclico donde los trabajos son agregados de forma tal que las máquinas minimicen el ocio. El tiempo SPT está dado por la liberación de las máquinas por el trabajo anterior y la asignación del siguiente trabajo disponible hasta completar el total de trabajos [20].

4.1 Codificación

Con el número de máquinas disponibles para realizar la operación, asignar tiempo de proceso 0 a los trabajos que no requieren procesarse en la operación; de esta manera se programan los trabajos en la operación como si la requiere, sin afectar los requerimientos de procesamiento del trabajo. Es así, que se obliga al problema JSF programar las operaciones como un FSF.

Se entiende que los trabajos programados por iteración son el número de máquinas disponibles. Para la codificación se espera que el tiempo de proceso de los trabajos que requieren ser procesados se conoce y es constante incluyendo los desplazamientos de máquina a máquina. Los paréntesis que acompañan variables se refieren a la posición en la que se imprimen o se buscan valores asociados a la posición, para guardarlos en variables. También se debe tener una matriz de desplazamientos de una máquina a otra con tiempos de procesos constantes para cada trabajo.

4.1.1 Terminología

Nummaq: Número de máquinas en el proceso

TInicio: Tiempo de inicio del trabajo en la máquina actual

Tproceso: Tiempo de procesamiento del trabajo en 1 máquina

Tfintrabajo1: Tiempo de fin de la operación de la operación anterior

Trabajomenor: Se refiere al trabajo con menor tiempo de liberación de las máquinas

Maquinamenor: Máquina que se utilizó para procesar el Trabajomenor

Tfinanterior: Tiempo de liberación del trabajo de la máquina anterior

Tdesplazamiento: Tiempo de desplazamiento de máquina a máquina

Tfinmaquina: Tiempo de finalización(liberación) de la máquina en cuestión

Tfinreescrito: Tiempo de finalización del trabajo reescrito

Ocio: Tiempo de inactividad de la máquina

ValorRees: Valor que se guarda el tiempo de finalización del trabajo

Máquina Actual: Se refiere a la máquina actual que procesa el trabajo actual

Máquina Siguiete: Se refiere a la máquina siguiente

NumTrabajos: Número de trabajos a procesar

Pos: Primera posición programada de la iteración final menos 1

Posf: Primera posición de la iteración penúltima iteración menos 1

Trabajoquees: Variable que guarda el número de los trabajos

Parametrotrabajo: Trabajo que asocia los parámetros necesarios para realizar la operación

4.1.2 Pseudocódigo

Programar la primera iteración

//Para la primer iteración q representa el número de máquinas a programar trabajos//

Para q=1 hasta Nummaq

 Si Tproceso(q) = 0

 Tproceso(q) = 0

 TInicio(q) = 0

```

        TfinTrabajo1(q) = Tfinanterior(q)
        Tfinmaquina(q) = Tfinanterior(q)
        Ocio(q) = TInicio(q)
    Sino
        Desde(q)
        Hasta(q)
        Tdesplazamiento = Buscar valor en la matriz (Desde, Hasta)
        TInicio(q) = Tfinanterior(q) + Tdesplazamiento(q)
        TfinTrabajo1(q) = TInicio(q) + Tproceso(q)
        Tfinmaquina(q) = TInicio(q) + Tproceso(q)
        Ocio(q) = TInicio(q)
    Fin del Si
    Siguiete q

```

Programar las siguientes operaciones

```

t = 1
m = Nummaq
p = 1
u = Nummaq
Z = 1
y = 1
x = Nummaq
n = 0
//El ciclo While (Mientras) recorre las iteraciones desde i = 0//
Mientras i <= Número restante de trabajos faltantes a programar
//El ciclo For (Para) se utiliza para completar la iteración de un tamaño de Nummaq//
Para t = t hasta m
    Tfintrabajo1 = Valor de inicialización. Ejemplo: 10000 Mayor al mayor Tfintrabajo1 de la iteración anterior
// El ciclo For (Para) se utiliza elegir y asignar la máquina con menor tiempo de entrega//
    Para p = p hasta u
        // El condicional SI se utiliza para comparar el tiempo de proceso actual con el siguiente//
        SI Tfintrabajo1 > Siguiete posición de Tfintrabajo1 de la primera iteración(p)
            Tfintrabajo1 = Valor del menor Tfintrabajo1 de la posición(p) encontrada
            Trabajomenor= Número del trabajo de la posición(p) del Tfintrabajo1
            Maquinamenor= Máquina utilizada para procesar el trabajo de la posición(p)
        Fin Si
        // El condicional SI se utiliza para escribir en la siguiente posición el menor guardado//
        SI p = u
            Asignar a la siguiente posición (Z + Nummaq) disponible la Maquinamenor
            //El ciclo For (Para) encuentra la posición para reescribir el valor de finalización y guardar valores//
            Para y = y hasta x
                // El condicional SI se utiliza para Encontrar la posición de la máquina con menor tiempo de entrega//
                SI Maquinamenor = Máquina en la iteración anterior (y + n)
                    Tfinreescrito (y + n) = Tfintrabajo1(y + n)
                    Tfintrabajo1 = Valor grande para que no sea tomado en cuenta en la siguiente iteración
                    ValorRees = Tfinmaquina (y + n)
                    // El condicional SI se utiliza para imprimir el ocio de la máquina si no se procesa el trabajo en la máquina//
                    SI Tfinanterior (y + n) - TInicio (y + n) > 0 O Tfinanterior (y + n) = Tfintrabajo1(y + n)
                Ocio (y + n) = 0
            Fin Si
        Fin Si
    Siguiete y
        Tdesplazamiento (Z + Nummaq) = (Máquina Actual, Máquina Siguiete)
        // El condicional SI se utiliza para evaluar si el tiempo de proceso el 0 y no tome se tome en cuenta//
        SI Tproceso (Z + Nummaq) > 0
            // El condicional SI se utiliza para comparar el tiempo de liberación de la operación anterior y el de la máquina
            // en la iteración anterior//
            SI ValorRees < Tfinanterior (Z + Nummaq)
                TInicio (Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + Tfinanterior (Z + Nummaq)
                Tfintrabajo1 (Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + Tproceso (Z + Nummaq) + Tfinanterior (Z + Nummaq)
            Tfinmaquina (Z + Nummaq) = Tfintrabajo1 (Z + Nummaq)
            // El condicional SI se utiliza para calcular e imprimir el ocio si existe//
            SI TInicio (Z + Nummaq) - ValorRees > 0
                Ocio (Z + Nummaq) = TInicio (Z + Nummaq) - ValorRees
            Sino
                Ocio (Z + Nummaq) = 0
            Fin Si
        Sino
            TInicio (Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + ValorRees

```

```

        Tfintrabajo1(Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + Tproceso (Z + Nummaq) + ValorRees
Tfinmaquina (Z + Nummaq) = Ttrabajo1(Z + Nummaq)
    // El condicional SI se utiliza para calcular e imprimir el ocio si existe//
    SI TInicio (Z + Nummaq) - ValorRees > 0
        Ocio (Z + Nummaq) = TInicio (Z + Nummaq) - ValorRees
        Sino
            Ocio (Z + Nummaq) = 0
        Fin Si
    Fin Si
Sino
    Tdesplazamiento (Z + Nummaq) = 0
    TInicio (Z + Nummaq) = 0
    Tfintrabajo1(Z + Nummaq) = Tfinanterior (Z + Nummaq)
        // El condicional SI se utiliza para calcular el tiempo de finalización de la máquina//
    SI ValorRees < Tfinanterior (Z + Nummaq)
        Tfinmaquina (Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + Tproceso (Z + Nummaq) + Tfinanterior (Z +
        Nummaq)
    Sino
        Tfinmaquina (Z + Nummaq) = Tdesplazamiento (Z + Nummaq) + Tproceso (Z + Nummaq) + ValorRees
    Fin Si
Fin Si
y = 1
Fin Si
Siguiete p
Z = Z + 1
p = 1
Siguiete t
t = 1
m = Nummaq
p = p + Nummaq
u = u + Nummaq
i = i + 1
n = n + Nummaq
Fin del Ciclo

```

Se requiere calcular el ocio de la última iteración y procesar sólo los trabajos faltantes. Para que pueda compilar el algoritmo se debe colocar un número restante de trabajos en el ciclo *While* de hasta menos 1 iteración. Para programar la iteración final, se añade lo siguiente:

```

    //El ciclo For (Para) se utiliza para calcular el ocio la última iteración//
Para g = 1 hasta Nummaq
    //El ciclo For (Para) se utiliza para recorrer las posiciones de la última iteración//
    Para j = 1 hasta Nummaq
        // El condicional SI se utiliza para encontrar la máquina de la iteración anterior asignada en la última iteración//
        SI Maquinamenor (191 + j) = Maquinamenor (196 + j)
            // El condicional SI se utiliza para imprimir el ocio de la máquina si no se procesa el trabajo en la máquina//
            SI Tfinanterior (Pos + g) - TInicio (Pos + g) > 0 O Tfinanterior (Pos + g) = Tfintrabajo1 (Pos + g)
                Ocio (Pos + g) = 0
            Sino
                // El condicional SI se utiliza para calcular e imprimir el ocio si existe//
                SI TInicio (Pos + g) - Ocio (Posf + j) > 0
                    Ocio (Pos + g) = TInicio (Pos + g) - Tfinmaquina (Posf + j)
            Sino
                Ocio (Pos + g, 10) = 0
            Fin Si
        Fin Si
    Siguiete j
Siguiete g
    //El ciclo For (Para) se utiliza para reescribir el tiempo final del trabajo la última iteración//
    Para Z hasta 5
        Tfinreescrito (Pos + Z) = Tfintrabajo1(Pos + Z)
    Tfintrabajo1(Pos + Z) = 1000
    Siguiete Z

```

Dado que se tiene una “nueva” secuencia al terminar la operación, debido a la liberación que es distinta si se tienen tiempos de proceso o desplazamiento variables, se usa el siguiente código para obtener la información requerida para la siguiente operación. Imprimir los trabajos en el orden de los trabajos de la operación anterior.

```

//El ciclo For (Para) se utiliza para escribir la nueva secuencia y buscar parámetros asociados//
Para e = 1 hasta NumTrabajos
Trabajoquees = Trabajo en la posición de la nueva secuencia
Imprimir el Tfinmaquina(e) como TInicio para la siguiente operación
//El ciclo For (Para) se utiliza para encontrar los parámetros del trabajo actual//
Para s = 1 hasta NumTrabajos
// El condicional SI se utiliza para comparar el trabajo actual con el total de trabajos//
SI Trabajoquees = Parametrotrabajo(s)
Imprimir el Tproceso asociado al Trabajoquees y otros parámetros pertinentes
Fin Si
Siguiente s
Siguiente e
FIN

```

Para procesar la siguiente operación, se recomienda utilizar la opción de Excel para ordenar de menor a mayor el tiempo de inicio de los trabajos; de esta manera, se programa los trabajos en la siguiente operación teniendo en cuenta el menor tiempo de liberación. Sin embargo, es posible genera un código adicional que ejecute de la misma manera la opción ya existente en la herramienta de Excel.

El modelo planteado es similar a la programación de trabajos estudiada por Mary E. Kurz y Ronald G. Aski en 2004, donde también buscan minimizar el *Makespan* de todos los trabajos en un flexible FS de varias etapas, en el cual los trabajos pueden no pasar por alguna etapa y no pueden repetir etapa, es decir, un problema más conocido como FS híbrido. Para lo anterior, se propuso hacer uso de la programación entera y se desarrollaron 4 heurísticas:

1. Heurística SPT cíclica, que asigna los trabajos de manera golosa, es decir, organizando los tiempos de procesamiento, según la regla de despacho seleccionada, cada vez que se programa un trabajo.
2. Heurística de inserción de tiempo de flujo múltiple, que tiene como objetivo minimizar la suma del tiempo de flujo en cada etapa.
3. Una extensión de la regla de Johnson para tener en cuenta los tiempos de preparación o alistamiento.
4. Claves al azar del algoritmo genético, que con respecto a los algoritmos genéticos tradicionales varía en la representación de la solución porque en la primera etapa a cada trabajo se le asigna un número real, donde la parte entera es la máquina que se le asigna a ese trabajo y la parte decimal se usa para ordenar los trabajos, mientras que para las etapas siguientes se usan los métodos SPTCH y la regla de Johnson, asignando los trabajos de tal manera que se minimice el tiempo de terminación [20].

El algoritmo propuesto tiene la ventaja que contempla los desplazamientos realizados por los trabajos hacia las máquinas para mayor precisión en el cálculo del makespan. Por otra parte, la programación entera aplicada al método creado por Mary E. Kurz difiere con el algoritmo no sólo en la naturaleza de solución sino las capacidades de procesamiento de tareas en varias operaciones. En este mismo sentido, el algoritmo propuesto es robusto en la entrada de gran cantidad de trabajos y operaciones dando una medida de evaluación de la programación en un tiempo computacional razonable.

5. RESULTADOS

Para realizar la validación del algoritmo propuesto, se realizó una aplicación de un caso teórico para un problema de programación de operaciones propuesto por Lorena Bejarano (*Anexo 1*). En este problema se requiere la programación de 200 trabajos los cuales tienen una ruta que consta de 5 etapas con una cantidad determinada de máquinas por estación, donde cada trabajo sigue una determinada ruta por características de este, es decir, un problema JSF. Sin embargo, la aplicación del algoritmo es adecuado para un sistema FSF. El algoritmo permite programar gran cantidad de trabajos con requerimientos del proceso distintos en JSF asignando un tiempo de procesamiento y desplazamientos de cero; así se crea una aparente secuencia igual para todos los trabajos.

La aplicación consiste en programar las operaciones de fotografía, nivelación de terreno, fertilización, fumigación y siembra; aplicando el proceso de plantación industrial de la caña de azúcar. Estas operaciones cuentan con tiempos de procesos particulares y, para las operaciones de nivelación, fertilización y fumigación, su procesamiento en las fincas depende de las condiciones del terreno; por lo cual se tiene una secuencia de operaciones específica a cada finca. También, son dadas las ubicaciones de las fincas para calcular los desplazamientos.

1. La primera etapa del proceso es la fotografía aérea con drones, la cual permite hacer un reconocimiento del estado del terreno de cada finca, arrojando el área de la finca, el porcentaje de desnivel y si el terreno necesita ser fertilizado y/o fumigado o no, el tiempo en el que los drones realizan esta operación es el mismo para todas las

fincas, y el tiempo de alistamiento es de 194 minutos siendo este el 97% del tiempo total del proceso, además, la empresa posee siete drones disponibles para esta actividad.

2. La siguiente etapa es la nivelación del terreno, esta operación se realiza si el porcentaje de desnivel es mayor al 5% o menor al 1% para garantizar el adecuado funcionamiento de los equipos de siembra, fertilización y fumigación además del adecuado flujo de agua y para evitar el empozamiento de fertilizantes; la empresa cuenta con cinco equipos para nivelar el terreno, cada uno requiere un tiempo de alistamiento de 30 minutos y un poseen un tiempo de proceso de 15 segundos por metro cuadrado recorrido.
3. La tercera etapa corresponde a la fertilización la cual se hace con el fin de reforzar y estabilizar los nutrientes necesarios para el cultivo; los 10 equipos de fertilización que dispone la empresa requieren 10 minutos de alistamiento y medio minuto por metro cuadrado recorrido.
4. La penúltima operación por realizar es la fumigación, esto para evitar las plagas en las zonas propensas a estas; los equipos necesitan 10 minutos para ser alistados y 10 segundos por metro cuadrado a fumigar, para esto la empresa tiene a su disposición siete equipos.
5. Finalmente, la última etapa del proceso es la siembra, una vez se han cumplido todos los requerimientos de nivel, nutrientes y riesgo, se procede a sembrar la caña de azúcar, la empresa cuenta con 10 equipos para esta operación los cuales tienen un tiempo de alistamiento de un minuto y un tiempo de proceso de 45 segundos por metro cuadrado a sembrar.

Particularmente, al tratarse de plantación en fincas se entiende para el problema que las máquinas son los equipos disponibles por operación. Además, se cuenta con un tiempo de desplazamiento variable, es decir, dependiendo de la secuenciación de las fincas, el tiempo de desplazamiento cambia. Por otra parte, existe una restricción de ocupación de las máquinas dado que no es posible que dos o más máquinas estén procesando el mismo trabajo, es decir, trabajando en la misma finca a la vez. El objetivo principal para este caso es presentar una secuencia de los trabajos en cada una de las etapas que permita minimizar el tiempo de terminación de hasta 280 horas laborales (Temporada de primavera).

En la primera etapa (Asignación de Drones) se plantearon tres reglas de despacho estáticas FIFO, SPT y LPT, donde para este caso, el tiempo de proceso es el tiempo de desplazamiento de los drones el cual se calculó de la ecuación (1).

$$T_j = D_{(j-1)} + S_j + A_j \quad (1)$$

Donde $D_{(j-1)}$ corresponde al valor del desplazamiento del dron desde la finca inmediatamente anterior; S_j el tiempo de alistamiento de la finca y A_j tiempo de procesar la actividad. Se utilizaron reglas de despacho que pudieran ser utilizadas con los parámetros dados en el caso y el orden en que se realice la secuencia por cada regla se asigna a la primera máquina, en el caso la fotografía aérea.

Se resalta que tiempos de alistamiento y proceso de la primera operación son constantes para todas las fincas, sin importar sus dimensiones, solo se tuvo en cuenta el tiempo de desplazamiento como criterio de asignación. Posteriormente, las siguientes etapas u operaciones se asignan por orden FIFO, donde el trabajo FI (First In) es el primero que termina en la operación inmediatamente anterior. Es importante saber que no significa que en todas las etapas el orden de los trabajos sea el mismo, ya que todas tienen tiempos de procesos diferentes.

Para la representación de los trabajos que se usaron diagramas de Gantt que es una herramienta gráfica cuyo objetivo es mostrar el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total. Esta representación se realiza sobre un eje horizontal y otro vertical donde cada eje representa la siguiente información:

- En el eje horizontal: Escala de tiempo definido en términos de la unidad más adecuada al trabajo que se va a ejecutar: horas.
- En el eje vertical: Disposición de los trabajos.

En función a los dos ejes se representa la duración de todos los trabajos a realizar, según el espacio temporal. [16]

5.1 Resultados de la aplicación del algoritmo

Dependiendo de cada regla de despacho escogida se obtuvieron tiempos de inicio, de proceso y de finalización diferentes en cada etapa los cuales se encuentran graficados en un diagrama de Gantt para cada regla en las Figuras 1, 2 y 3.

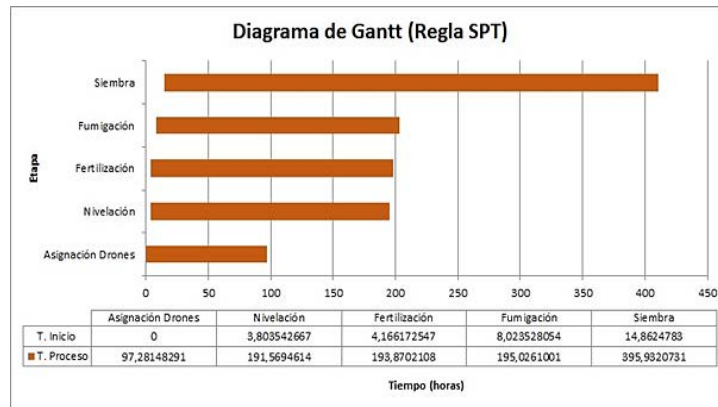


Figura 1. Diagrama de Gantt para la regla SPT

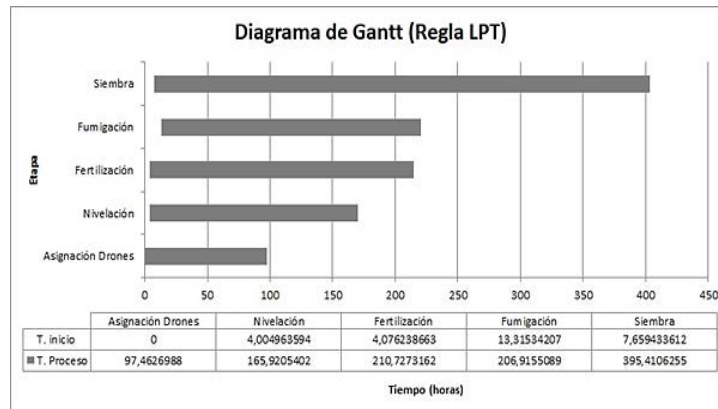


Figura 2. Diagrama de Gantt para la regla LPT

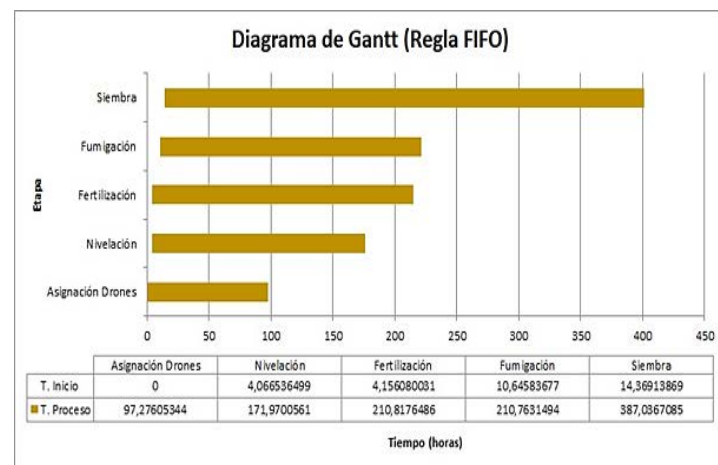


Figura 3. Diagrama de Gantt para la regla FIFO

Asimismo, se obtuvieron indicadores diferentes para cada regla aplicada los cuales se presentan en la Tabla 1. Se señala que, los datos de retardo y tardanza fueron calculados únicamente para la siembra, debido a que al ser la última actividad de esta depende el tiempo de retraso. Teniendo en cuenta lo obtenido se observa que la regla que minimiza el Makespan de la programación es FIFO.

Tabla 1. Resultados de los indicadores para cada regla de despacho utilizada

	SPT	LPT	FIFO
Cmax	410.795	403.070	401.406
Flujo total	101087.711	99919.070	97680.037
Lmax	130.795	123.070	121.406
Tardanza total	2691.419	42839.925	2335.033

Con el objetivo de tener la caña sembrada antes de la fecha límite, se tomó la decisión de aumentar el número de equipos de siembra en todas las reglas de despacho. En la Tabla 2 se muestra la cantidad de equipos necesarios para cumplir con el tiempo límite de terminación y los indicadores actualizados. De acuerdo con eso, la regla FIFO continúa minimizando el Makespan. Sin embargo, la regla LPT permite que se cumpla el plazo estipulado con menor cantidad de equipos, es decir, menores gastos.

Tabla 2. Resultados con Aumento de capacidad

	SPT	LPT	FIFO
No. de equipos de siembra	16	15	16
Cmax	276.197	270.259	262.996
Flujo total	88446.858	88951.411	85859.052
Lmax	-3.803	-9.741	-17.004
Tardanza total	0	0	0

Además, se graficaron los nuevos tiempos de inicio, de proceso y de terminación para cada etapa y para cada regla como se muestra en las Figuras 4, 5, 6. Debido a que solo se aumentó la cantidad de equipos para la etapa de siembra, los únicos tiempos que varían son los de esta etapa; mientras que para las otras etapas se mantienen los tiempos iniciales.

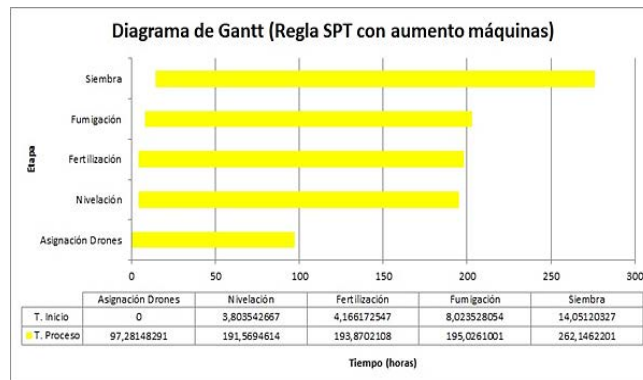


Figura 4. Diagrama de Gantt para la regla SPT con el aumento de capacidad

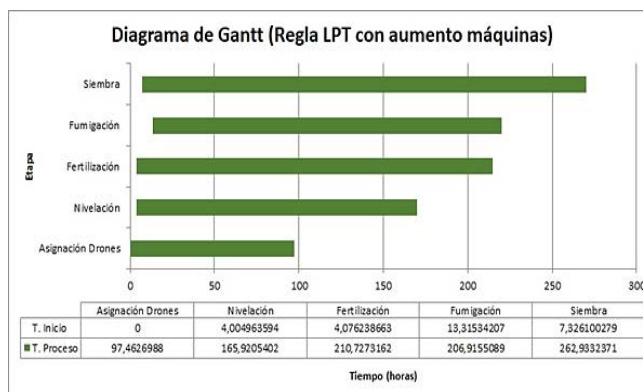


Figura 5. Diagrama de Gantt para la regla LPT con el aumento de capacidad

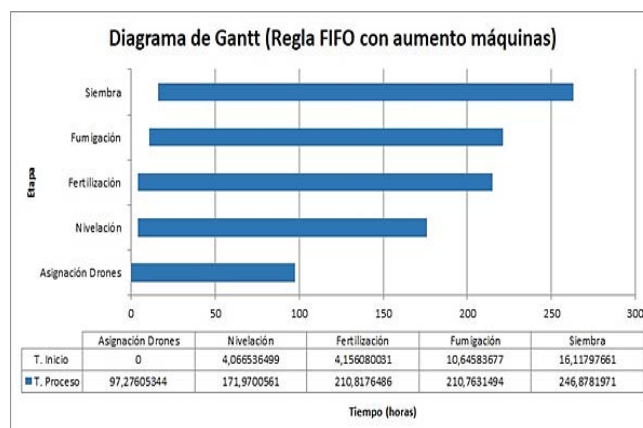


Figura 6. Diagrama de Gantt para la regla FIFO con el aumento de capacidad

6. CONCLUSIONES

Esta investigación hace un aporte en el ámbito práctico, ya que permitirá dar solución eficiente a los problemas de secuenciación de operaciones en industrias, y también en el ámbito académico, pues servirá como punto de partida para trabajos futuros, como la comparación de efectividad computacional de diferentes técnicas para solucionar el mismo problema.

En términos computacionales, se considera que no es pertinente formular el problema usando programación lineal debido a que este caso entra dentro de la clase de problemas combinatoriales complejos, conocidos como NP-Hard. Por otra parte, el programa se tardaría demasiado tiempo encontrando una solución óptima y, no es conveniente en caso de que se requieran realizar cambios en la programación; debido a factores externos que afecten la siembra y cosecha tales como el clima, la economía o la variabilidad de la demanda. Se sugiere aplicar estudios de algoritmos genéticos o heurísticos más completos que puedan secuenciar los trabajos teniendo en cuenta las operaciones, la fecha de entrega o que relacionen también costos asociados y que logren determinar una secuenciación en un tiempo computacional razonable, así se tiene mayor control sobre las decisiones de producción basados en criterios de evaluación pertinentes al análisis.

Los resultados muestran que el algoritmo funciona combinando las heurísticas de búsqueda y las constructivas, las cuales no solo mejoran la calidad de la solución, sino que también se ahorran tiempos de cálculo. Se reconoce que, al ser trabajado de una forma general y heurística, las soluciones obtenidas no presentarán resultados como las que se podrían obtener si se realiza un algoritmo de optimización enfocado en un proceso que cumpla cada uno de los requerimientos particulares.

Se recomienda en la consecución del algoritmo tener en cuenta que las reglas de despacho tradicionales, generalmente, no se ajustan para la secuenciación de los trabajos cuando sus tiempos de desplazamientos son variables, por consiguiente, para reglas como LPT se tiene una interpretación diferente. Para la aplicación teórica se asignaron los siete drones a los cultivos más lejanos al origen; sin embargo, las siguientes iteraciones asignan las fincas más cercanas para reducir el tiempo de desplazamiento. Los resultados mostraron que la regla de programación FIFO para secuenciación, es con la cual, se obtuvieron mejores resultados. Debido a eso, puede que existan mejores soluciones de secuenciación que no siguen una regla de despacho estática como SPT y LPT cuando se tienen tiempos de desplazamientos variables. Con los resultados de la aplicación se propone que siga el aumento mínimo de equipos de siembra para realizar las operaciones dentro de las 280 horas según la regla de despacho, por ejemplo, para LPT se aumentan cinco equipos y para la regla FIFO, que minimiza el tiempo de terminación total, el aumento requerido es de seis equipos; lo que supone mayores gastos.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Osorio y T. Mota, «Planificación jerárquica de la producción en un Job Shop Flexible,» *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 44, pp. 158-171, 2008.
- [2] R. Ruiz y C. Maroto, «A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics,» *European Journal of Operational Research*, vol. 165, n° 2, pp. 479-494, 2005.
- [3] W. Hsu, «On the general feasibility test of scheduling lot sizes for several products on one machine,» *Management Sci.*, vol. 29, n° 1, pp. 93-105, 1983.
- [4] P. Jimenez, «Solución del problema de programación de flow-shop flexible empleando el algoritmo genético de Chu-beasley,» pp. 13-15, 2012.
- [5] S. Jain y S. Meeran, «Deterministic Job shop scheduling: past, present and future,» *European Journal of Operational Research*, vol. 113, pp. 390-434, 1999.
- [6] K. Cansen, M. Mastrolilli y R. Solis-Oba, «Approximation algorithms for flexible job shop problems,» *Proceedings of Latin America Theoretical Informatics*, pp. 68-77, 2000.
- [7] A. Rincon, «Programación de la producción en ambientes Job Shop-bajo pedido, basado en el enfoque de proyectos con restricciones de recursos,» 2015. [En línea]. Available: Doctoral Dissertation.
- [8] S. M. Johnson, «Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included,» *Naval Research Logistics*, vol. 1, pp. 61-68, 1954.
- [9] H. Wang, «Flexible flow shop scheduling: optimum, heuristics and artificial intelligence solutions,» *Expert Systems*, vol. 22, pp. 78-85, 2005.
- [10] W. Xia y Z. Wu, «An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems,» *Comput. Ind. Eng.*, vol. 48, n° 2, pp. 409-425, 2005.
- [11] W. e. a. Sarache Castro, «Procedimiento para evaluar la estrategia de manufactura: aplicaciones en la industria metalmeccánica,» *CDA*, vol. 20, n° 33, 2007.
- [12] T. Tanev, T. Uozumi y Y. Morotome, «Hybrid evolutionary algorithm-based real-world flexible job shop scheduling problem: application service provider approach,» *Appl. Soft Comput.*, vol. 5, n° 1, pp. 87-100, 2004.
- [13] C. Lopez, «Metodología de programación de producción en un flow shop híbrido flexible con el uso de algoritmos genéticos para reducir el makespan,» 2013.
- [14] M. L. Pinedo, «Deterministic Models Preliminaries,» de *Scheduling: Theory, algorithms and systems*, New York, Springer, 2008, pp. 26-28.
- [15] R. Montoya y D. A. Ortiz, «Programación de la producción bajo un ambiente de colaboración en una cadena de suministro diádica,» *Ingeniería y Universidad*, vol. 16, n° 2, pp. 315-331, 2012.
- [16] A. Mena, «Programación de trabajos en maquinas en paralelo con relaciones de precedencia,» 2015. [En línea].
- [17] J. Adams, E. Balas y D. Zawack, «The shifting bottleneck producer for job shop scheduling,» *Management Science*, vol. 34, pp. 391-401, 1988.
- [18] L. Pinedo, «Example of System Designs and Implementation,» de *Scheduling: Theory algorithms and systems*, 3 ed., New York, Springer, 2008.
- [19] S. Mora y J. L. Espinoza, «Programación visual basic (VBA) para Excel y analisis numerico.»

Anexo 1. Problema de programación de operaciones

Taller

1. *Contexto:* Una empresa cultivadora de caña de azúcar tiene como uno de sus objetivos brindar a sus asociados servicios que le permitan desarrollar su labor de la manera más eficientemente posible. Para cumplir este objetivo ha conformado diferentes equipos de trabajo que van de cultivo en cultivo haciendo la actividad designada y contratada por el cultivo correspondiente. Los servicios ofrecidos son:

- *Fotografía aérea con drones:* Este proceso permite hacer levantamiento topográfico, determinación de niveles de diferentes nutrientes en la tierra y determinar posibles plagas a combatir en esa zona. También calcula el área exacta del cultivo para que Asocaña pueda determinar el tiempo exacto de los próximos servicios a prestar y la caracterización completa del terreno.
- *La información recogida por los drones es enviada desde el cultivo en tiempo real vía satélite.* Los drones hacen su trabajo en el mismo tiempo sin importar el tamaño del cultivo, siendo el alistamiento el 97% del tiempo total del proceso. Dicho alistamiento dura 194 minutos y comienza una vez el dron llega al cultivo. Actualmente la empresa cuenta con siete drones para hacer esta actividad.
- *Nivelación de terreno:* acondicionar el terreno si existe un desnivel superior al 5% para que la maquinaria de los equipos de siembra, fertilización y fumigación puedan funcionar correctamente, y no inferior al 1% para que el agua corra de manera adecuada y evite apozamiento de fertilizantes. Luego de llegar al cultivo, el equipo requiere un tiempo de alistamiento de media hora y requiere 15 segundos por metro cuadrado del cultivo para ejecutar la nivelación. Actualmente la empresa cuenta con cinco equipos para hacer esta actividad. La nivelación debe empezar después de haber fotografiado completamente el terreno con los drones, ya que, esta información es la que permite determinar si el terreno requiere nivelación o no.
- *Fertilización:* reforzar y estabilizar los nutrientes necesarios para el correcto desarrollo del cultivo cuando hay lugar a hacer correcciones de este tipo. Luego de llegar al cultivo los equipos de fertilización requieren un tiempo de alistamiento de 10 minutos y medio minuto por metro cuadrado de cultivo a fertilizar. Actualmente la empresa cuenta con 10 equipos para hacer esta actividad. La fertilización debe empezar después de haber nivelado el terreno.
- *Fumigación:* controlar de manera preventiva aquellas zonas que son propensas a determinado tipo de plagas. Una vez llegan al cultivo los equipos necesitan 10 minutos de alistamiento y 10 segundos por metro cuadrado a fumigar. Actualmente la empresa cuenta con siete equipos para hacer esta actividad. La fumigación debe empezar después de haber realizado la fertilización.
- *Siembra:* en los cultivos que ya cumplan los requerimientos de nivel, nutrientes y riesgo de plagas, se puede hacer la correspondiente siembra de la caña. Una vez lleguen al cultivo, tienen un tiempo de alistamiento de 1 minuto y 45 segundos por metro cuadrado a sembrar. Sólo hay diez equipos de siembra.

A los diferentes cultivos se puede acceder por diferentes caminos dependiendo de las características del equipo: los drones pueden acceder por vía aérea cubriendo la ruta directa, los equipos de fertilización y fumigación pueden usar la red de caminos de tráfico ligero y las carreteras principales, y los equipos de nivelación y siembra únicamente pueden transitar por las carreteras principales; dicha información se encuentra anexa. Los tiempos de desplazamiento entre cultivos dependen de la distancia recorrida (ver tablas anexas) y de la velocidad del equipo correspondiente (drones 300 km/h, Nivelación, Fertilización y Fumigación, 60km/h y Siembra 30 km/h).

2. *Problemática:* La empresa requiere diseñar un método de programación de las operaciones de fotografía, nivelación, fertilización, fumigación y siembra con un ingeniero industrial. En años anteriores no se ha logrado realizar todas las actividades antes de la fecha límite de siembra de la caña. Es decir, muchos cultivos no fueron atendidos dentro del periodo específico de primavera (intervalo de 35 días), lo que implicó que la caña no estuvo lista para satisfacer la demanda de otoño. Este problema aumenta las pérdidas de productividad del sector y disminuyó significativamente la utilidad de la asociación. Asuma las siguientes condiciones:

- Cada equipo puede procesar un único cultivo simultáneamente.
- En cada cultivo, el número de hectáreas es diferente. Esta información va a ser identificada por el dron y sólo después de la fotografía aérea será conocida, los datos que encontrará el dron se encuentran en el archivo adjunto.

- La primera actividad que se debe realizar en un cultivo es la fotografía. En seguida, debe nivelarse el terreno. Después, los equipos de fertilización, fumigación, y siembra deben hacer sus labores en ese orden.
 - Los drones están en el punto (0,0) al inicio de la operación.
 - Las operaciones deben realizarse en el menor tiempo posible. Su meta es lograr ejecutar estas tareas en menos de 280 horas laborales. ¿Es posible cumplir esta meta? Si pudiera aumentar la capacidad del equipo de una sola actividad, ¿qué actividad elegiría y cuántos recursos acumentaría?
 - Los drones pueden activarse desde el momento cero.
 - No se permite hacer *preemption* de las operaciones.
3. *Reto*: Desarrolle un método de programación en VBA o Java que permita implementar al menos tres reglas diferentes de programación de las actividades y calcule las siguientes medidas de desempeño de la programación: Cmax, Flow time, Lmax y total tardiness.

Las imágenes diagnósticas son una herramienta imprescindible en la práctica médica y, con ellas, los especialistas pueden corroborar o en su defecto desmentir diagnósticos después de una evaluación física a los pacientes. En el área de diagnóstico por imágenes, las proyecciones son adquiridas a través del uso de radiación, ondas electromagnéticas o ultrasonido ya sea en dos o tres dimensiones. Los equipos usados en esta práctica poseen una configuración protocolaria definida para el campo médico para la adquisición, almacenamiento y procesamiento de estas imágenes, conocido como DICOM. Dicho formato provee seguridad de tipo encriptación a la información médica y demográfica contenida, sabiendo que esto constituye la historia clínica de un paciente y por ende un documento médico-legal, propio e intransferible. De otro lado, como cualquier máquina, estos equipos cuentan con características físicas tales como tamaño, capacidad de penetración en las estructuras del cuerpo humano, magnitud de onda, sensibilidad de captación, entre otras, con el fin identificar patologías y/o afecciones de la salud humana, sirviendo como guía para la toma de conductas viables y eficaces. Las entidades de salud que proveen este tipo de servicios, cuentan con la utilización de un sistema Picture Archiving and Communication System (PACS), el cual permite la adquisición, almacenamiento, transmisión, despliegue e impresión de las imágenes e informes de procedimientos de diagnóstico [1], a futuro se espera, dotar dicho sistema con tecnología de inteligencia artificial para que a partir de la comparación de un sinnúmero de imágenes y la indicación clara de una serie de criterios fisiológicos del ser humano, permita identificar en menor tiempo las afecciones reflejadas en las imágenes; de igual manera, se espera que este tipo de inteligencias segmente las imágenes por prioridad según la gravedad del diagnóstico [2]. Es aquí donde los algoritmos y su aplicación toman valor en estos campos, contribuyendo a la evolución, no precisamente como un rival del especialista en salud, sino como un apoyo para todos los actores del proceso; empero, los profesionales de la salud que saben cómo usar la tecnología a su favor tendrán una clara ventaja sobre aquellos que se resisten.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la demanda de imágenes diagnósticas a nivel hospitalario y/o ambulatorio, es significativamente alta, lo que ha obligado a la mayoría de especialistas que las interpretan a dividir su tiempo en la ejecución de esta tarea en varios momentos. Del mismo modo, para las entidades de salud, ha sido imperioso evolucionar tecnológicamente para optimizar tiempos de entrega, elevar el factor de calidad y fidelizar usuarios por la competitividad del mercado. Como consecuencia, nace la teleradiología, posibilitando el acceso a las imágenes desde cualquier lugar evitándole así, desplazamientos al profesional; no obstante, sabemos que, a nivel computacional una imagen ocupa en la memoria de una máquina mucho más espacio de almacenamiento que un documento de texto, por ello, en algunas instituciones se está migrando al uso de otro tipo de formatos diferentes al DICOM (jpg, jpeg, png, entre otros) que aunque nos garantiza la conservación de la imagen por mucho más tiempo, la calidad de la misma se ve afectada y decrece según el nivel de compresión. La prolongación de vida de las imágenes está sujeta a la importancia de la valoración evolutiva de las enfermedades y a la disposición de la ley colombiana evidenciable en la resolución 1995 de 1999.

En el presente trabajo con la elaboración de un software ejecutado en Matlab, se quiso mejorar la calidad de algunas de las imágenes diagnósticas almacenadas en dichos formatos, corrigiendo sus falencias ya sea que hayan sido captadas desde la adquisición o resultantes durante el proceso. En la mayoría de los casos son atribuidas a condiciones atmosféricas, tiempo de exposición, nivel de compresión o hasta condición clínica y estadio del paciente. Así mismo, se busca acentuar características relevantes que permitan la emisión de dictámenes precisos a los pacientes y a sus tratantes. Posterior a la elaboración y ejecución del algoritmo diseñado, éste es puesto a juicio de una médica radióloga, a la espera de un concepto desde el punto de vista de un experto que nos permita identificar la verdadera utilidad del sistema, su posible aplicación, alcance, orientación, entre otros aspectos.

2. MÉTODO

2.1 Selección de la muestra

Se tomaron como objeto de estudio fotografías de internet en formato jpg, por su tamaño y facilidad de adquisición, puesto que desde un formato DICOM se debe contar con el consentimiento del propietario de las mismas, así como con la autorización de la entidad que las adquirió, en aras de conservar el formato original.

2.2 Elaboración de software con Matlab

Con la herramienta MATLAB se crea un GUI que permite un control sencillo de la aplicación software (Figura 1), lo cual le elimina al usuario la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos con objeto de que ejecutar la App.

¹ dksanchez@sanmateo.edu.co

² wprada@sanmateo.edu.co

³ rceballos@sanmateo.edu.co

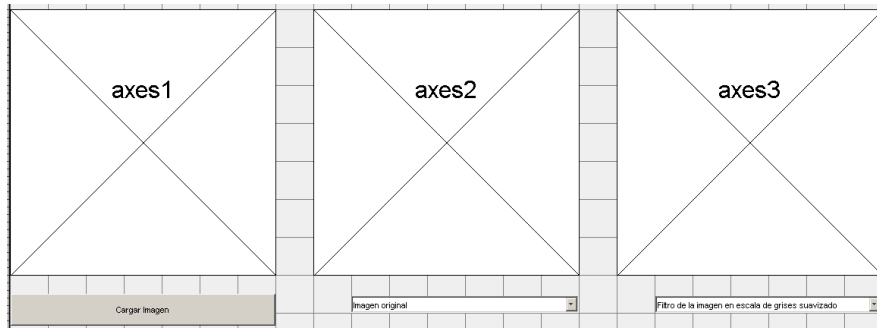


Figura 22. Axes o contenedores en un GUI de Matlab

El GUI incluye algunos controles, uno de ellos es el botón que permite cargar la imagen (Figura 2) en el primer contenedor (axes 1) y sobre la cual se aplicaran los filtros que se verán reflejados en los demás contenedores, logrando así, visualizar cualidades propias de la imagen que puedan aportar valor significativo a la práctica médica (Figura 3).

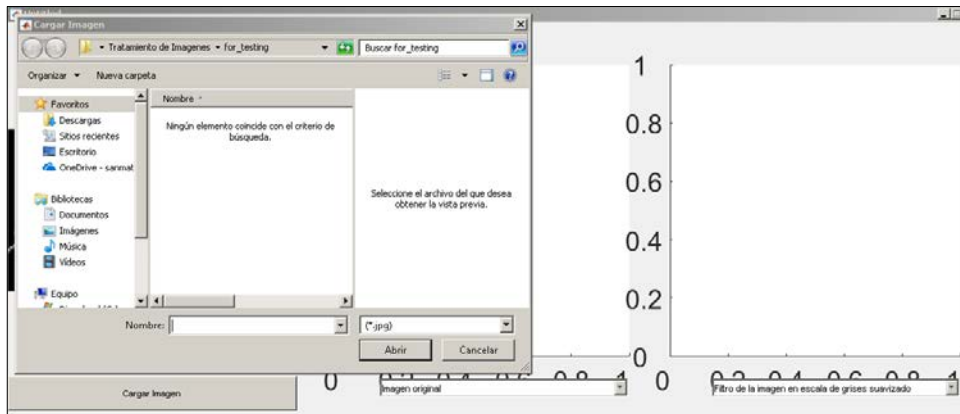


Figura 2. Proceso de carga de imagen [10]

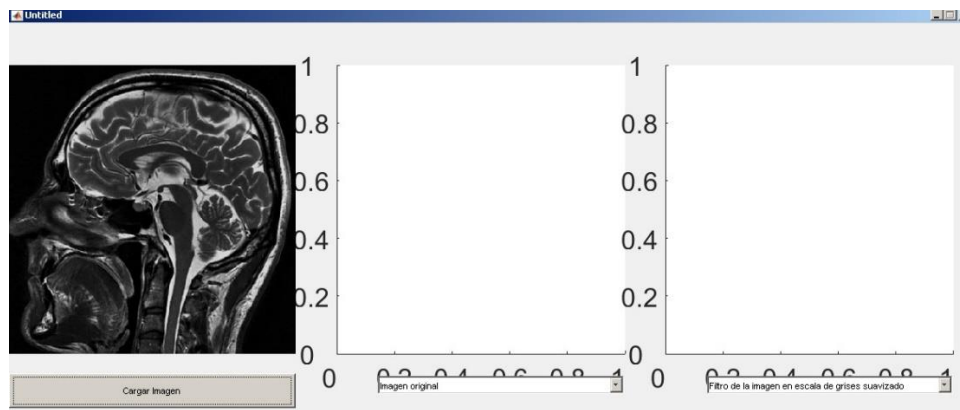


Figura 3. Cualidades propias de la imagen

Con menús desplegables, se listan cada uno de los filtros que posibilitaran suavizar y/o destacar ciertos atributos de las imágenes (Figura 4), en pro de ofrecer un equilibrio adecuado y propicio a la vista de los especialistas.

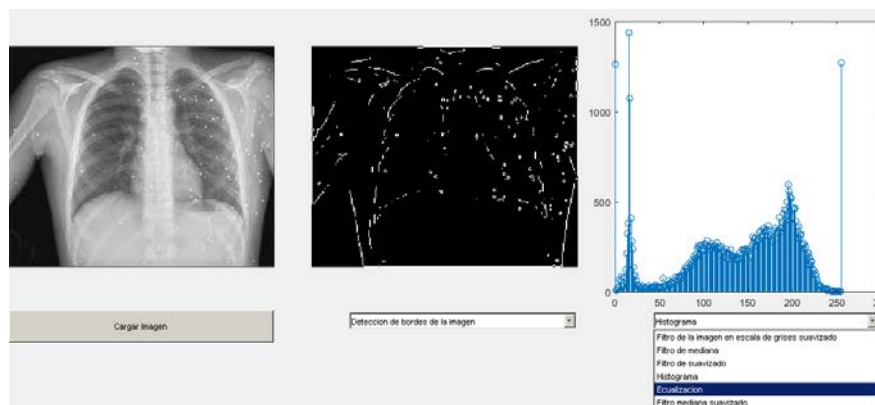


Figura 4. Muestra menú desplegable, imagen tomada y modificada desde [11]

Para que la interfaz gráfica sea completamente funcional, en el módulo de control, se generó un código de alto nivel similar a BASIC o C (Figura 5), con la implementación de un *switch*, se muestra una aplicación intuitiva a través de la funcionalidad de los menús desplegables. Algunos de ellos, permitieron identificar afecciones de la imagen causadas por intensas y/o repentinas perturbaciones a los haces de luz emitidos por los equipos. Otros de los filtros permitieron suavizar las perturbaciones existentes dando cabida a una imagen de mayor valor diagnóstico. En el primer menú desplegable se ejecutan nueve filtros y en el segundo cinco filtros; las imágenes son visualizadas posteriormente en los axes sobre cada menú desplegable con el filtro aplicado.

```

7 - try
8 -
9 -     switch action,
10 -
11 -         case 'activateFigure'
12 -             varargout = layout&activate(varargin{:});
13 -
14 -         case 'activexControl'
15 -             varargout = get&activexControlList(varargin{:});
16 -
17 -         case 'activexSelect'
18 -             varargout = select&activexControl;
19 -
20 -         case 'applicationOptions'
21 -             fig = varargin{1};
22 -             guideopts(fig, 'edit');
23 -
24 -         case 'configNewGobject'
25 -             varargout = configNewGobject(varargin{:});
26 -
27 -         case 'changeParent'
28 -             varargout = changeParent(varargin{:});
29 -
30 -         case 'copy'
31 -             varargout = copyGobject(varargin{:});
32 -
33 -         case 'deleteFigure'
34 -             varargout = deleteFigure(varargin{:});
35 -

```

Figura 5. Código fuente aplicación en Matlab

3. RESULTADOS

3.1 Aplicación de filtros

3.1.1 Escala Hounsfield

El ojo humano no puede discriminar más de 20 tonos en escala de grises, para el caso de los especialistas en el diagnóstico por imagen basados en la directriz dada por la escala de Hounsfield (Figura 5), consiguen identificar estructuras humanas y presencia de otro tipo de elementos según la modalidad evaluada. De este mismo modo, las patologías tales como tumores, abscesos, derrames entre otros, muestran su componente interno y su compromiso con las estructuras adyacentes. Los estudios de planeamiento específicamente evalúan estos parámetros para servir como guía a los cirujanos quienes gracias a estas determinaran área de abordaje, instrumentos quirúrgicos y forma en que se deben conservar las muestras.

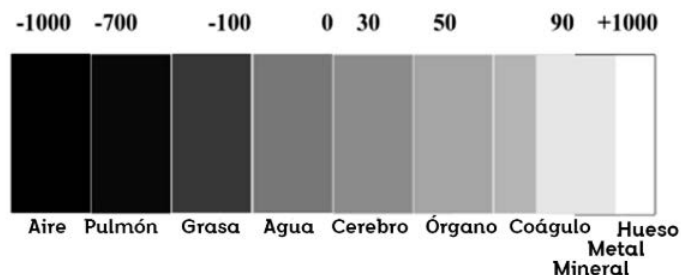


Figura 6. Escala de Hounsfield [12]

En la evaluación realizada en escala de grises se presenta la proyección AP (anterior posterior) de una radiografía de tórax (Figura 7) con la presencia de perdigones claramente identificables por la tonalidad que presentan, lo que confirma lo establecido por Godfrey Newbold Hounsfield. Caso similar sucede con la proyección frontal de una cadera de adulto posterior (Figura 8) a la realización de una artroplastia, con presencia de una prótesis metálica a nivel de fémur izquierdo cuya integridad, diámetro y localización es fácilmente identificable por su realce.

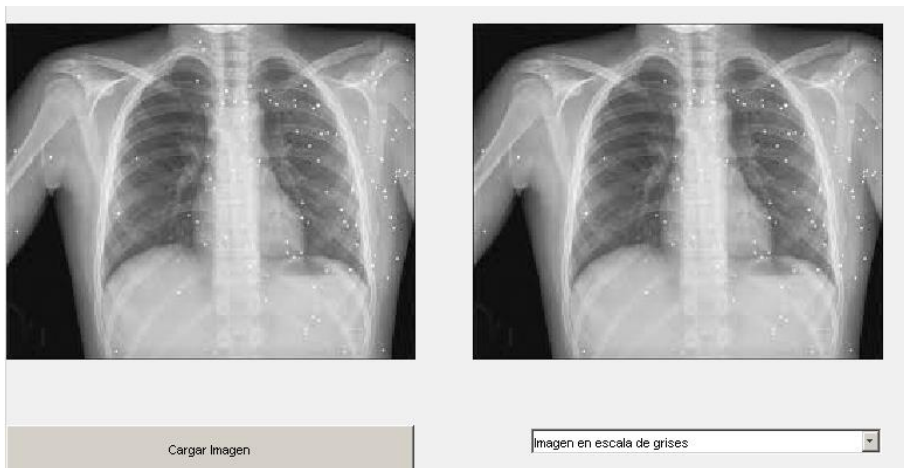


Figura 7. Proyección AP de tórax con presencia de perdigones [11]

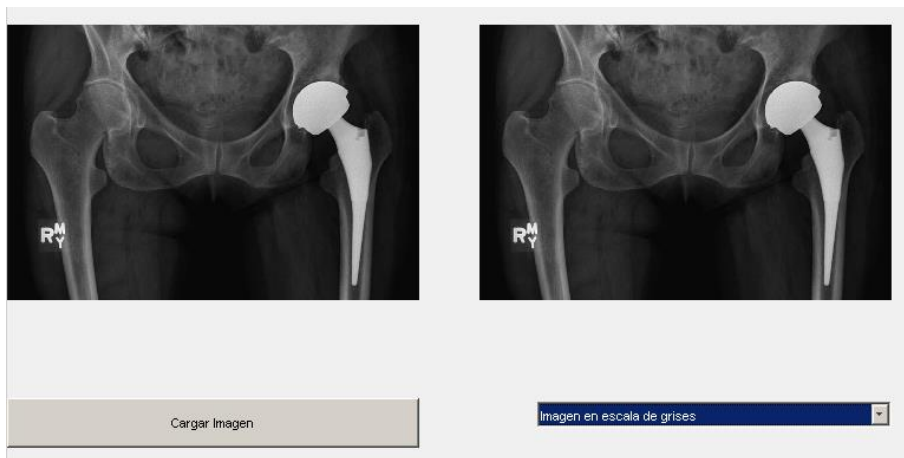


Figura 8. Proyección frontal de una pelvis de adulto con prótesis [13]

La escala Hounsfield es una guía solo para los estudios adquiridos a través de la utilización de radiación electromagnética. Caso diferente sucede con la resonancia magnética (Figura 9) que como su nombre lo indica la detección de la imagen se hace a través de ondas magnéticas. En este tipo de modalidad, la escala de grises tiene una significancia diferente, en la siguiente imagen se ve un feto flotando en su líquido amniótico cuya sustancia se presenta en una tonalidad blanca grisácea.

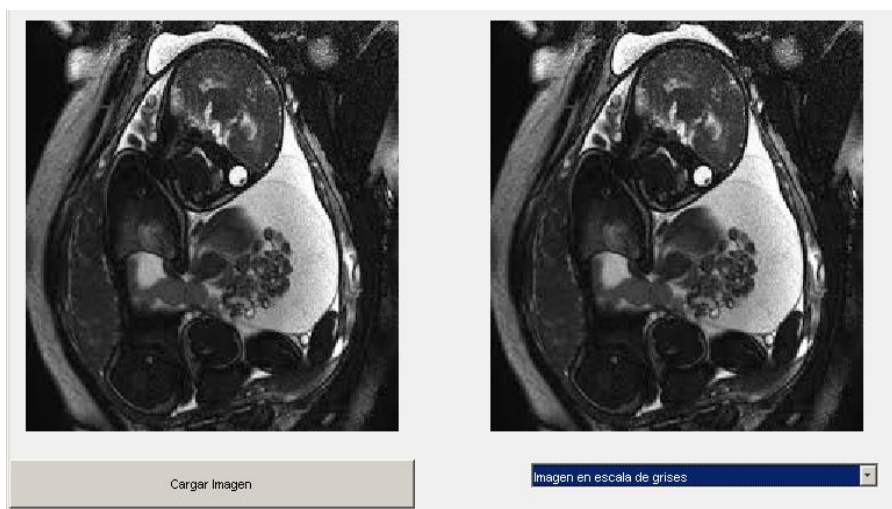


Figura 9. Vista de una resonancia fetal [14]

3.1.2 Detección de bordes

La detección de bordes en MATLAB es una de las operaciones de procesamiento de imágenes más común y básica, cuyo objetivo es determinar las regiones en una imagen que presentan cambios significativos de intensidad en los píxeles que la conforman. Los píxeles de la imagen se ven alterados con la presencia especialmente de elementos radiopacos (materia ofrece resistencia a ser atravesado por los rayos x) como se evidencia en las imágenes de tórax

(Figura 10) y abdomen (Figura 11) tratadas con este filtro y cuyo mayor realce se atenúa en las zonas más cálcicas (hueso) y provee una silueta de los cuerpos extraños contenidos.

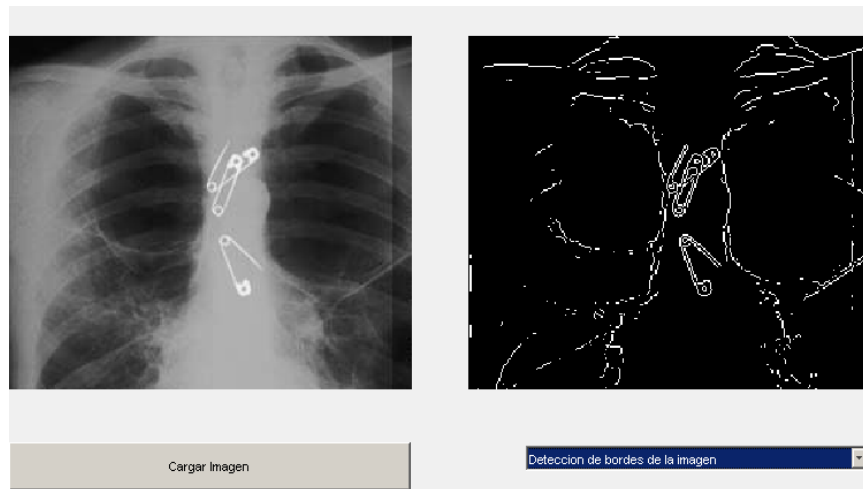


Figura 10. Proyección de radiografía de tórax con presencia de cuerpo extraño (imperdible) [15]



Figura 11. Proyección de radiografía de abdomen con presencia de cuerpo extraño (tijeras) [16]

3.1.3 Medicina nuclear

La gammagrafía es una prueba diagnóstica de Medicina Nuclear que consiste en la administración de una pequeña dosis de radioisótopo denominado trazador. Este material se distribuye por todo el organismo y los distintos órganos lo captan. Después, se utiliza una gammacámara para detectar los rayos gamma que libera el trazador (de aquí las tonalidades que muestran las imágenes). Los puntos "calientes" son aquellas zonas que han captado más material y los puntos "fríos", aquellas zonas donde existe menor captación (Figura 12).

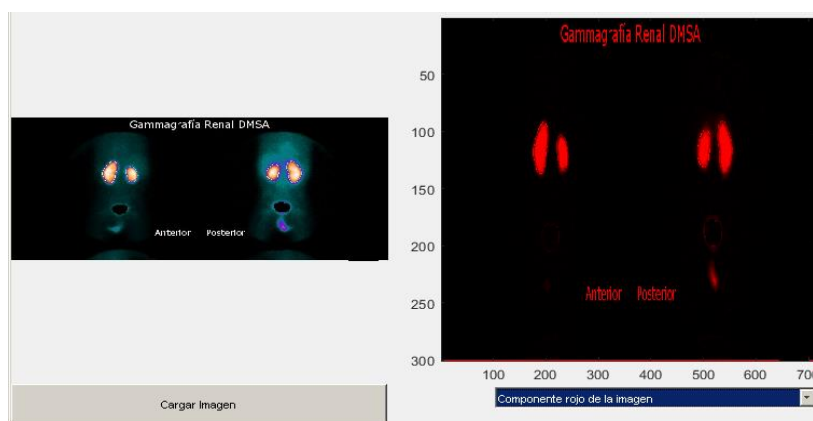


Figura 12. Vista de una gammagrafía renal con ácido dimercaptosuccínico (DMSA) con aplicación del componente rojo de la imagen [17]

Al visualizar el componente rojo de la imagen, hay realce en el área de captación de la imagen demarcando el contorno de los órganos lo que posibilita a la vista del especialista tamaño y funcionalidad de los mismos (Figura 13). Al aplicar

el componente verde de la imagen den la misma gammagrafía se identifica no solo realce de las áreas de captación del fármaco, sino que se puede definir con mayor claridad el contorno del tronco, es decir con este filtro los tejidos blandos hacen su aparición trayendo consigo otros parámetros influyentes en el diagnostico final.

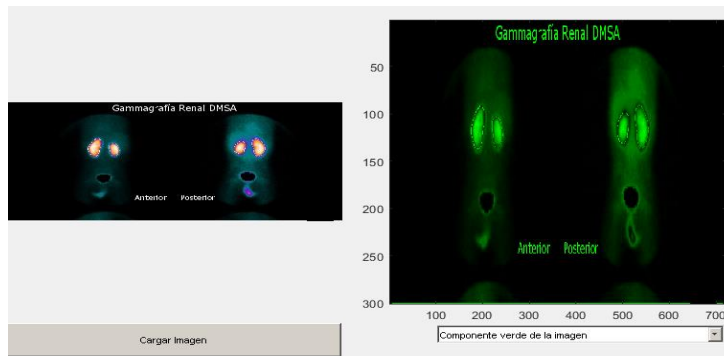


Figura 13. Vista de una gammagrafía renal con ácido dimercaptosuccínico (DMSA) con aplicación componente verde de la imagen [17]

3.1.4 Ruido

En la adquisición de una imagen cuándo se disminuye la dosis de radiación, se modifica la luz ambiental ya se acentuarla o atenuarla o incluso al cambiar el grosor del corte, se presenta una alteración visual conocida como ruido. En la ejecución de los filtros podemos identificar en uno de ellos el nivel de ruido existente y con el filtro de imagen en escala de grises suavizado es inminente la mejoría de la imagen otorgándole así, un mayor nivel de utilidad a la hora de diagnosticar (Figura 14).

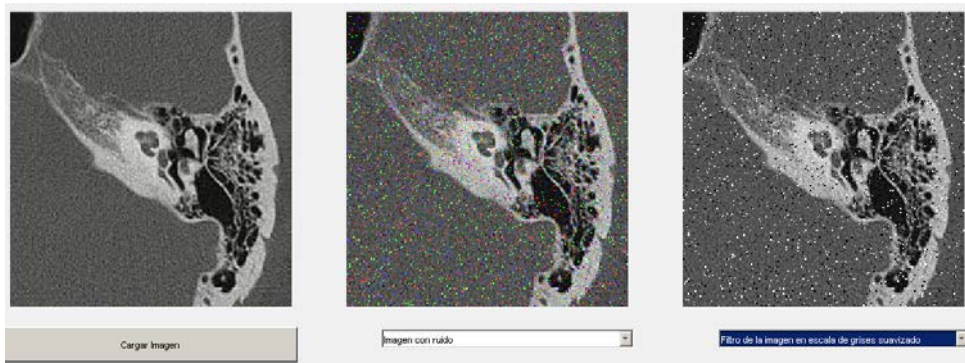


Figura 14. Vista de tomografía de base de cráneo obtenida con corte fino [18]

3.1.5 Histograma

Se dice que el histograma es la huella digital de la imagen, no existen dos imágenes con un mismo histograma. Este tipo de gráficos crecen o decrecen según la escala de grises que contenga la imagen. Como regla general se considera que una imagen tiene un buen contraste si su histograma se extiende ocupando casi todo el rango de tonos (Figura 15). A través de esta gráfica podemos identificar con exactitud qué tan expuesta estuvo la imagen, pues el método convencional de observación no es confiable ya que intervienen otros factores como la luz ambiental y la calidad de la pantalla desde la cual se observa. Véase en las Figuras 16 a 18 cómo se alteran los picos del histograma en imágenes de diferentes tonalidades, entendiendo que en un histograma se combinan dos variables, una para cada eje. En el eje vertical encontramos la cantidad de píxeles y en el eje horizontal los valores de luminosidad.

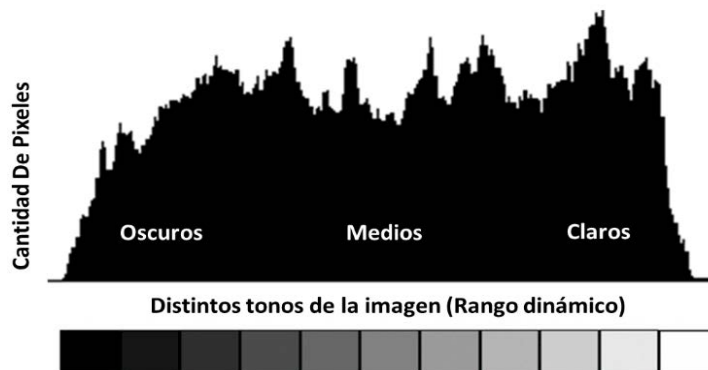


Figura 15. Disposición de un histograma [19]



Figura 16. Histograma de tomografía de rodilla con reconstrucción tridimensional [20]



Figura 17. Histograma de resonancia nuclear magnética de rodilla [21]

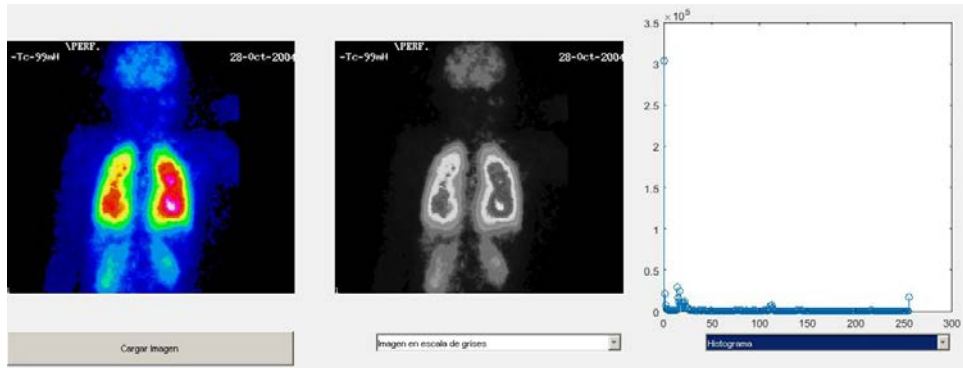


Figura 18. Histograma de gammagrafía pulmonar de perfusión [22]

3.1.6 Blanco y negro

En una escala de grises tan variada, donde cualquier varianza puede representar algún tipo de malignidad para el especialista, el filtro en blanco y negro no mostró gran conveniencia (Figura 19). En algunos casos el realce de las estructuras con altas concentraciones de calcio o liquido fueron evidentes, por el contrario, en otros casos el nivel de grises desaparecía algunas porciones de la imagen lo que no aportaba ningún valor o utilidad; a diferencia de los demás filtros se percibía más como una limitante; la imagen en blanco y negro no es diagnóstica (Figura 20).

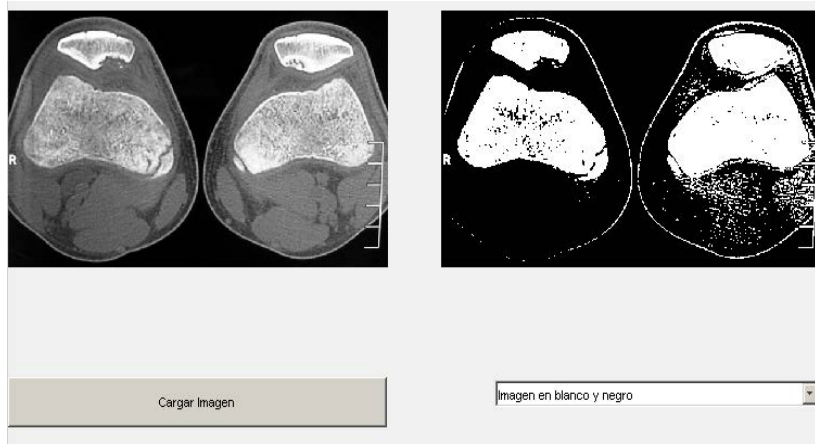


Figura 19. Corte de una tomografía de rotulas [23]

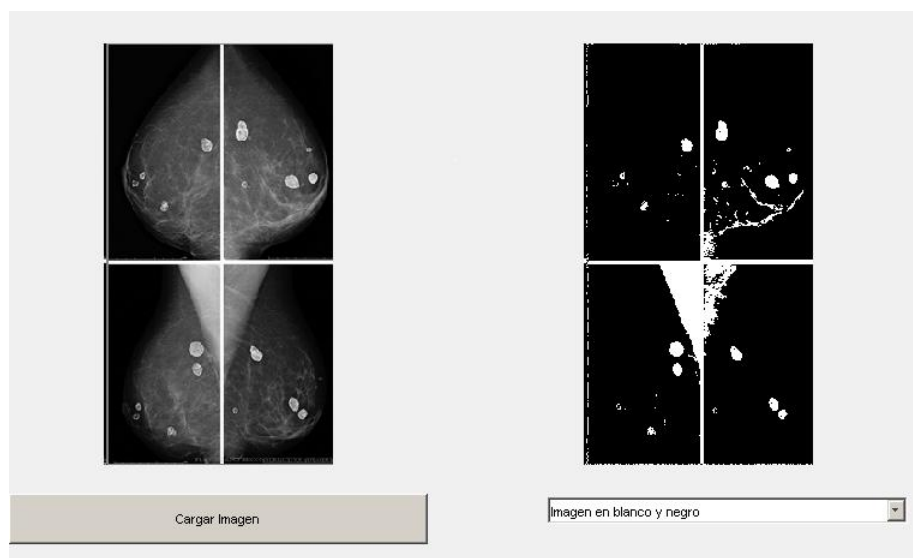


Figura 20. Mamografía con evidencia de quistes oleosos [24]

3.2 Criterios técnicos

Las estaciones de trabajo para diagnóstico ofrecen características avanzadas, su papel es funcionar de manera equivalente a un panel clásico de negatoscopios. Estas estaciones disponen de 2 ó 4 monitores de alta resolución con una profundidad de 10 bits que proporciona 1024 niveles de gris. Las resoluciones más frecuentes capaces de aportar la calidad y fidelidad de imagen necesarias son de 1, 2, 3 y 5 Megapíxeles. De esta manera además de emular los negatoscopios clásicos dotamos al sistema de más facilidad de selección, ordenación y distribución [3]. De acuerdo con esto, se pretende que el software pueda ofrecer criterios suficientes a partir de otros patrones de la imagen para emitir un diagnóstico asertivo, sin que sea necesaria la utilidad de este tipo de monitores.

4. CONCLUSIONES

Posterior a procesar algunas imágenes de diferentes modalidades (MR, CR, CT, DX, MG) y resoluciones, aplicando los filtros con los que cuenta la aplicación, se identificó:

- Para los componentes rojo, verde y azul se define su utilidad en el área de la médica nuclear, dado que las tonalidades ayudan en el caso del verde y el azul a definir mejor los bordes anatómicos, en el caso del rojo nos permite discriminar mejor las áreas de mayor captación de medio de contraste radioactivo. Se sugiere evaluar estos parámetros en los diferentes órganos (cerebro, corazón, riñón, etc.) para determinar su valor en estudios específicos.
- En el caso del filtro “detección de bordes” su utilidad sería aplicable solamente en la radiología convencional cuándo sea necesaria la definición y localización de elementos de mayor densidad tales como cuerpos extraños de localización endocavitaria o en tejidos blandos, así como en la determinación de la integridad de prótesis endoluminales vasculares u ortopédicas. Se sugiere evaluación con diferentes tipos de prótesis con el ánimo de poder hacer una recomendación específica para su utilización.
- El filtro de mediana contribuye en gran manera a mejorar la calidad de la imagen en el caso de encontrarse con artificios por movimiento o distorsión por efectos de ruido o luz en el momento de la adquisición. Se sugiere evaluar este filtro en imágenes de resonancia donde los artificios de movimiento pueden generar distractores que afecten un diagnóstico adecuado.

En términos generales los filtros evaluados presentan un cierto grado de utilidad que en caso de seguir siendo desarrollados para modalidades radiológicas específicas pueden llegar a tener un impacto mayor en la imagen y en el proceso diagnóstico.

REFERENCIAS

- [1] D. Véronique and B. Bolullard, “El Departamento de Imagenología Digital: ¿En qué beneficia al Radiólogo y al Clínico?,” *An. Radiol. México*, vol. 3, pp. 153–161, 2004.
- [2] O. A. Paiva, L. M. Prevedello, O. A. Paiva, and L. M. Prevedello, “The potential impact of artificial intelligence in radiology,” *Radiol. Bras.*, vol. 50, no. 5, pp. V–VI, Oct. 2017.
- [3] R. M. L. Lloreis and D. M. Chavarri, “DiáGnostico Por La Imagen,” *El Sist. Integr. Inf. clínica*, pp. 2009–2036, 2005.
- [4] The Math Works, Inc. “Image Processing Toolbox. Import, Export, and Conversion. Image Processing Toolbox. Image Filtering and Enhancement. Contrast Adjustment. Image Processing Toolbox. 3-D Volumetric Image Processing.” 2019.

- [5] The Math Works, Inc. "Embedded MATLAB®. App Building. GUIDE or Programmatic Workflow. Crear una aplicación sencilla Univ., 2004.
- [6] The Math Works, Inc. "Embedded MATLAB®. Getting Started Guide."2019.
- [7] The Math Works, Inc. "Embedded MATLAB®. User's Guide."2019.
- [8] The Math Works, Inc. "Embedded MATLAB®. Graphics. Images. rgb2gray." 2019.
- [9] The Math Works, Inc. "Image Processing Toolbox. Image Segmentation and Analysis. Object Analysis. Edge Detection." 2019usando GUIDE."2019.
- [10] QueAprendemosHoy.com, "¿Cómo funciona una Resonancia Magnética?" [Online]. Available: <http://queaprendemoshoy.com/como-funciona-una-resonancia-magnetica/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [11] "Tecnicos Radiologos." [Online]. Available: <http://www.tecnicosradiologia.com/2015/05/radiografia-toracica-con-perdigones.html>. [Accessed: 14-May-2019].
- [12] "SEROFCA Protección Radiológica en Instagram: 'Ya casi finaliza junio, el mes de la tomografía y en #Serofca no podemos pasar por alto La Escala de Hounsfield. Los valores de densidad...'" [Online]. Available: https://www.instagram.com/p/Bkk9_8dgRCu/?tagged=mediprot. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [13] "Kaenz-radiografia-protesis-de-cadera-3-1-845x510 - La Licuadora." [Online]. Available: <http://www.lalicuadoratdf.com.ar/2018/06/salud-fast-track-reemplazo-total-cadera-menos-dolor-dias-internacion/kaenz-radiografia-protesis-de-cadera-3-1-845x510/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [14] S. M. Rojas and F. Meléndez, "Utilidad de la resonancia magnética fetal como método de diagnóstico corporal prenatal y revisión de nuestra experiencia: Serie de casos," pp. 4688-4691.
- [15] UCI Pediatría. "Ingesta de cuerpo extraño en pediatría" [Online]. Available: <https://medicinacriticapediatrica.wordpress.com/2017/04/05/ingesta-de-cuerpo-extrano-en-pediatria/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [16] "Las radiografías más extrañas de la historia." [Online]. Available: <https://www.quo.es/salud/g9659/radiografias-mas-extranas-de-la-historia/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [17] Clínica Gammaimagen. "Gammagrafía renal DMSA" [Online]. Available: <https://www.gammaimagen.es/servicios/gammagrafias/gammagrafia-renal-dmsa>. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [18] "¿Qué es la resolución espacial y la resolución en contraste?" [Online]. Available: <https://ecocardio.com/documentos/biblioteca-preguntas-basicas/preguntas-al-radiologo/887-que-es-resolucion-espacial-y-resolucion-contraste.html>. [Accessed: 14-May-2019].
- [19] Blog del Fotógrafo. "Cómo Leer el Histograma de Tus Fotografías (Para Hacer Fotografías Aún Mejores)" [Online]. Available: <https://www.blogdelfotografo.com/histograma/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [20] "TAC rodillas." [Online]. Available: <https://www.cercosalud.com/tac-rodillas>. [Accessed: 14-May-2019].
- [21] "Image: Resonancia magnética de la rodilla - Manual Merck versión para el público general." [Online]. Available: https://www.merckmanuals.com/es-pr/hogar/multimedia/image/v21423216_es. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [22] Tópicos Químicos. "Medicina nuclear" [Online]. Available: <https://quimicadas.wordpress.com/2011/08/27/medicina-nuclear/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [23] Revista de Artroscopía. "Osteocondritis Disecante Juvenil Bilateral de Rótula. Fijación con Pines Biodegradables"
- [24] Divinia Clinic en Majadahonda. "Quistes oleosos en mamografía" [Online]. Available: <http://diviniaclicin.es/aumento-de-senos-con-grasa-propia-por-que-digo-no-a-inyectar-grasa-en-el-pecho/quistes-oleosos-en-mamografia/>. [Accessed: 14-May-2019].
- [25] C. H. McCollough, A. N. Primak, N. Braun, J. Kofler, L. Yu, and J. Christner, "Strategies for Reducing Radiation Dose in CT," *Radiol. Clin. North Am.*, vol. 47, no. 1, pp. 27-40, 2009.
- [26] D. Adame Brooks and R. Miller-Clemente, "Análisis de la calidad diagnóstica de imágenes de tomografía computarizada procesadas con un filtro bilateral," *Imagen Diagnóstica*, vol. 3, no. 2, pp. 50-55, 2012.
- [27] J. Carlos, R. Giraldo, J. J. Fletcher, and C. H. Mccollough, "Computarizada Usando Un Filtro Bilateral Anisotrópico," pp. 55-62, 2010.
- [28] V. A. Vanacloig, "El histograma de una imagen digital," *Upv*, pp. 2-8, 2011.
- [29] "Gammagrafía: ósea, tiroidea.... Pruebas diagnósticas. Clínica Universidad de Navarra." [Online]. Available: <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/pruebas-diagnosticas/gammagrafia>. [Accessed: 14-May-2019].

Modelo de asignación y ruteo aplicado a la distribución de productos de una empresa de derivados lácteos en la ciudad de Bogotá

Oscar J. Herrera O.¹

Astrid V. Naranjo A.²

Julio A. López P.³

Universidad de La Salle – Colombia

Las grandes ciudades presentan un complejo sistema de movilidad que hace que las empresas que desarrollan operaciones logísticas a nivel urbano para el reparto o distribución de sus productos se enfrenten a grandes dificultades para hacer eficiente dicha operación. Por lo cual en el presente trabajo se aborda el problema de la distribución de productos lácteos aplicada a una empresa que cuenta con 2 fábricas, 1 centro de transbordo y 52 clientes distribuidos a lo largo de la ciudad de Bogotá, Colombia. El modelo que se basa en programación entera mixta tiene como propósito encontrar la asignación de la carga o unidades a enviar desde las respectivas fuentes a los diversos clientes al menor costo posible, contemplando diversos canales de abastecimiento de la demanda, varios productos y el uso diferenciado de vehículos. Por otro lado, y como forma de definir la entrega específica de los productos a los respectivos clientes, se abordó un modelo de ruteo en programación binaria pura basado en los resultados previos del modelo de cargas. Ambos modelos se ejecutaron en el aplicativo GAMS. Para escoger la mejor asignación de fuentes a destinos del modelo inicial, se evaluaron tres escenarios donde se tuvo en cuenta la operación con y sin costos fijos y posteriormente el uso de vehículos con diferente capacidad, obteniéndose de esta manera un costo total de 1650 dólares por semana frente al manejo con un solo tipo de vehículo incluyendo costos fijos y variables, resultando de esta forma más económico para la empresa en un 6%. Finalmente se obtiene que, a través del uso del modelo propuesto, se optimiza no solo la asignación de las cargas a enviar, sino también la secuencia de la entrega que se hace a los diferentes clientes del sistema, contribuyendo de esta forma a la mejor conservación de la cadena de frío y por lo tanto propendiendo a una mejora en la calidad del producto al reducirse los tiempos de entrega.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo moderno el manejo de productos perecederos como los lácteos, especialmente a lo largo de la cadena de suministro requiere de un alto grado de coordinación entre los diferentes agentes involucrados en dicha cadena para que estos productos se conserven en un alto grado de calidad y para que se cumplan las condiciones de seguridad alimentaria en una determinada población. Por otro lado, dados el complejo sistema de movilidad urbano de las ciudades capitales del mundo, ha hecho que la planeación de la operación logística de transporte y distribución de productos -y más de tipo alimentario-, sea cada vez más relevante para las empresas encargadas de esta labor. Por ello, en este trabajo se aborda el planteamiento de un modelo de asignación de cargas –o sea las cantidades de unidades a enviar- desde dos (2) fuentes representadas por los centros de distribución ubicados a las afueras la ciudad de Bogotá Colombia que pueden o no utilizar dos (2) centros de transbordo para suplir a cincuenta y dos (52) clientes ubicados en dicha ciudad, en la distribución de tres (3) tipos de productos derivados de los lácteos. Posteriormente a esto, se estableció para cada asignación el ruteo específico a través de un modelo de optimización clásico.

El hecho que se manejen productos perecederos a lo largo de la cadena de abastecimiento, ha promovido el desarrollado de investigaciones enfocadas en determinar la uniformidad en los tipos de producto como requerimiento en los pedidos de los clientes y la trazabilidad de deterioro del producto a lo largo del tiempo [1], de igual manera su vida útil de acuerdo a los requisitos de los clientes como aspecto de pérdida si se disminuye a lo largo de la cadena de abastecimiento [2]. Todo esto cobra más importancia si se tiene en cuenta que sólo el 10% de los alimentos perecederos se refrigeran y en la actualidad hasta un 30% de los alimentos producidos se pierde a lo largo de la cadena de suministro antes de llegar a los consumidores, lo que implica grandes problemas económicos, ambientales y éticos [3].

Frente a la adecuada planificación de la cadena de suministro, se debe tener en cuenta que las actividades que la integran inciden en la calidad de los productos lácteos y en general de los alimentos, por ello el principal objetivo de esta es garantizar la frescura de los mismos al menor precio posible. Así, la adecuada elección de la red de distribución es un factor clave para la administración del sistema logístico y así garantizar que los productos tengan altos estándares de calidad y que se minimicen los tiempos de envío [4]. La incorrecta planificación entre los entes que interactúan en la cadena de abastecimiento genera sobrecostos y gastos adicionales, por lo cual se plantean modelos de programación entera cuyo objetivo es minimizar los costos de transporte y manipulación de los productos [5].

Actualmente, un cliente tiene a su disposición distintas marcas que prometen un mismo tipo de producto, por lo cual es importante para cada empresa la fidelización, para esto es necesario que los productos se encuentren a la mano, sean suficientes para satisfacer la demanda y cuenten con un precio al alcance de los consumidores, es decir se requiere una correcta administración y planeación de la cadena de suministro a diferentes niveles (operacional,

¹ ojherrera@unisalle.edu.co

² anaranjo70@unisalle.edu.co

³ jlopez75@unisalle.edu.co

táctico o estratégico). Por esta razón se desarrolla un modelo que busca programar la asignación de la mercancía de modo que se supla la demanda, se minimicen costos y se utilicen de manera óptima los recursos disponibles como son los vehículos.

2. MÉTODO

A continuación, se establece en la Figura 1 el procedimiento realizado para el desarrollo del presente trabajo teniendo en cuenta desde la definición del problema en el sistema empresarial hasta la obtención de los resultados finales.

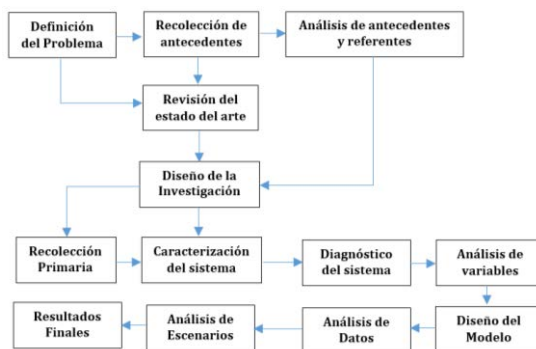


Figura 23. Procedimiento para el desarrollo del proyecto

2.1 Revisión de la literatura

Aunque en la literatura se hallan varios modelos de asignación de cargas, entre estos se encuentran muchas diferencias debido a los distintos objetivos y campos de aplicación que se manejan en ellos; hay unos en los que el objetivo es maximizar ganancias [6], aunque en la mayoría el objetivo sea minimizar costos y su estructura es diferente debido al enfoque de cada modelo, en unos se contemplan distintos métodos de resolución [7], en otros la evaluación de emisión de CO₂ durante el transporte [8], etc. En general se encuentran desde modelos con un grado de dificultad bajo con un objetivo [9], hasta modelos donde se tiene una complejidad alta con múltiples objetivos [10].

Por otro lado, se ubican modelos que tratan de resolver problemas de asignación de recursos [9], y de asignación de cargas por fases en contextos parecidos al tratado en este trabajo con el uso de costos unitarios y de costos fijos [11]. También hay modelos que tratan de resolver problemas de transbordo minimizando costos [12], sin embargo, son menos los modelos en los que podemos encontrar asignación y transbordo, en algunos de ellos se manejan variables que no son contempladas en el presente trabajo como el uso de inventario mínimo requerido en cada canal [8] pero que a su vez no contemplan la posibilidad de suplir al cliente por medio de la fábrica directamente. En la literatura se encuentra casos similares pero que usan para su modelamiento demandas estocásticas [6] o difusas [13], sin embargo, este modelo asume demandas determinísticas debido a que la compañía trabaja con horizontes de planeación de la producción mensual y la distribución la realiza semanalmente, por lo que se conoce con anterioridad el valor requerido por los clientes. En la Tabla 1, se hace un recuento de algunos casos de aplicación relacionados a la planeación operativa de la cadena de suministro a través de métodos matemáticos.

Tabla 31. Resumen de publicaciones como antecedentes

Título	Criterio	Modelo Utilizado	Fuente	Herramienta/ Medio
A possibilistic linear programming model for supply chain network design under uncertainty.	Minimizar Costos	Programación lineal. Número difuso. PLP (Possibilistic Linear Programming)	IMA Journal of Management Mathematics [13]	Ilog opl 6.3 and Cplex 12.1.0
A multiparametric mixed-integer bi-level optimization strategy for supply chain planning under demand uncertainty	Minimizar Costos	Milp Algoritmo de programación de dos niveles de enteros mixtos Caso 1. Demanda Constante Caso 2. Demanda Incierta	IFAC-PapersOnLine [14]	Pop Toolbox
A two-stage stochastic programming approach for value-based closed-loop supply chain network design.	Maximizar EVA	Programación estocástica Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP).	Transportation Research [6]	CPLEX MIP.
A variational inequality formulation for designing a multi-echelon, multi-product supply chain network in a competitive environment.	Maximizar los ingresos futuros de la cadena de suministro propia y de los competidores	Lagrange multipliers	Annals of Operations Research [15]	MATLAB R2011

A fuzzy bi-objective mixed-integer programming method for solving supply chain network design problems under ambiguous and vague conditions.	Minimiza el costo total de compra Y Maximiza el valor total de la compra	Modelo Difuso Bi-objetivo de programación de enteros Mixtos (MILP)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology [7]	Gams 22.9.2
Rice distribution planning for “the poor people” in bandung, west java, indonesia.	Minimizar costos	Programación Lineal	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [9]	Win QSB
Joint optimization of distribution network design and two-echelon inventory control with stochastic demand and CO ₂ emission tax charges.	Minimizar Costos	Programación no lineal de enteros mixtos.	PloS one [8]	Lingo 11
A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain.	Minimizar Costo Total y Maximizar la probabilidad de compra	Programación Lineal Entera Mixta Multiobjetivo. (MILP)	Computers & Industrial Engineering [10]	Codificado en MATLAB 2015. Método de restricción resuelto por CPLEX en GAMS.
Operational supply chain planning method for integrating spare parts supply chains and intelligent maintenance systems.	Minimizar Costo	Programación Lineal Entera Mixta. (MILP)	IFAC- Papersonline [16]	Simio 6.0.

2.2 Logística y cadenas de abastecimiento

Según [17] el término logística proviene del campo militar; está relacionado con la adquisición y suministro de los equipos y materiales que se requieren para cumplir una misión. La logística agrupa las actividades que ordenan los flujos de materiales, coordinando recurso y demanda para asegurar un nivel determinado de servicio al menor costo posible [18]. Se puede establecer que la logística es el proceso mediante el cual se puede realizar las siguientes actividades:

- Fijar niveles de servicio al cliente
- Selección del modo y servicio de transporte
- Definir rutas del transportador
- Programación de vehículos
- Manejo de inventarios
- Configuración de almacén
- Momento y cantidades correctas a comprar
- Manejo de materiales

La logística también es una actividad empresarial que tiene como finalidad planificar y gestionar todas las operaciones relacionadas con el flujo óptimo de materias primas, productos semielaborados y productos terminados, desde las fuentes de aprovisionamiento hasta el consumidor final [19] incluyendo también el flujo de información en ambos sentidos; hacia y desde los clientes a los proveedores y el proceso de mover bienes desde su destino final con el propósito de capturar valor, o una disposición final apropiada de los mismos [20]. Este concepto incluye un conjunto de enfoques utilizados para integrar eficientemente proveedores, fabricantes, depósitos y negocios minorista, para que la mercancía se produzca y contribuyan en las cantidades correctas, los lugares adecuados y en los tiempos justos, con el objeto de minimizar los costos del sistema satisfaciendo los requerimientos del nivel de servicio [21].

La red logística se compone de un conjunto de proveedores, plantas de fabricación y almacenes organizados para gestionar la adquisición de materias primas, su transformación y la distribución de productos terminados a los clientes. Por lo general, la planificación de una red logística implica tomar decisiones entre otras respecto a la asignación de familias de productos a plantas de fabricación y almacenes, la selección de canales de distribución y modos de transporte [22]. Las cadenas de suministro son sistemas con decisión multinivel correspondiendo a diferentes actividades abarcando desde las materias primas hasta la distribución del producto final a los consumidores [14].

Por otro lado, se define que la administración de la Cadena de Suministros SCM junto a la logística es un conjunto de actividades funcionales que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo en el cual las materias primas agregan valor en las diferentes instancias del proceso mientras se convierten en productos terminados [23]. Para poder llevar acabo esto es necesario definir: canal físico de suministros el cual se refiere a la brecha de tiempo y espacio entre las fuentes inmediatas de material de una empresa y sus puntos de procesamiento. De manera similar, canal físico de distribución se refiere a la brecha de tiempo y espacio entre los puntos de procesamiento de una empresa y sus clientes. También la cadena de suministro hace referencia al análisis y el esfuerzo por mejorar procesos de la

compañía para el diseño del producto y el servicio, comprar, facturar, administrar el inventario, la distribución, la satisfacción del cliente y otros elementos de la cadena. SCM se refiere generalmente a un esfuerzo por volver a diseñar los procesos de la cadena de suministro para lograr un flujo constante [24].

El objetivo de una cadena de suministro debe ser maximizar el valor total generado. El valor que una cadena de suministro genera es la diferencia entre lo que vale el producto final para el cliente y los costos en que la cadena incurre para cumplir la petición de éste. Para la mayoría de las cadenas de suministro, el valor estará estrechamente correlacionado con la rentabilidad de la cadena de suministro (también conocida como superávit de la cadena de suministro), que es la diferencia entre los ingresos generados por el cliente y el costo total de la cadena de suministro [25]. De otra forma, el logro de un servicio excelente para el cliente es producto de una combinación de una estrategia cuidadosamente pensada para el servicio, el diseño apropiado de la cadena de suministro y la gestión de la logística de prestación de servicios de manera constante [13].

2.3 Modelos de optimización

En su concepción más general, la optimización es el área de conocimiento relativa al desarrollo y estudio de métodos y técnicas para la solución de problemas matemáticos que tengan una función objetivo sujeta a otras funciones restricción [26], además se centra en seleccionar de un conjunto de alternativas posibles a la mejor de ellas basado en algún criterio de decisión [27]. La optimización es la base en diversas disciplinas del conocimiento, como son: investigación de operaciones, administración, finanzas, sistemas, etc., utilizada en el diseño, análisis y toma de decisiones en diversos sistemas [28]. También es denominada programación matemática y hace parte del área de Investigación de Operaciones, donde se debe optimizar una función con restricción de recursos limitados [29].

Por otro lado, los métodos de optimización se clasifican en exactos y heurísticos. Los primeros son aquellos métodos que garantizan encontrar la solución óptima de la instancia a resolver [28], mientras que los segundos son técnicas que generan soluciones factibles mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda en periodos de tiempo moderados para su ejecución [30]. Cabe señalar, que se prefiere utilizar un método exacto a uno heurístico para resolver un problema, siempre y cuando, este exista, y su orden esté acotado polinomialmente. Es así que unas de las técnicas más usadas dentro de los métodos exactos es la *Programación Lineal (PL)* y *Programación Entera (PE)*. La primera es una técnica de la programación matemática u optimización, la cual se utiliza para resolver un modelo matemático compuesto por una función objetivo lineal y un conjunto de restricciones también lineales; adicionalmente, en este modelo todas las variables de decisión asumen un valor no negativo en el dominio de los reales donde se busca encontrar la mejor mezcla de actividades: cuales fomentar y a que niveles [31].

Por otro lado, la Programación Entera se diferencia de la PL; ya que no satisface la propiedad de divisibilidad, o sea donde las variables de decisión asumen valores enteros [32]. De otra forma, se tiene dentro de esta técnica el uso de variables adicionales de tipo binario para el uso de activación o desactivación de condiciones al modelo frente a un requerimiento específico del sistema, dándole así la connotación a la técnica de Programación Entera Mixta (PEM) [33], [34]. El uso de estas técnicas dentro de la investigación de operaciones es más recomendable en niveles operativos de las organizaciones, no tanto en niveles estratégicos [35], para lo cual están ligadas generalmente a los siguientes pasos para su desarrollo y aplicación [34]:

1. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes
2. Formulación de un modelo matemático que represente el problema
3. Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución para el problema a partir del modelo
4. Prueba del modelo y aplicación de acuerdo con las necesidades (experimentación)
5. Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración
6. Implementación

2.4 Caracterización del sistema

A continuación, se dan las condiciones bajo las cuales se pretende planear la distribución y posterior ruteo de productos para una empresa que fabrica diversos productos lácteos y que los distribuye en la ciudad de Bogotá Colombia. Dichos productos fueron agregados en tres familias de la siguiente manera: Yogurt, Leche y Queso. Esta empresa cuenta con 52 grandes clientes distribuidos por toda la ciudad de Bogotá siendo estos, Centros comerciales y Tiendas “especializadas”. Debido a que la empresa cuenta con dos Centros de distribución (CD) que no están dentro de la ciudad, de los cuales puede o no utilizar dos Centros de transbordo (CT) para finalmente suministrar a los Clientes mencionados. La ubicación de las locaciones para los CD, CT y Clientes se ve en la Figura 2. El esquema estructural del problema para la planeación de la distribución de las tres familias de productos para el desarrollo del modelo es como se muestra en la Figura 3. En cuanto al análisis de las variables más incidentes para la asignación de cargas como de los vehículos y rutas de distribución a los diferentes clientes se muestra en la Tabla 2, al igual que la forma de obtención de la información más relevante analizada.

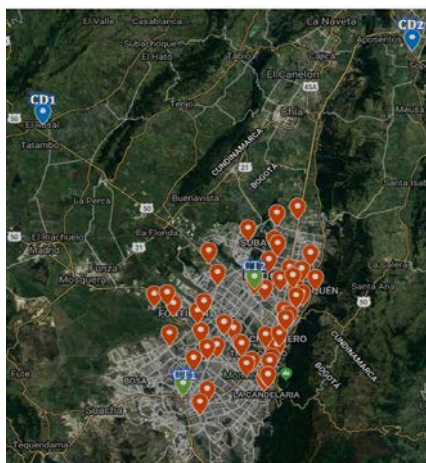


Figura 2. Mapa y localizaciones de Fuentes y destinos del Sistema

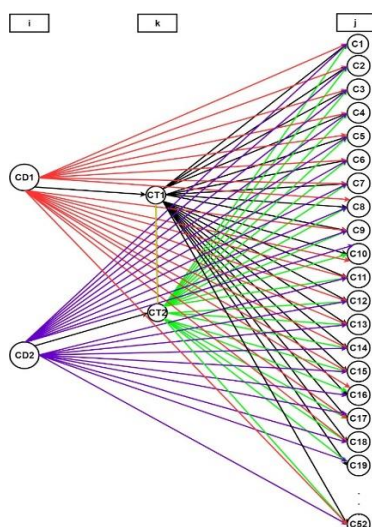


Figura 3. Estructura del sistema para su modelamiento

Tabla 2. Fuente, Forma de Obtención y Herramienta utilizada para su tratamiento

Tipo de dato	Fuente	Medio o Herramienta
Distancias entre centros de distribución y clientes Distancias entre centros de distribución y centros de transbordo Distancias entre centros de transbordo y clientes	Información secundaria Aplicación Web	Google Maps, sistemas de geo posicionamiento satelital (G.P.S.)
Demanda Oferta	Información primaria Empresas del sector	Página Web y Agremiaciones
Costos variables y fijos	Información primaria y secundaria Empresas del sector	Boletines de precios mensuales. Entrevista directa
Asignación de cargas de centros de distribución a centros de transbordo y clientes	Modelo de Optimización (Programación Entera Mixta) Aplicación Computacional	Software GAMS y Programación en EXCEL®
Rutas de Vehículos para la distribución de productos.	Modelo de Optimización (Programación Binaria Pura) Aplicación Computacional	Software GAMS

2.4.1 Supuestos y limitaciones para el modelo

Para el desarrollo de este estudio se consideraron los siguientes aspectos:

- El costo fijo de transporte entre los diferentes orígenes y destinos depende de las distancias respectivas.
- La distribución puede hacerse enviando el producto desde los CD a los Clientes directamente o pasando por un CT intermedio.
- Los diferentes CT pueden enviar y recibir producto entre ellos.
- Los diferentes CT pueden tener demanda u oferta.
- El periodo de tiempo en que se encuentran las demandas, ofertas y capacidades está en unidades por semana.
- Se tiene en cuenta un único periodo de planeación, es decir que debería hacerse una nueva planeación usando este modelo cada vez que las demandas cambien considerablemente.

- El modelo (en el último escenario) tiene en cuenta dos tipos de vehículos, de 5200 kg y 8500 kg de capacidad respectivamente, dejando abierta la cantidad de vehículos disponibles de cada tipo.
- Se consideran únicamente costos y distancias de origen a destino.
- Para el análisis del modelo de asignación se plantearon tres escenarios:
 - En el primer escenario se tuvo en cuenta solamente los costos variables o unitarios de los productos.
 - En el segundo escenario aparte de los costos variables, se adicionaron costos fijos en los diferentes recorridos, que hace referencia al consumo de combustible, gastos generales por la movilidad del vehículo, el salario del conductor y del auxiliar de cargue y descargue.
 - En el último escenario aparte de contemplar costos variables y fijos para el transporte, se contempló el uso de vehículos diferenciados, como se mencionó anteriormente.
- Para el modelo de ruteo se utilizan distancias asimétricas, es decir, la distancia de ir del punto i al j , es diferente a la distancia de ir del punto j al i ($d_{ij} \neq d_{ji}$) [36]
- No se incluyó la variable de restricciones particulares como horarios o condiciones en el manejo de los productos (ventanas de tiempo) por parte de los clientes.

2.5 Planteamiento matemático

El siguiente modelo es construido a partir de las condiciones de operación del sistema de abastecimiento en cuestión. Para la evaluación de dicho modelo, se trabajaron tres escenarios o comportamientos diferenciados del sistema que podrán ser aplicados dependiendo de los objetivos de la empresa teniendo en común que los tres casos buscan minimizar los costos de distribución, además de establecer el modo en que se debe distribuir los productos a cada cliente, en qué cantidades y el tipo de vehículo; esto último específicamente en el tercer escenario.

El primer escenario busca evaluar la asignación de las cantidades a distribuir desde los Centros de Distribución CD a los clientes con el uso posible o no de los Centros de Transbordo CT, pero sin tener en cuenta los costos fijos de transporte en la función objetivo, mientras que en el escenario 2 estos costos si se incluyen en dicha función; por otro lado, en el escenario tres se tuvo en cuenta el uso diferenciado de vehículos. Por último, se estableció el uso de otro modelo de optimización basado en programación binaria pura con el fin de definir el ruteo específico a seguir para completar la entrega a los clientes basado en la respuesta del modelo con mejor rendimiento de los tres evaluados anteriormente. A continuación, se establece la estructura matemática para cada uno de estos modelos:

2.5.1 Modelo sin costos fijos

Subíndices

i = Centros de Distribucion $\therefore i = 1, \dots, m$

j = Clientes $\therefore j = 1, 2, 3, 4 \dots n$

k = Centros de Transbordo $\therefore k = 1, \dots, o$

l = Tipo o familia de producto $\therefore l = 1, 2, \dots, p$

Parámetros

C_{ij} : Costo unitario de transporte del producto l del CD i a Cliente j

CF_{ij} : Costo Fijo de transporte del CD i a Cliente j

C_{lk} : Costo unitario de transporte del producto l del CD i al CT k

CF_{lk} : Costo Fijo de transporte del CD i a CT k

Cl_{kj} : Costo unitario de transporte del producto l del CT k al Cliente j

CF_{kj} : Costo Fijo de transporte del CT k a Cliente j

Cl_{kk} : Costo unitario de transporte del producto l del CT k a CT k

b_{lj} : Requerimiento de demanda producto l por parte del Cliente j

a_{lk} : Capacidad disponible para abastecimiento de producto l del CT k

b_{lk} : Requerimiento de demanda producto l por parte del CT k

a_{li} : Capacidad disponible para abastecimiento de producto l del CD i

$CF_{\max(i-j)}$: Costo Fijo máximo permitido en el transporte de CD i al Cliente j

$CF_{\max(k-j)}$: Costo Fijo máximo permitido en el transporte de CT k al Cliente j

$CF_{\max(i-k)}$: Costo Fijo máximo permitido en el transporte de CD i al CT k

P_l : Peso unitario del tipo de producto l

Cap_v : Capacidad del vehículo

Max_v : Cantidad máxima de viajes que se pueden hacer en el periodo de referencia, sea por tiempo o por razones internas de la empresa y depende de la trayectoria escogida

Variables

- S_{lij} : Cantidad de unidades de producto l a transportar desde CD i al Cliente j
 T_{lik} : Cantidad de unidades de producto l a transportar desde CD i a CT k
 U_{lkj} : Cantidad de unidades de producto l a transportar desde CT k a Cliente j
 $Z_{lk'k}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar desde CT k a otro CT k
 S_{ij} : Variable binaria que activa o no la utilización CD i al Cliente j
 Y_{ik} : Variable binaria que activa o desactiva la utilización de CD i a CT k
 V_{ij} : Variable binaria que activa o desactiva la utilización del CD i a Cliente j
 W_{kj} : Variable binaria que activa o desactiva la utilización del CT k a Cliente j

La minimización de Costos variables se representa en la ecuación (1) o Función objetivo.

$$\text{Min } CT = \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{lij} * S_{lij} + \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o C_{lik} * T_{lik} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n C_{lkj} * U_{lkj} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{k'=1}^o C_{lk'k} * Z_{lk'k} \quad (1)$$

Esta minimización está sujeta a las siguientes restricciones:

- Restricción de oferta para el CD i . La ecuación (2) asegura que la suma de todos los productos que salen de los CD será como máximo la cantidad que estos pueden producir u ofertar.

$$\sum_{j=1}^n S_{lij} + \sum_{k=1}^o T_{lik} \leq a_{li} \quad \forall i, l \quad (2)$$

- Restricción de balance de flujo. Garantiza que todo lo que llega o se produce (si tiene oferta) en cada CT sea equivalente a lo que es distribuido a los Clientes o a otros CT (si tienen demanda) según sea el caso a través de la ecuación (3).

$$\sum_{j=1}^n U_{lkj} + \sum_{k'=1}^o Z_{lk'k} - \sum_{i=1}^m T_{lik} + \sum_{k'=1}^o Z_{k'k} = a_{lk} - b_{lk} \quad \forall l, k \quad (3)$$

- Restricción de Demanda por cliente. Se requiere que la demanda sea suplida en su totalidad sin excepción, para esto se utiliza la ecuación (4).

$$\sum_{i=1}^m S_{lij} + \sum_{k=1}^o U_{lkj} = b_{lj} * V_{ij} \quad \forall l, i, j \quad (4)$$

- Restricción de conectividad CD a CT. Una de las características propias de este modelo es que cada cliente solamente sea servido por un origen para cada tipo de producto, es decir que un origen debe abastecer a un destino con el total que requiera de un mismo tipo de producto, pero cada tipo de producto puede provenir de distinto origen, esto es lo que se espera con la ecuación (5).

$$\sum_{i=1}^m V_{ij} + \sum_{k=1}^o W_{kj} = 1 \quad \forall j \quad (5)$$

- Restricción de activación del Costo Fijo. El transporte desde cada posible origen a cada destino activará un costo fijo asociado por el uso del camión, peajes, pago al distribuidor, etc. Este costo entonces dependerá de la ruta elegida, en la ecuación (6) se activa el costo fijo asociado al transporte desde cada CD a cada Cliente, la ecuación (7) activa el costo fijo asociado al transporte desde cada CD a cada CT y de la misma manera en la ecuación (8) se activa el costo fijo asociado al transporte desde cada CT a cada cliente.

$$\sum_{l=1}^p S_{lij} \leq M * V_{ij} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^p T_{lik} \leq M * Y_{ik} \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^{+p} U_{lkj} \leq M * W_{kj} \quad \forall k, j \quad (8)$$

- Restricción costo fijo máximo permitido. Se establece un máximo de recursos para gastar en la distribución de productos dependiendo de la trayectoria elegida, de esta manera en la ecuación (9) se establece un máximo costo para el transporte desde los CD a los Clientes, en la ecuación (10) el máximo costo fijo permitido para el transporte desde los CT a los clientes y en la ecuación (11) se establece el costo fijo máximo permitido para el transporte desde los CD a los CT.

$$\sum_{j=1}^n CF_{ij} * V_{ij} \leq CF_{max}(i-j)_j \quad \forall i \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n CF_{kj} * W_{kj} \leq CF_{max}(k-j)_k \quad \forall k \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n CF_{ik} * Y_{ik} \leq CF_{max}(i-k)_i \quad \forall i \quad (11)$$

- Restricción de viajes máximos del vehículo. Se establece un máximo de viajes disponibles para el transporte según sea la ruta elegida, ya sea desde los CD a los Clientes directamente a través de la ecuación (12), desde los CD a los CT representado en la ecuación (13) o desde los CT a los Clientes en la ecuación (14). Para el caso de aplicación se incluyeron estas restricciones no con el fin de restringir el sistema, sino que se usó una cantidad máxima de viajes relativamente grande con el objetivo de conocer la cantidad necesaria de recorridos para abastecer la demanda con el menor costo en el periodo de referencia.

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{lij} * \frac{P_l}{capv}) \leq Maxv(i - j) \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o T_{lik} * \frac{P_l}{capv}) \leq Maxv(i - k) \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n U_{lkj} * \frac{P_l}{capv}) \leq Maxv(k - j) \quad (14)$$

- Restricción No negatividad. Las cantidades a transportar desde un destino a un origen nunca pueden ser menores a cero, esto se corrobora a través de la ecuación (15).

$$S_{lij}, T_{lik}, U_{lkj}, Z_{lkk'} \geq 0 \quad (15)$$

Por ultimo las variables de activación de costos fijos deberán ser binarias cumpliendo la condición

$$Y_{ik}, V_{ij}, W_{kj} = \text{Binaria}$$

2.5.2 Modelo con costos fijos

En este escenario, se mantienen los parámetros, variables y restricciones del anterior escenario, pero la función objetivo incluye el cálculo de costos fijos para que ahora sea tenida en cuenta directamente en el resultado de costos totales de distribución tal como se representa en la ecuación (16).

$$\text{Min CT} = \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{lij} * S_{lij} + \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o C_{lik} * T_{lik} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n C_{lkj} * U_{lkj} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{k'=1}^o C_{lkk'} * Z_{lkk'} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n CF_{ij} * V_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o CF_{ik} * Y_{ik} + \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n CF_{kj} * W_{kj} \quad (16)$$

Esto se hizo con el propósito de evaluar la inclusión de todos los costos intervinientes en el modelo, a diferencia del escenario 1, el cual a pesar de incluirlos en las restricciones no los contemplo en la función objetivo, porque se buscaba ver la incidencia solamente de las cargas a asignar asociadas a los costos variables únicamente.

2.5.3 Modelo diferenciando vehículos

Para el tercer escenario se hace una modificación en los parámetros de costo y variables utilizadas, pero en esencia se mantienen las mismas restricciones.

Parámetros

Cv1_{lij}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CD *i* a Cliente *j* en el vehículo tipo 1

Cv2_{lij}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CD *i* a Cliente *j* en el vehículo tipo 2

CFv1_{ij}: Costo Fijo de transporte del CD *i* a Cliente *j* en el vehículo tipo 1

CFv2_{ij}: Costo Fijo de transporte del CD *i* a Cliente *j* en el vehículo tipo 2

Cv1_{lik}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CD *i* al CT *k* en el vehículo tipo 1

Cv2_{lik}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CD *i* al CT *k* en el vehículo tipo 2

CFv1_{ik}: Costo Fijo de transporte del CD *i* a CT *k* en el vehículo tipo 1

CFv2_{ik}: Costo Fijo de transporte del CD *i* a CT *k* en el vehículo tipo 2

Cv1_{lkj}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CT *k* al Cliente *j* en el vehículo tipo 1

Cv2_{lkj}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CT *k* al Cliente *j* en el vehículo tipo 2

CFv1_{kj}: Costo Fijo de transporte del CT *k* a Cliente *j* en el vehículo tipo 1

CFv2_{kj}: Costo Fijo de transporte del CT *k* a Cliente *j* en el vehículo tipo 2

Cv1_{lkk'}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CT *k* a CT *k'* en el vehículo tipo 1

Cv2_{lkk'}: Costo unitario de transporte del producto *l* del CT *k* a CT *k'* en el vehículo tipo 2

P_l: Peso unitario del tipo de producto *l*

Capv1: Capacidad del vehículo tipo 1

Capv2: Capacidad del vehículo tipo 2

Maxv1: Cantidad máxima de viajes que se pueden hacer en el periodo de referencia para el vehículo tipo 1

Maxv2: Cantidad máxima de viajes que se pueden hacer en el periodo de referencia para el vehículo tipo 2

Variables

- $Sv1_{ij}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 1 desde CD i al Cliente j
 $Sv2_{ij}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 2 desde CD i al Cliente j
 $Tv1_{ik}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 1 desde CD i a CT k
 $Tv2_{ik}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 2 desde CD i a CT k
 $Uv1_{kj}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 1 desde CT k a Cliente j
 $Uv2_{kj}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 2 desde CT k a Cliente j
 $Zv1_{kk'}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 1 desde CT k a otro CT k'
 $Zv2_{kk'}$: Cantidad de unidades de producto l a transportar en el vehículo tipo 2 desde CT k a otro CT k'
 $Sv1_{ij}$: Variable binaria que activa o no la utilización del vehículo tipo 1 desde CD i al Cliente j
 $Sv2_{ij}$: Variable binaria que activa o no la utilización del vehículo tipo 2 desde CD i al Cliente j
 $Yv1_{ik}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 1 desde CD i al CT k
 $Yv2_{ik}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 2 desde CD i al CT k
 $Vv1_{ij}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 1 desde CD i al Cliente j
 $Vv2_{ij}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 2 desde CD i al Cliente j
 $Wv1_{kj}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 1 desde CT k a Cliente j
 $Wv2_{kj}$: Variable binaria que activa o desactiva la utilización del vehículo tipo 2 desde CT k a Cliente j

La minimización de costos totales se representa en la ecuación (17) o Función objetivo.

$$\begin{aligned} \text{Min } CT = & \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Cv1_{lij} * Sv1_{lij} + \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o Cv1_{lik} * Tv1_{lik} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n Cv1_{lkj} * Uv1_{lkj} + \\ & \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^n CFv1_{ij} * Vv1_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o CFv1_{ik} * Yv1_{ik} + \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n CFv1_{kj} * Wv1_{kj} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{k'=1}^n Cv1_{lkk'} * \\ & Zv1_{lkk'} + \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Cv2_{lij} * Sv2_{lij} + \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o Cv2_{lik} * Tv2_{lik} + \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n Cv2_{lkj} * Uv2_{lkj} + \\ & \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n Cv2_{lkk'} * Zv2_{lkj} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o CFv1_{kk'} * Zv1_{kk'} + \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^n CFv2_{ij} * Vv2_{ij} + \sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n CFv2_{kj} * \\ & Wv2_{kj} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o CFv2_{ik} * Yv2_{ik} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o CFv2_{kk'} * Zv2_{kk'} \end{aligned} \quad (17)$$

Dadas las restricciones modificadas y diferenciando el tipo de vehículo a usar, se tienen las siguientes restricciones:

- Restricción de oferta. Ecuación (18).

$$\sum_{j=1}^n Sv1_{lij} + \sum_{k=1}^o Tv1_{lik} + \sum_{j=1}^n Sv2_{lij} + \sum_{k=1}^o Tv2_{lik} \leq a_{li} \quad \forall i, l \quad (18)$$

- Restricción de balance de flujo. Ecuación (19).

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n Uv1_{lkj} + \sum_{k'=1}^o Zv1_{lkk'} - \sum_{i=1}^m Tv1_{lik} - \sum_{k'=1}^o Zv1_{k'l} + \sum_{j=1}^n Uv2_{lkj} + \sum_{k'=1}^o Zv2_{lkk'} - \sum_{i=1}^m Tv2_{lik} - \\ \sum_{k'=1}^o Zv2_{k'l} = a_{lk} - b_{lk} \quad \forall l, k \end{aligned} \quad (19)$$

- Restricción de Demanda. Ecuación (20).

$$Sv1_{lij} + Uv1_{lkj} + Sv2_{lij} + Uv2_{lkj} = b_{lj} \quad \forall l, i, j \quad (20)$$

- Restricción de conectividad. Ecuación (21).

$$\sum_{i=1}^m Vv1_{ij} + \sum_{k=1}^o Wv1_{kj} + \sum_{i=1}^m Vv2_{ij} + \sum_{k=1}^o Wv2_{kj} = 1 \quad \forall j \quad (21)$$

- Restricción costo máximo permitido. Ecuación (22), (23) y (24).

$$\sum_{j=1}^n CFv1_{ij} * Vv1_{ij} + \sum_{j=1}^n CFv2_{ij} * Vv2_{ij} \leq CFv2_{max}(i-j)_j \quad \forall i \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^n CFv1_{kj} * Wv1_{kj} + \sum_{j=1}^n CFv2_{kj} * Wv2_{kj} \leq CFv2_{max}(k-j)_k \quad \forall k \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n CFv1_{ij} * Vv1_{ij} + \sum_{j=1}^n CFv2_{ij} * Vv2_{ij} \leq CFv2_{max}(i-k)_i \quad \forall i \quad (24)$$

- Restricción de activación del Costo Fijo para cada posible trayectoria y tipo de vehículo. ecuaciones (25) a (30).

$$\sum_{i=1}^p Sv1_{lij} \leq M * Vv1_{ij} \quad \forall i, j \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^p Sv2_{lij} \leq M * Vv2_{ij} \quad \forall i, j \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^p Tv1_{lik} \leq M * Yv1_{ik} \quad \forall i, k \quad (27)$$

$$\sum_{l=1}^p Tv2_{lik} \leq M * Yv2_{ik} \quad \forall i, k \quad (28)$$

$$\sum_{l=1}^p Uv1_{lkj} \leq M * Wv1_{kj} \quad \forall k, j \quad (29)$$

$$\sum_{l=1}^p Uv2_{lkj} \leq M * Wv2_{kj} \quad \forall k, j \quad (30)$$

- Restricción de viajes máximos del vehículo 1. Ecuaciones (31) a (33).

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Sv1_{lij}) * \frac{Pl}{cv1} < Maxv1 \quad (31)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^o Tv1_{lik}) * \frac{Pl}{cv1} < Maxv1 \quad (32)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n Uv1_{lkj}) * \frac{Pl}{cv1} < Maxv1 \quad (33)$$

- Restricción de viajes máximos del vehículo 2. Ecuaciones (34) a (36).

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Sv2_{lij}) * \frac{Pl}{cv2} < Maxv2 \quad (34)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^0 Tv2_{lik}) * \frac{Pl}{cv2} < Maxv2 \quad (35)$$

$$\sum_{l=1}^p (\sum_{k=1}^o \sum_{j=1}^n Uv2_{lkj}) * \frac{Pl}{cv2} < Maxv2 \quad (36)$$

- Restricción No negatividad. Ecuación (37).

$$Sv1_{lij}, Tv1_{lik}, Uv1_{lkj}, Zv1_{lkk'}, Sv2_{lij}, Tv2_{lik}, Uv2_{lkj}, Zv2_{lkk'} \geq 0 \quad (37)$$

Con las variables $Yv1_{ik}, Vv1_{ij}, Wv1_{kj}, Yv2_{ik}, Vv2_{ij}, Wv2_{kj}$ de tipo Binarias.

2.5.4 Modelo de ruteo

Por otro lado, se tiene la estructura del modelo de optimización para establecer las rutas específicas a seguir que se utilizó para el escenario tres descrito anteriormente, dado que este fue el que arrojó mayor eficiencia y por lo tanto menor costo en la operación de distribución como modelo de asignación de cargas. A continuación, se plantea la estructura de dicho modelo:

Parámetro

D_{ij} = Distancia de traslado del nodo i al nodo j

Variables

$X(i, j)$ = Variable binaria que activa el arco desde i a j si es 1 o lo desactiva si es 0

$U(i)$ Etapa en que se visita

Función Objetivo. Ecuación (38).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X(i, j) * D(i, j) \quad (38)$$

Esta minimización está sujeta a las restricciones de las ecuaciones (39 a (42).

$$\sum_{j=0}^n X(i, j) = 1 \quad \forall i \quad (39)$$

$$\sum_{i=0}^n X(i, j) = 1 \quad \forall j \quad (40)$$

$$U_i - U_j + (n - 1)X_{ij} \leq n - 2 \quad \forall i, j \in V: i, j \geq 0, i \neq j \quad (41)$$

$$U_i \geq 0; X_{ij} \in \{0,1\} \quad (42)$$

En la ecuación (38) se observa la función objetivo que minimiza la distancia total recorrida; la restricción (39) indica que se va a un nodo una sola vez, la restricción (40) asegura que se salga una sola vez de cada nodo, la ecuación (41)

elimina la formación de subciclos, o sea que no se pase por el mismo nodo más de una vez y por último la ecuación (42) establece las cotas para la variable U_i y X_{ij} .

3. RESULTADOS

Los modelos anteriormente descritos se ejecutaron con el Solver CPLEX del software GAMS, obteniéndose los siguientes resultados:

3.1 Escenario 1

Como ya se mencionó, en este escenario no se tuvieron en cuenta los costos fijos como parámetro de optimización en la función objetivo, obteniéndose un costo de operación por la distribución de \$874,03 USD con un total de 93 viajes de los cuales son 87 desde los CD a los clientes directamente, 4 viajes desde los CD a los CT y en consecuencia 4 viajes desde los CT a Clientes. Por otra parte, el 97,98% de la demanda es suplida directamente desde los CD a los Clientes, solamente el restante 2,02% es abastecido desde el CT₁. A continuación, en la Figura 4, se evidencian las cantidades de unidades de cada tipo de producto que son enviadas directamente a los Clientes y su origen respectivo.

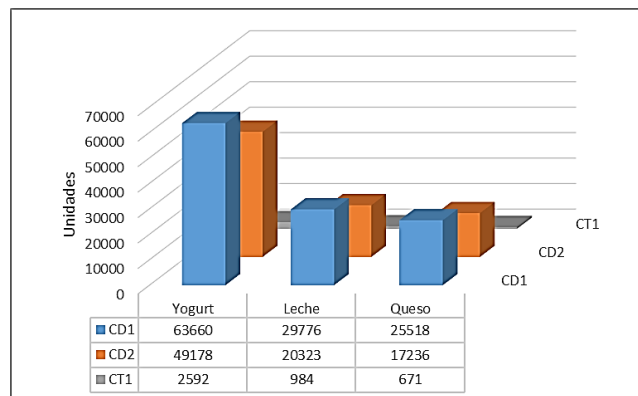


Figura 4. Cantidades enviadas a los Clientes por tipo de producto y origen

3.2 Escenario 2

Debido a que la configuración del sistema de distribución en el escenario 1 no tiene en cuenta los costos fijos de distribución, se prosiguió a correr el modelo del escenario 2 obteniéndose una nueva configuración para la distribución con un notorio aumento en el costo total de la operación que ascendió a \$1.754,04 USD debido a dichos costos fijos de transporte estimados en \$572,48 USD, en esta ocasión la distribución requeriría 11 viajes desde los CD a Clientes, 80 viajes desde los CD a los CT y por tanto 80 viajes desde los CT a Clientes. En esta ocasión tan solo el 11,58% de la demanda es suplida directamente de los CD, y el 88,42% es enviada desde los CT, es decir que al momento de tener en cuenta los costos fijos se hace evidente la necesidad de utilizar CT en la logística de distribución, en la Figura 5 se puede ver en unidades la cantidad de cada tipo de producto enviada desde cada origen a los diferentes Clientes.

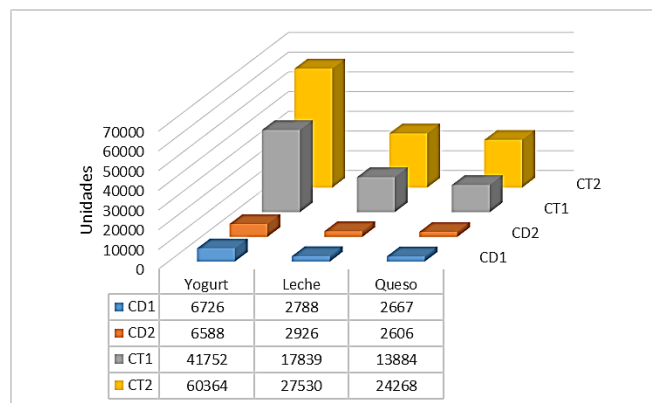


Figura 5. Cantidades enviadas a los Clientes por tipo de producto y origen

3.3 Escenario 3

En esta última instancia, además de tener en cuenta los costos fijos de transporte se diferenciaron entre dos tipos de vehículos, llamados aquí como Tipo1 y Tipo2, cuyas respectivas capacidades son 5,2 y 8,5 toneladas, con lo cual se obtuvo un costo total de operación de \$1.650,72 USD, requiriendo \$530,08 USD en costos fijos. Este y el anterior

escenario, se acercan más a la realidad en cuanto al costo que representa la logística de distribución de la empresa y se observa que la forma en que se abastecerá la demanda de los clientes será similar pero efectivamente se optimiza el sistema al incluir el vehículo tipo 2 que tiene una mayor capacidad; en este caso se requieren 52 viajes para transportar el 92,22% de los productos desde los CD a los CT y desde ahí distribuir a los Clientes utilizando el vehículo tipo 1 en 85 viajes, y la demanda restante, es decir el 7,78%, será abastecida a través de 6 viajes con el vehículo tipo 1 directamente desde los CD a Clientes. Esta diferenciación de vehículos genera una disminución en el costo total de la operación en comparación con el escenario 2, del 5,9% y una reducción en costos fijos del 7%.

En la Figura 6, nuevamente se presentan las cantidades de unidades enviadas desde cada origen a los Clientes, y es notorio que en el caso del CT1 se distribuyen las mismas cantidades a los Clientes que en el escenario anterior, esto podría indicar que si se utilizaran camiones de mayor capacidad para la distribución desde los CD a los CT podría disminuir el costo total de operación debido a la reducción de viajes necesarios.

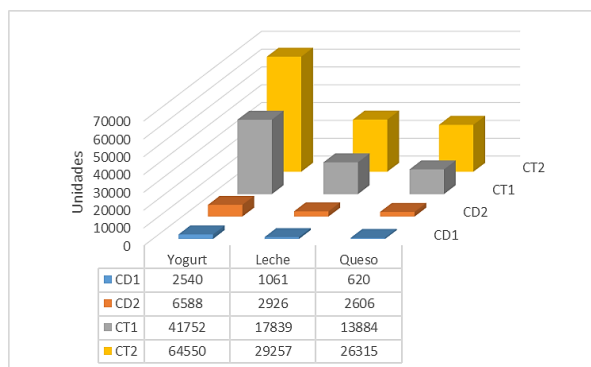


Figura 6. Cantidades enviadas a los Clientes por tipo de producto y origen

Por otro lado, en la Figura 7 se evidencian los costos correspondientes a cada escenario. A pesar de que en el primer escenario no se tienen en cuenta los costos fijos en la función objetivo, estos se pueden conocer gracias a las restricciones de costo fijo máximo (ecuaciones 9 a 11), entonces ahora se puede ver que al no tenerse en cuenta esos costos en la función objetivo a la larga la distribución se hace más costosa que en los siguientes escenarios.

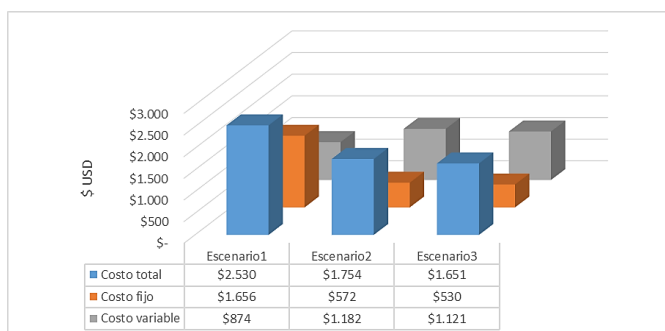


Figura 7. Comparación de Costos por Escenarios

Dados los escenarios planteados se realizó la Tabla 3 con el objetivo de comparar ciertos indicadores de desempeño.

Tabla 3. Resumen de Resultados

Indicador	Escenarios		
	Sin costos fijos	Con costos fijos	Diferenciando uso de vehículos
Costo total de la Operación	\$874,03 USD + Costos Fijos no contemplados = \$1.655,81 USD	\$1.754,04 USD	\$1.650,72 USD
Costos fijos	\$781,78 USD	\$572,48 USD	\$530,08 USD
Cantidad total de viajes	93 en total: 89 son viajes de CD a Clientes, 2 viajes de CD a CT y 2 viajes de CT a Clientes.	171 en total: 11 viajes de CD a Clientes, 80 viajes de CD a CT y 80 de CT a Clientes.	141 en total: 6 viajes usando el vehículo tipo 1 de CD a Clientes, 52 viajes usando el vehículo tipo 2 de CD a CT y 85 viajes usando el vehículo tipo 1 de CT a Clientes.
Capacidad de planta usada en CD ₁	87.59%	89.23%	89.23%
Capacidad de planta usada en CD ₂	94.44%	91.99%	91.99%

Aquí se presenta a manera de resumen algunos indicadores importantes en el sistema, en donde se resalta el hecho de que en el escenario 2 y 3 se produce un porcentaje de utilización de planta igual para ambos CD, esto es debido a que la configuración para la distribución es similar en ambos casos. Por otro lado, y frente al diseño de las rutas específicas a seguir tomando como base la asignación dada por el escenario 3, se tienen los resultados establecidos en las Figuras 8 y 9 donde se comparan cada una de las rutas que sale de las diferentes fuentes establecidas en el modelo.

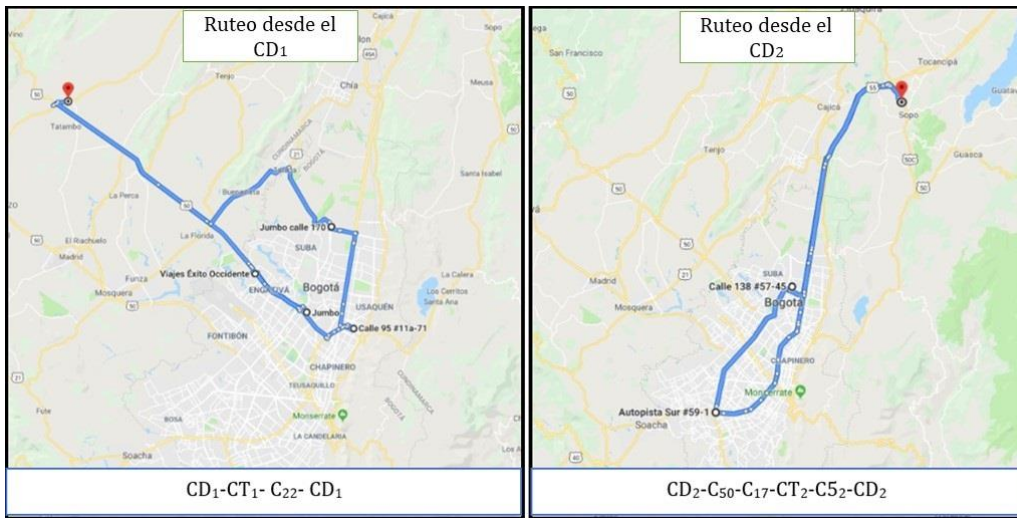


Figura 8. Rutas que salen desde los Centros de Distribución 1 y 2

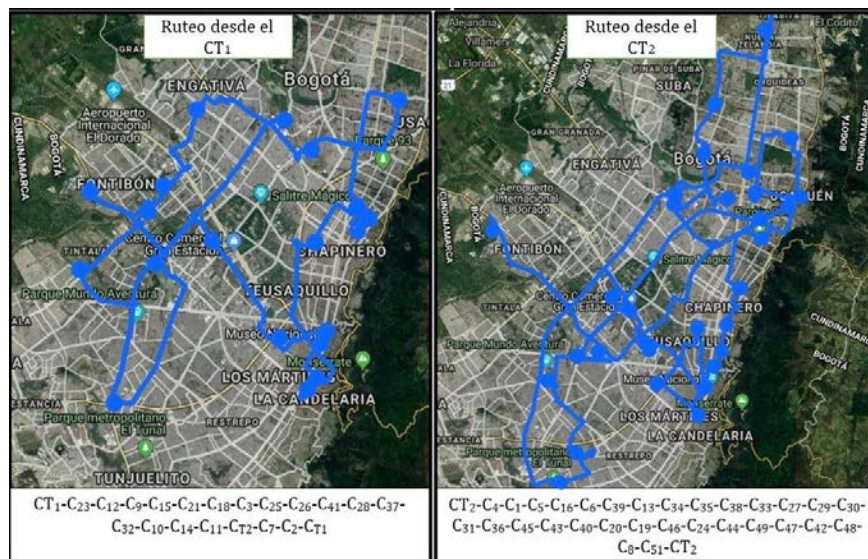


Figura 9. Rutas que salen desde los Centros de Transbordo 1 y 2

Como se aprecia, desde los centros de transbordo es de donde más asignaciones se tienen para realizar la secuencia de las rutas de entrega, teniéndose de esta manera 19 y 30 clientes respectivamente para cada uno de estos centros de entrega intermedia, teniéndose así una optimización en el orden de entrega para cada uno de clientes en cuanto a la menor distancia se refiere.

4. CONCLUSIONES

El diseño de este modelo permite la planeación eficiente para la toma de decisiones en actividades logísticas donde se tienen diversas posibilidades de asignación para la distribución y posterior ruteo en una red nodal, además de contar con la posibilidad de llevar a cabo asignaciones de centros de transbordo según las demandas de los clientes de dicho sistema, al mismo tiempo tiene en cuenta las capacidades o disponibilidades que se tengan desde cada uno de estos centros de paso en la red, obteniéndose un valor óptimo con respecto a los costos asociados a esta operación.

Es importante anotar que este modelo contempla Costos Fijos de transporte, para lo cual establece parámetros básicos como información de entrada que facilitan y agilizan el cálculo de estos costos según las distancias entre cada uno de los clientes y los centros de distribución en la red del sistema, incluyéndose por ejemplo salarios de los conductores, consumo de combustible de los vehículos, variación de los precios de estos combustibles y otros rubros inherentes al gasto de maquinaria por la movilización de los productos, lo que facilita y da mayor precisión en el cálculo de estos

costos para luego ser utilizados como información de entrada para el desarrollo matemático de dicho modelo. Por otra parte, también contempla los Costos Variables de transporte al manejar el valor unitario que implica la movilización de los productos desde cada centro de distribución a los diferentes clientes del sistema; teniéndose de esta manera, una integración de los elementos de costo que intervienen en el desarrollo de la actividad de transporte a lo largo de la cadena de suministro para una empresa dedicada a esta labor logística.

Finalmente, y de manera específica frente a los resultados arrojados, no se puede afirmar que haya un escenario mejor que otro ya que esto dependerá de la necesidad que tenga la empresa y las características inherentes a su contexto, aunque se evidencia la tendencia al uso de vehículos diferenciados para ser más eficientes a la hora de acomodar los productos de acuerdo a las demandas variables de los clientes por periodo de referencia. A pesar de la posibilidad de obtenerse la cantidad de viajes requeridos entre fuentes y destinos, la organización de un cronograma de distribución está por fuera del alcance del modelo y deberá ser una decisión complementaria al mismo. En todo caso, se puede establecer que basados en el uso del modelo propuesto, se optimizó la asignación de las cargas desde cada uno de las fuentes que la empresa cuenta así como la asignación de rutas para el reparto específico de los productos, aportando no solo beneficios a nivel de ahorro de costos para la empresa en el desarrollo de esta operación, sino también a los clientes y consumidores finales, ya que se mejora la conservación de la cadena de frío y por lo tanto de la calidad de los productos al reducirse el tiempo de entrega.

REFERENCIAS

- [1] H. Grillo, M. Alemany, A. Ortiz y V. Fuertes, «Mathematical modeling of the order-promising process for fruit supply chains considering the perishability and subtypes of products» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 49, n° -, pp. 255-278, 2017.
- [2] B. Sel, J. Bloemhof y J. v. d. Vorst, «Multi-bucket optimization for integrated planning and scheduling in the perishable dairy supply chain» *Computers & Chemical Engineering*, vol. 77, pp. 59-73, 2015.
- [3] R. Accorsi, A. Gallo y R. Manzini, «A climate driven decision-support model for the distribution of perishable products» *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, n° -, pp. 917-929, 2017.
- [4] M. Musavi y A. Bozorgi, «A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain» *Computers & Industrial Engineering*, n° 113, pp. 766-778, 2017.
- [5] D. G. Mogale, S. K. Kumar y M. K. Tiwari, «An MINLP model to support the movement and storage decisions of the Indian food grain supply chain» *Control Engineering Practice*, vol. 70, pp. 98-113, 2017.
- [6] B. Hosein, F. G. SMT y H. Taha-Hosseini, «A two-stage stochastic programming approach for value-based closed-loop supply chain network design» *Transportation Research*, p. 1, 2017.
- [7] K. Kahalili, M. Tavana y M. Amirkhan, «A fuzzy bi-objective mixed-integer programming method for solving supply chain network design problems under ambiguous and vague conditions» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1567-1595, 2014.
- [8] S. Li, X. Li, D. Zhang y L. Zhou, «Joint optimization of distribution network design and two-echelon inventory control with stochastic demand and CO₂ emission tax charges» *PLoS ONE*, vol. 12, 2017.
- [9] Sutarman y E. Hidayat, «Rive distribution planning for "the poor people" in Bandung, West Java Indonesia» *IOP Conference series: Materials science and engineering*, 2017.
- [10] M. Musavi y A. Bozorgi-Amiri, «A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 113, pp. 766-178, 2017.
- [11] O. Herrera, O. Mayorga y A. Santis, «The Design of the Logistics Operation of Food Distribution in Different Localities in the South» de *Modeling and Simulation in Eng., Economics*, Teruel, Spain, Springer, 2016, pp. 112-122.
- [12] O. J. Herrera y I. D. Romero, «Model of Transshipment and Routing Applied to the Cargo Sector in Small and Medium Enterprises of Bogotá, Colombia» *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, pp. 621 - 627, 2018.
- [13] Y. Bouzembrak, H. Allaoui, G. Goncalves, H. Bouchriha y M. Baklouti, «A possibilistic linear programming for supply chain network design under uncertainty» *IMA Journal of Management Mathematics*, pp. 209-229, 2012.
- [14] S. Avraamidou y E. Pistikopoulos, «A multiparametric mixed-integer bi-level optimization strategy for supply chain planning under demand uncertainty» *IFAC-PapersOnLine*, pp. 10178-10183, 2017.
- [15] F. T. Razmi y S. Sangari, «A variational inequality formulation for designing a multi-echelon, multi-product supply chain network in a competitive environment» *Annals of Operations Research*, 2017.
- [16] E. Israel, A. Albrecht, E. Frazzon y B. Hellingrath, «Operational supply chain planning method for integrating spare parts supply chain and intelligent maintenance systems» *IFAC Papers Online*, pp. 12428-12433, 2017.
- [17] S. Tzu, *El Arte de la Guerra*, Edaf, 2012.
- [18] J. Pau Cos y R. Navascués, *Manual de Logística Integral*, Madrid: Ediciones Diaz de Santos S.A., 1998.
- [19] J. E. Serrano, *Logística de Almacenamiento*, Madrid: Ediciones Paraninfo, SA, 2014.
- [20] J. Stock y D. Lambert, *Strategic Logistics Management*, Mexico: 4ta edición. Mc Graw Hill, 2001.
- [21] O. Carranza, F. Sabriá, P. Resende y A. Maltz, *Logística. Mejores prácticas en Latinoamérica*, México D.F: Thomson, 2004.
- [22] J. F. Cordeau, F. Pasin y M. Solomon, «An integrated model for logistics network design» pp. 59-82, 2006.
- [23] R. H. Ballou, *Administración de la Cadena de Suministro*, Mexico: Pearson, 2004.
- [24] L. A. M. García, *Gestión Logística Integral*, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2010.
- [25] S. Chopra y M. Peter, *Administración de la cadena de suministro Estrategia, planeación y operación.*, México: Pearson, 2008.
- [26] P. M. Pardalos y M. G. Resende, *Handbook of applied optimization*, Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 2002.
- [27] A. Ramos, P. Sánchez, J. M. Ferrer, J. Barquín y P. Linares, *Modelos matemáticos de optimización*, Madrid: Comillas, 2010.
- [28] R. A. Mora, *Diseño y desarrollo de un método heurístico basado en un sistema socio-cultural de creatividad para la resolución de problemas de optimización continuos no lineales y diseño de zonas electorales*, México DF: Universidad Autónoma de México, 2013.

- [29] J. J. Salazar, Programación matemática, Tenerife. España: Ediciones Díaz de Santos, 2001.
- [30] J. Fuentes, M. Parra y H. A. Gutiérrez, «Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora Representaciones Continental,» *Gestión & Sociedad*, vol. 1, nº 7, pp. 171-186, 2014.
- [31] F. S. Hillier y M. S. Hillier, Métodos cuantitativos para administración, México D. F.: McGraw-Hill, 2008.
- [32] Y. Bermúdez Colina, «Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta,» *Actualidad y Nuevas Tendencias*, pp. 85-104, 2011.
- [33] J. R. Montoya, J. López, S. Nieto, H. Felizzola y N. Herazo, «A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots» *Computers & Industrial Engineering*, p. 115-129, 2015.
- [34] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, Introducción a la investigación de operaciones, McGraw-Hill, 2010.
- [35] G. D. Eppen, F. J. Gould, C. P. Schmidt, J. H. Moore y L. R. Weatherford, Investigación de operaciones en la ciencia administrativa, México: Prentice Hall, 2000.
- [36] Miller, Tucker y Zemlin, «Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems» *Journal of the ACM*, vol. 7, pp. 326-329, 1960.

Integración de la gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en el negocio y su aporte a la medición de la madurez de la gestión organizacional: Una revisión sistemática

Sara J. Cárdenas B.¹

Yuber L. Rodríguez R.²

Magda V. Monroy S.³

Harold W. Hernández C.⁴

Universidad Santo Tomás – Colombia

Este capítulo tiene como objetivo analizar la variable de integración de la Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) en el negocio y su aporte a la medición de la madurez de la gestión organizacional. Para ello, se realizó una revisión sistemática de artículos publicados entre el 2000-2019 en Science Direct, Scopus, Taylor & Francis Group y Google Scholar con el fin de identificar el concepto, los beneficios de la integración de la gestión de la SST en el negocio, las estrategias para la integración y los efectos de la no integración. Se incluyeron en el análisis 50 artículos en los cuales se identificaron 10 artículos que centran sus estudios en integración de la gestión de la SST en el negocio, 30 en madurez de la gestión organizacional y 10 en ambos. Para los beneficios de la integración de la gestión de la SST en el negocio se identificaron el aumento de la productividad y eficiencia de los trabajadores, disminución de los costos y las interrupciones en las actividades, aumento de la competitividad y rentabilidad de la organización, cumplimiento de las expectativas de las partes interesadas y aumento de la confianza por parte de los posibles inversores. En cuanto a las estrategias para la integración se diseñaron 5 estrategias orientadas a alcanzar cada uno de los beneficios de la integración, 3 de las estrategias son de tipo funcional y 2 estrategias de crecimiento. Los efectos de la no integración están causados por la falta de cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos, lesiones y deterioro de la salud relacionada con el trabajo en los trabajadores y el daño de la reputación para con las partes interesadas.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) se pueden definir como un programa de seguridad planificada y documentada que incorpora ciertos conceptos básicos de gestión y elementos de activación en un sistema de seguridad bien organizado [1] todo esto, con el propósito de prevenir la accidentalidad y la enfermedad laboral dentro de las organizaciones. Sin embargo, con el paso del tiempo los sistemas de gestión en la SST representan dentro de la organización una estrategia que facilita la sostenibilidad de la misma, y no se perciben únicamente como una obligación legal y social de las empresas, sino que aprecian las acciones de la SST en la mitigación de gran cantidad de riesgos. En otras palabras, los sistemas de gestión de SST son considerados parte esencial de un negocio exitoso [2]. En el contexto anterior, se evidencia la trascendencia del aporte de los sistemas de gestión de SST a la gestión organizacional como foco de entendimiento del comportamiento estructural dentro de los parámetros que buscan orientar el cumplimiento de los objetivos de cualquier organización en pro de mantenerse a través del tiempo.

Conforme avanza el tiempo se han desarrollado estándares tanto internacionales como nacionales para la implementación de los sistemas de gestión de SST debido a la necesidad imperante de gestar un lenguaje universal que permita orientar la construcción permanente de la organización a partir de mejoras que indiferente a las características de la empresa puedan cumplir con el objetivo mismo de prevenir o minimizar los accidentes y la mala salud. Aun teniendo en cuenta el objetivo filantrópico de los sistemas de gestión de SST se debe aclarar que la implementación y mantenimiento de este sistema no ha sido del todo exitosa dentro de las organizaciones y ha sido en numerosas oportunidades cuestionada.

Lo anterior se evidencia en diversos estudios que han sido particularmente críticos al tildar a los sistemas de gestión de SST como los "tigres de papel" e incluso señalan que se necesitan mejoras severas en términos de medidas de salud y seguridad ya que no prestan mucha atención a parámetros importantes y competitivos como los costos pagados por los empleados que se representan en términos de pérdida de salarios, tratamientos médicos, dolor y reducción de la calidad de vida, entre otros [3], circunstancia que permite pensar en la estandarización de los sistemas de gestión de SST dando respuesta a las necesidades y expectativas de las partes interesadas, teniendo en cuenta los contextos organizativos internos y externos [4], que a menudo han dado lugar a que sus beneficios se limiten.

En cuanto a la relación específica existente entre gestión organizacional y los sistemas de SST se habla a partir de la madurez organizacional ya que uno de los objetivos principales de evaluar la madurez de la gestión organizacional es ayudar a las organizaciones a ver las operaciones de manera consistente y reproducible. Los resultados de las evaluaciones de madurez permiten el desarrollo de estrategias que pueden conducir a mejores operaciones [5], es decir, el trabajo conjunto entre los objetivos del sistema de gestión de SST y la gestión organizacional se refleja en la organización alcanzando el futuro deseado. En este sentido, se creó la ISO 45001:2018 la cual tiene como fin "permitir a las organizaciones proporcionar lugares de trabajo seguros y saludables previniendo las lesiones y el deterioro de

¹ saracardenas@usantotomas.edu.co

² yuberrodriguez@usantotomas.edu.co

³ magdamonroy@usantotomas.edu.co

⁴ harold.hernandez@usantotomas.edu.co

la salud relacionados con el trabajo”. En esta norma se considera la integración del sistema de gestión de SST en los procesos de la organización como un factor de éxito para la implementación de este sistema.

La integración del sistema de gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización es por tanto una variable que pretende crear un sistema dinámico y eficiente, en el cual se necesita una sinergia entre las diferentes áreas y la reunión en todos los niveles de negocios para crear una base sólida con el fin de trabajar hacia un sistema de administración más sostenible [4] por lo tanto, refiere a cómo la seguridad y salud en el trabajo aporta como sistema de gestión a la sostenibilidad de la organización ejerciendo un control sistemático del rendimiento del trabajador, el rendimiento de la máquina y el entorno físico [1] en donde la participación en la seguridad incluye comportamientos que respaldan los objetivos y metas de la organización en todas las áreas [6]. Por lo tanto, se requiere comprender los elementos conceptuales de esta variable de integración de la gestión de la SST en el negocio y su aporte a la medición de la madurez de la gestión organizacional, así como los beneficios y estrategias de la integración y los efectos de la no integración de la SST en los procesos de negocio de la organización.

2. MÉTODO

La recopilación de artículos sobre integración de la gestión de la SST en el negocio y la madurez de la gestión organizacional es un reto debido a la cantidad de publicaciones académicas relacionadas entre sí procedentes de múltiples fuentes, sin embargo, se realizó una revisión sistemática de la literatura científica sobre artículos relacionados y publicados en estos temas entre el año 2000 y 2019.

2.1 Estrategia de búsqueda

La búsqueda de los artículos se realizó a través de las siguientes bases de datos: Scopus, Science Direct, Taylor & Francis Group y Google Scholar (buscador de artículos en editores de investigación).

2.2 Muestra de criterios de inclusión y/o exclusión

Los criterios de inclusión se basaron en los conceptos de integración de la gestión de la SST en el negocio y madurez de la gestión organizacional en donde la integración de la gestión de la SST en el negocio sea una variable de medición para la madurez de la gestión organizacional. Los criterios de inclusión fueron: Primero, la integración de la gestión de la SST en el negocio debía estar involucrada estrechamente con la madurez de la gestión organizacional, es decir, los estudios debían explorar la relación entre los conceptos. En segundo lugar, se consideraron términos relevantes relacionados con integración de la gestión de la SST en el negocio y la madurez de la gestión organizacional. Para soportar la relación buscada anteriormente en el estudio se evidenció que la integración de la gestión de la SST en el negocio es utilizada para investigar las condiciones específicas del estado de la organización en términos de madurez de la gestión, y a su vez a través de la literatura relacionada con madurez de la gestión organizacional se propone que la integración de la gestión de la SST en el negocio pueden estar relacionados con la calidad de las prácticas de gestión de la seguridad y la salud en el trabajo en las empresas [7]. Todos los pasos presentados en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corresponden a los criterios de inclusión y exclusión. Con los artículos de la selección final se realizó una matriz de referencia diligenciada manualmente para ubicar y consolidar la información obtenida a partir de la literatura. En los resultados se presentan los resúmenes de la misma.

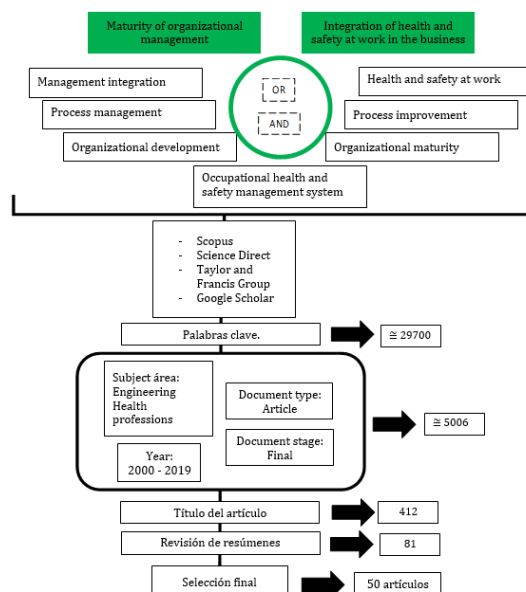


Figura 24. Estrategia de búsqueda

2.3 Búsqueda de literatura

Se realizó una búsqueda sistemática entre marzo y abril de 2019 utilizando los términos de búsqueda *“integración de la gestión de la SST en el negocio”* y *“madurez de la gestión organizacional”*, sin embargo, durante el proceso se requirió hacer uso de otros términos clave debido a la relación intrínseca existente entre los mismos con el fin de precisar los resultados de la revisión sistemática. Los términos añadidos fueron: *“Health and safety at work”*, *“Process improvement”*, *“Organizational maturity”*, *“Occupational health and safety management system”*, *“Organizational development”*, *“Process management”*, *“Management integration”*.

3. RESULTADOS

En general, con las palabras clave la búsqueda arrojó 29.700 resultados relacionados. En el segundo paso se involucró los criterios de inclusión y los filtros ceñidos a los años, el área temática, el tipo de documento y la etapa de publicación lo cual redujo los resultados a 5.006 artículos de los cuales se seleccionaron con base al título 412. Luego de una revisión de resúmenes se seleccionaron 81 artículos para la revisión del texto completo en donde se encontró que 10 artículos centran sus estudios en integración de la gestión de la SST en el negocio, 30 en madurez de la gestión organizacional y 10 en ambos. Al final se obtuvo 50 artículos que cumplen con los criterios de inclusión.

3.1 Análisis comparativo de la interacción de las palabras clave durante el proceso de búsqueda

A continuación, con el fin de analizar ampliamente el texto y explorar la interacción de las palabras clave de mayor frecuencia en los artículos se utilizó la herramienta de software para construir y visualizar redes bibliométricas VOSviewer. Esta herramienta mediante la técnica de minería de texto permitió construir y visualizar las redes de co-ocurrencia de términos que en este caso son las palabras clave extraídas de la literatura científica obtenida durante la búsqueda. Acerca del análisis se realizó en tres etapas con el fin de obtener un acumulado comparativo de información; es decir, relacionar cómo interactuaron las palabras clave durante el proceso de búsqueda a medida que se aumentaban los filtros. Esto se realizó con el propósito de ir afinando los términos clave utilizados para que se depurara la información y durante el proceso se evidenciara una ruta de búsqueda orientada. La interpretación y ruteo de cada mapa se evidencia a continuación:

En la primera etapa se realizó el análisis con los artículos obtenidos dentro de las bases de datos únicamente al filtrar con las palabras clave lo cual arrojó el mapa que se evidencia en la Figura 25.

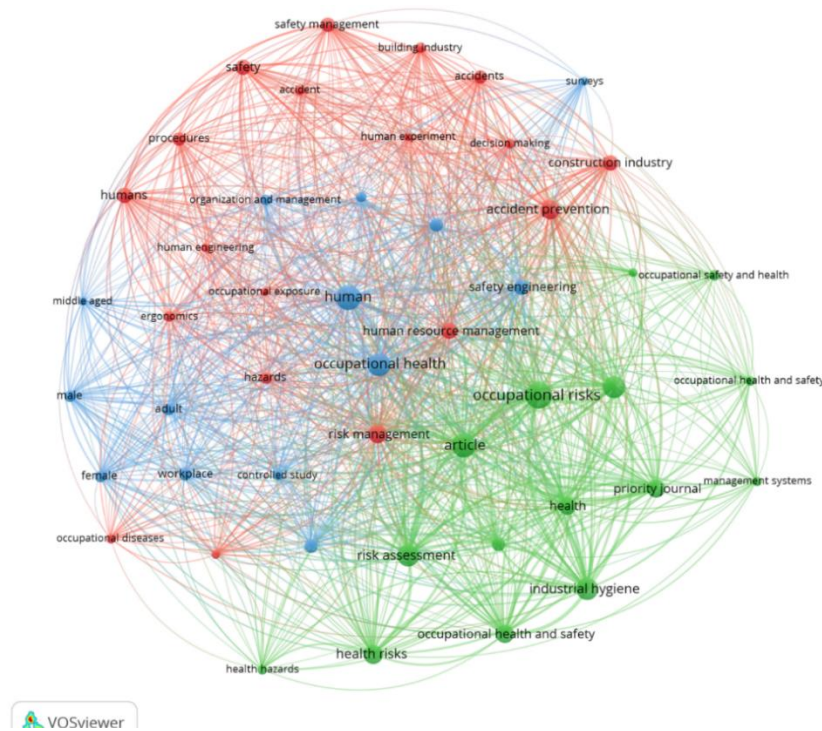


Figura 25. Análisis de coocurrencia 1 – palabras clave

La primera observación realizada sobre la Figura 25 es acerca de la relación existente en tres grupos de términos enmarcados en el color rojo, azul y verde los cuales interactúan entre sí. Dentro del color rojo resaltan términos clave como *“risk management”*, *“human resource management”*, *“decision making”* y *“safety management”* y se denota la prevalencia de palabras como *“humans”*, *“safety”*, *“accidents”* y *“hazards”*. En la red de color azul se evidencia la relevancia de términos repetitivos como *“organization and management”*, *“safety engineering”*, *“occupational health”*

A continuación, en las Tablas 1 a 3 se presentan los resultados por título, contenido relacionado al tema del presente estudio y la referencia.

3.2 Artículos relacionados con integración de la gestión de la SST en el negocio y madurez de la gestión organizacional

Tabla 32. Artículos relacionados con integración de la gestión de la SST en el negocio y madurez de la gestión organizacional

Variable	No.	Títulos	Análisis global	Cita
Integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización y madurez de la gestión organizacional	10	<i>A cross-sectional study of factors influencing occupational health and safety management practices in companies.</i>	Se realizó la revisión de contenido por cada artículo en la cual se encontró que estos cumplen con el primer criterio de inclusión en donde la integración de la gestión de la SST en el negocio está involucrada estrechamente con la madurez de la gestión organizacional. Lo anterior se concluyó ya que dentro de los artículos se destaca la relevancia de comprender qué factores y en qué medida desempeñan un papel en el funcionamiento de las prácticas de gestión de SST [7], es decir, evaluar la madurez de la gestión organizacional. Los resultados de la revisión evidenciaron que dentro de estos diez artículos sobresale la necesidad de la integración de la gestión de la SST en el negocio o criterios relacionados con la integración como factores determinantes en la evaluación de la madurez de la gestión organizacional. Los artículos se centran en proporcionar una descripción del conjunto de factores que influyen al evaluar la confiabilidad y validez de los resultados del sistema de gestión de SST [12].	[7]
		<i>Análisis de capacidades dinámicas en los sistemas de gestión empresarial y en los modelos de madurez organizacionales</i>	[8]	
		<i>Corporate Social Responsibility and the EFQM excellence model as a frame work for integration of management systems in organizations.</i>	[9]	
		<i>Integrated Management System for quality management system accreditation.</i>	[10]	
		<i>Lean-integrated management system: A model for sustainability improvement.</i>	[4]	
		<i>Maturity in management system integration and its relationship with sustainable performance.</i>	[11]	
		<i>Maturity models and safety culture: A critical review</i>	[12]	
		<i>Safety Management System in TQM environments.</i>	[13]	
		<i>The business benefits of good occupational safety and health.</i>	[2]	
		<i>The Impact of Job Stress and Job Satisfaction on Workforce Productivity in an Iranian Petrochemical Industry.</i>	[14]	

3.3 Artículos relacionados con integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización

Tabla 33. Artículos relacionados con integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización

Variable	No.	Títulos	Análisis global	Cita
Integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización	10	<i>A new conceptual framework to improve the application of occupational health and safety management systems.</i>		[15]
		<i>An Assessment Model of Safety Production Management Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method and Behavior-Based Safety.</i>		[16]
		<i>An assessment of occupational health and safety measures and performance of SMEs: An empirical investigation.</i>	Para los artículos concernientes a la integración de la gestión de la SST en los procesos de la organización se encontró que dentro de los mismos no se habla puntualmente de este concepto, sin embargo, si se habla desde la intervención y mejora de los sistemas de gestión de SST y como estos interfieren e impactan en la efectividad de los procesos de la organización. Conforme a esos resultados se constituyó el análisis pertinente para evaluar y determinar el concepto circundante entre estos documentos acerca de la integración.	[3]
		<i>Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach</i>	[17]	
		<i>Implementation of safety management system in managing construction projects: Benefits and obstacles</i>	[18]	
		<i>Integral Diagnosis of Occupational Health and Safety Management in Colombian Construction Companies</i>	[19]	
		<i>Investigating the Impact of Establishing Integrated Management Systems on Accidents and Safety Performance Indices: A Case Study.</i>	[20]	
		<i>Proactive occupational safety and health management: Promoting good health and good business</i>	[21]	
		<i>Relation between occupational safety management and firm performance</i>	[22]	
		<i>Safety Culture Promotion Intervention Program (SCPIP) in an oil refinery factory: An integrated application of Geller and Health Belief Models</i>	[23]	

3.4 Artículos de madurez de la gestión organizacional

Tabla 34. Artículos de madurez de la gestión organizacional

Variable	No.	Títulos	Análisis global	Cita
Madurez de la gestión organizacional	30	<i>A new framework for HSE performance measurement and monitoring.</i>	A partir de los artículos acerca de madurez de la gestión organizacional se logró identificar que el número de estudios concernientes al tema es mucho mayor y a su vez proporciona una visión holística. La contribución de estos	[24]
		<i>An innovative methodology for measuring the effective implementation of an Occupational Health and Safety Management System in the European Union</i>	[25]	

Variable	No.	Títulos	Análisis global	Cita
		<i>An integrated holistic model for a safety and health system: A national implementation approach and a new cloud-based security model.</i>	artículos está dada en tres partes, la primera, medición y monitoreo. La segunda, contribuciones y condiciones y la tercera, obstáculos y limitaciones para la evaluación de la madurez de la gestión organizacional.	[26]
		<i>Barriers to occupational health and safety management in small Brazilian enterprises</i>		[27]
		<i>Contributions and conditions of structured debates on work on safety construction</i>	Conforme a las partes mencionadas anteriormente cada documento es una herramienta estratégica para la evaluación de la implementación y mantenimiento del sistema de gestión de SST dentro de las organizaciones a partir de la madurez organizacional ya que uno de los objetivos principales de evaluar la madurez de la gestión organizacional es ayudar a las organizaciones a ver las operaciones de manera consistente y reproducible.	[28]
		<i>Development of a multilevel health and safety climate survey tool within a mining setting</i>		[29]
		<i>Diagnosis of safety culture: A replication and extension towards assessing "safe" organizational change processes</i>		[30]
		<i>Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach</i>		[31]
		<i>Evaluating effectiveness of OHSAS 18001 on safety performance in manufacturing companies in Iran</i>		[32]
		<i>Evaluation of the Quality of Occupational Health and Safety Management Systems Based on Key Performance Indicators in Certified Organizations.</i>		[33]
		<i>Examining the relationship between safety culture maturity and safety performance of the mining industry</i>		[34]
		<i>Influence of safety motivation and climate on safety behavior and outcomes: evidence from the Saudi Arabian construction industry</i>		[35]
		<i>Integrated management systems assessment: a maturity model proposal</i>		[36]
		<i>Investigation of the occupational health and safety conditions in Hellenic solid waste management facilities and assessment of the in-situ hazard level</i>		[37]
		<i>Leading or lagging? Temporal analysis of safety indicators on a large infrastructure construction project</i>		[38]
		<i>Maturity models: a useful solution to assess current OHS management system</i>		[39]
		<i>Measuring and Evaluating Safety Maturity of Construction Contractors: Multicriteria Decision-Making Approach</i>		[40]
		<i>Measuring operational performance of OSH management system - A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators</i>		[41]
		<i>Methodology for assessment of the r&d process maturity of an organization</i>		[42]
		<i>Quantitative assessment of occupational safety and health: Application of a general methodology to an Italian multi-utility company</i>		[43]
		<i>Safety outcomes for engineering asset management organizations: Old problem with new solutions?</i>		[44]
		<i>The concept of resilience in OSH management: a review of approaches</i>		[45]
		<i>The role of safety leadership and working conditions in safety performance in process industries</i>		[6]
		<i>The Safety Climate Assessment Tool (S-CAT): A rubric-based approach to measuring construction safety climate</i>		[46]
		<i>The Safety Journey: Using a Safety Maturity Model for Safety Planning and Assurance in the UK Coal Mining Industry</i>		[47]
		<i>The strategic of implementation health and safety to improved performance construction management system (Case in Arcamanic project, Indonesia)</i>		[48]
		<i>Worker productivity, and occupational health and safety issues in selected industries</i>		[49]
		<i>Workers' compensation insurer risk control systems: Opportunities for safety and health collaborations</i>		[50]

3.5 Definición y concepto de integración de la gestión de la SST en el negocio

La NTC ISO 45001:2018 determina que “la implementación y mantenimiento de un sistema de gestión de la SST, su eficacia y su capacidad para lograr resultados previstos dependen de varios factores claves entre ellos la integración del sistema de gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización” y es bajo esta premisa que se convirtió gradualmente en una variable de estudio. Sobre este contexto es que la integración del sistema de gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización adquiere relevancia y es necesario conceptualizarla y definirla. La integración del sistema de gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización es por tanto una variable que pretende crear un sistema dinámico y eficiente, en el cual se necesita una sinergia entre las diferentes áreas y la reunión en todos los niveles de negocios para crear una base sólida con el fin de trabajar hacia un sistema de administración más sostenible [4] por lo tanto, refiere a cómo la seguridad y salud en el trabajo aporta como sistema

de gestión a la sostenibilidad de la organización ejerciendo un control sistemático del rendimiento del trabajador, el rendimiento de la máquina y el entorno físico [1] en donde la participación en la seguridad incluye comportamientos que respaldan los objetivos y metas de la organización en todas las áreas de la misma [6].

Conforme a la anterior definición es importante establecer el concepto de integración de la gestión de la SST en el negocio y el papel de esta variable en la medición de la madurez organizacional conforme a los resultados obtenidos en el desempeño exitoso de una empresa económicamente hablando. Para ello diversos estudios soportan la existencia de gran cantidad de factores que están asociados y por tanto determinan de una u otra forma dichos resultados. Bajo esta premisa se establece el supuesto que, si los humanos operan en un buen ambiente de trabajo seguro y saludable, ergonómicamente diseñado, creativo, y así sucesivamente, estos factores beneficiosos se reflejarán en los resultados financieros de la compañía [7] lo cual implica que los recursos utilizados en la implementación y mantenimiento de un sistema de gestión de la SST se compensan de manera que este aporta a la organización para lograr más ganancias.

Para ilustrar la idea de aplicación práctica de la integración de la gestión de la SST en el negocio y al alcance de las organizaciones se procede con el desarrollo de enunciados claros para hacer más fácil de transmitir interna como externamente a la organización dicha idea y así lograr explicar qué implica y los requisitos internos de la integración dentro de la empresa; y el otro para comunicar de manera concisa el riesgo que se presenta a la organización en caso de que estos elementos se pasen por alto [15]. Dicho de otra forma, establecer los beneficios y estrategias para la integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización y los efectos de la no integración.

3.6 Beneficios de la integración de la gestión de la SST en el negocio

En el marco de la presente revisión de literatura acerca de la integración del sistema de gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización y el aporte de esta variable a la medición de la madurez de la gestión organizacional se han logrado identificar los beneficios por los cuales dicha variable es relevante y soporta su importancia.

Esta revisión de literatura establece que, primero, la implementación del sistema de gestión de SST en el negocio determina las condiciones de la organización sobre las cuales se van a ejecutar las operaciones de la misma. Estas condiciones pueden llegar a considerarse como beneficiosas ya que contribuyen a un mejor estado dentro de la empresa, sin embargo, se identificó que el beneficio de la integración del sistema de gestión de la SST a nivel operacional en el negocio es único y conlleva a que el impacto verdadero que esta variable puede generar es el aumento de los rendimientos financieros dentro de la organización teniendo en cuenta que las investigaciones consultadas sobre el impacto de la gestión eficaz de la SST se han centrado principalmente en los beneficios financieros [21]. Por otra parte, se identificó que la eficiencia operacional es el segundo beneficio más importante tras la implementación de un sistema de gestión de SST, seguido de las condiciones trabajo, dado que implica la optimización de los recursos y la generación de productos y servicios con mayor calidad, por lo tanto, los indicadores de eficiencia operacional, junto los de condiciones de trabajo se convierten en información esencial para la toma de decisiones por parte de los niveles estratégicos y tácticos (jefes de producción, gerentes de operaciones, jefes de áreas, entre otros) de la organización en pro de la mejora del desempeño del sistema de gestión de SST y del incremento de la eficiencia de la operación, por ende en la productividad [18].

Normalmente el número de empleados, el volumen de negocios de la empresa, la solvencia crediticia, entre otros son factores cambiantes entre cada organización, por lo cual no existe probablemente un medio universal para estudiar grupalmente las organizaciones, sin embargo, cada una de las empresas interesadas en mejorar su desempeño en SST debe analizar detenidamente la forma en que opera e identificar el potencial de mejora [17]. Es por ello que a nivel global dentro de esta revisión se han agrupado los beneficios de la integración de la SST en el negocio en cinco ítems que favorecen a la organización en el marco de la implementación y mantenimiento del sistema SST. De estos ítems 3 son factores de carácter interno y dos de carácter externo a la organización como se evidencia en la Figura 28.

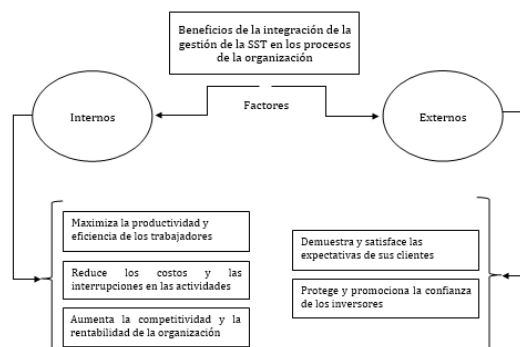


Figura 28. Beneficios de la integración de la gestión de la SST en el negocio

3.6.1 Beneficios de tipo interno de la integración

- *La integración de la gestión de SST en el negocio maximiza la productividad y eficiencia de los trabajadores.* La importancia de los trabajadores en la organización ha sido tema de constante estudio y debate y es por ellos que dentro de las organizaciones en múltiples oportunidades se toma la elección dominante de considerar y mantener a los empleados dentro de sus propias opiniones y preocupaciones sobre los problemas organizativos para sí mismos. Esta es una opción intencional para no comunicar información crítica sobre la organización a otros miembros que pueden abordar los problemas [28] de una u otra forma con una perspectiva holística ya que son los primeros en tener contacto con la situación real de la empresa. El anterior planteamiento es el primer problema en cuanto a la integración de los trabajadores en el negocio debido a esto de cualquier modo, el sistema de gestión de la seguridad puede reducir no solo las lesiones personales y los daños a la salud de los trabajadores, sino también evidenciar la trascendencia de los trabajadores dentro de la organización que también involucran al negocio. En consecuencia, reduce el tiempo de inactividad y el ausentismo laboral y mejora la satisfacción y la motivación de los trabajadores [22] que son rasgos que afectan de frente la eficiencia de los trabajadores y por consiguiente la productividad de la organización.

La productividad de la empresa se ve afectada por los accidentes de trabajo y otros factores que interrumpen el proceso de producción y generan, por un lado, costos financieros y de oportunidad y por otro lado, la disminución en la cantidad y calidad de la producción alcanzada [22] lo cual mediante el sistema de gestión de SST se aborda a través de una tendencia a mejorar la seguridad en el trabajo al asignar personal para administrar las actividades relacionadas y mediante la provisión de equipos de protección personal y elementos de protección colectiva [19]. Sin embargo, el primer paso para garantizar la productividad y eficiencia de los trabajadores debe ser aumentar el grado de importancia actual con el que las altas directivas conocen y cumplen con las regulaciones de los sistemas de gestión de SST y la forma en que se están comprometiendo a proteger la salud de sus trabajadores.

Es cierto también que, dado que se presentan algunas condiciones de no seguridad, estas situaciones pueden aportar contribuciones a los trabajadores locales involucrados y a la organización, mostrando una forma alternativa para evaluar y modelar el riesgo utilizando el conocimiento de trabajadores [28]. En conclusión, se ha encontrado que las condiciones que deben establecerse para que dichos espacios permitan el desarrollo de una organización capaz de anticipar situaciones que generen riesgos es al compartir y discutir colectivamente las situaciones cotidianas que pueden llegar a afectar la productividad y eficiencia de los trabajadores dentro de la organización debido a la correlación existente entre el "comportamiento de seguridad" de los trabajadores y la productividad durante todas las horas de operación; lo cual ayuda a reducir el potencial de lesiones en todos los incidentes y garantizar la segura operación en los procesos de negocio de la organización [37].

- *La integración de la gestión de SST en el negocio reduce los costos y las interrupciones en las actividades.* Está claro que la mala salud relacionada con el trabajo, los accidentes y las lesiones representan un costo financiero significativo para la economía de la organización [21] lo cual a su vez está estrechamente relacionado con las interrupciones en las actividades de los procesos de negocio ya que es viable que los empleados respondan a la insatisfacción laboral de esta forma. Las organizaciones son propensas a la degradación del rendimiento debido a "fallas de un comportamiento eficiente, racional, respetuoso de la ley, virtuoso o de otra manera funcional" que puede deberse a la falta de motivación del trabajador o la escasez de recursos [28], que de alguna forma son circunstancias que se escapan parcialmente del control de la alta dirección dentro de una organización, sin embargo, del manejo de estas circunstancias depende claramente el aumento o disminución de los costos dentro de las operaciones ya que la interrupción de actividades refleja las consecuencias dentro del área financiera de la organización.

Aunque es claro que en muchas oportunidades el costo se refleja en pérdidas operacionales en los procesos de negocio también es necesario resaltar que en múltiples oportunidades las compañías sienten que carecen del capital necesario para realizar una inversión adecuada en salud y seguridad y no aprecian la importancia de esta inversión [21] a corto y largo plazo, por lo cual la medición del costo de los accidentes y la mala salud relacionada con el trabajo es un gran desafío para muchas organizaciones ya que no se ha cuantificado hasta ahora los costos de las enfermedades relacionadas con el trabajo por lo cual no se considera una causa clave dentro de las interrupciones de las operaciones del negocio. La integración de la gestión de SST en el negocio permite a la organización evaluar las causas y las fallas de seguridad y salud relacionadas con el trabajo y así evaluar y mitigar las consecuencias negativas que sienten los empleadores, los empleados y sus familias a menudo cuando se experimentan accidentes o enfermedades laborales que repercuten en la interrupción en las actividades de la organización.

- *La integración de la gestión de SST en el negocio aumenta la competitividad y la rentabilidad de la organización.* Es para la organización fundamental medirse frente al rendimiento financiero que está generando con los procesos de negocio de la organización y a su vez saber cuál es su posición frente al mercado en el cual compete. Cuando se inicia una discusión acerca de competitividad es necesario e indispensable resaltar el valor agregado que posee

una empresa frente a otra ya que de esto depende la relación entre ganancias y posición en el mercado. Se sabe que el sistema de gestión de SST es un área desatendida y una función que no se ha desarrollado sistemáticamente en la industria pero es un tema importante que muchos empleadores no creen que sea vital para el éxito de las empresas [51], sin embargo, bajo el contexto actual de alta competitividad, debido a la presencia de mercados abiertos y la globalización, aumenta la importancia que los sistemas de gestión de calidad, medio ambiente y salud ocupacional ya que han adquirido relevancia a nivel global [9] por lo cual están vinculados de esta forma con la responsabilidad corporativa, es decir, está sujeto al manejo por parte de la alta dirección con el fin de aumentar la rentabilidad de la organización.

Bajo la relación expuesta anteriormente se establece la razón por la que una buena gestión de la seguridad laboral puede tener un efecto positivo no solo en las tasas de accidentes, sino también en las variables de competitividad y el desempeño financiero. Por lo tanto, es una buena oportunidad para aquellas organizaciones que aceptan el desafío y adoptan la gestión de la seguridad [22] como una cultura dentro de la organización.

3.6.2 Beneficios de tipo externo de la integración

- *La integración de la gestión de SST en el negocio demuestra y satisface las expectativas de sus clientes.* En las organizaciones cada uno de los actores involucrados dentro de la ejecución de los procesos de negocio es importante, sin embargo, los clientes de la empresa juegan un papel transversal tanto operacional como estratégicamente debido a que ellos son los encargados de activar la economía de la organización. Con base en el anterior postulado cumplir con los requerimientos de los clientes está inmerso en todas las etapas y áreas de la organización por lo cual se expone que un accidente de trabajo, por ejemplo, puede hacer que la empresa pierda las fechas de entrega, lo que conduce, por un lado, a pérdidas económicas debido a la demora misma, y por el otro, a un deterioro en la percepción de la empresa por parte de los clientes [22]. El anterior ejemplo muestra la importancia de la integración de la gestión de SST en el negocio frente un agente externo como son los clientes en las organizaciones. La creación de valor de la organización puede aumentar o disminuir en la competitividad de la empresa, con la consiguiente pérdida de posición en el mercado que repercute en la percepción del cliente frente al cumplimiento con los procesos de negocio de la organización y es ahí cuando inicial el deterioro de la imagen pública de la empresa.
- *La integración de la gestión de SST en el negocio protege y promueve la confianza de los inversores.* En primera instancia este beneficio de la integración de la gestión de SST en el negocio contempla la protección y promoción de la confianza de los inversores, debe ser visto desde dos perspectivas, la primera, la inversión interna que realiza la organización a partir de evidenciar la pertinencia de la gestión de SST en los procesos de negocio y la segunda es verificar el aporte de valor que se vea reflejado en la rentabilidad del negocio.

De esta manera primero es necesario señalar que las inversiones en seguridad no son competitivas si se comparan con otras inversiones dentro de las organizaciones, debido a la gestión de atribución de responsabilidades que no garantiza la exención de responsabilidad en el caso de accidentes impredecibles y una política de incentivos insuficiente para las empresas, virtuosas en inversiones de seguridad [25]. Lo cual preocupa ya que si internamente el sistema de gestión de SST cuenta con poca credibilidad externamente no será considerado como un valor agregado que atraiga inversionistas y tampoco que proporcione seguridad a los mismos sobre la inversión. Es por ello que si dentro de la organización se logra evidenciar como el sistema de gestión de SST interfiere en el aumento de la rentabilidad y la competitividad se convertirá en un factor de selección transversal para los inversionistas, ligado a los resultados en la disminución de costos derivados de las condiciones de salud y seguridad de los colaboradores y de los aumentos en la productividad esperados.

3.7 Estrategias para la integración de la gestión de la SST en el negocio

Con base en los resultados obtenidos en los beneficios de la integración de la gestión de la SST en el negocio se han planteado cinco estrategias que promueven asertivamente la integración de la gestión de la SST en el negocio con el propósito de alcanzar los beneficios vistos como objetivos organizacionales, es decir, mantener la relación planteada acerca de la integración como una variable de medición de la madurez de la gestión organizacional. Lo anterior se gestiona a través de la relación de estrategias bajo el contexto interno y externo como se evidencia en la Figura 29 debido al carácter de los beneficios.

Para el desarrollo se optó por la implementación de dos tipos de estrategias como se evidencia en la Figura 29, lo cual implica que las estrategias para el contexto interno son de tipo funcionales, es decir, están pensadas para contribuir al cumplimiento de los objetivos del sistema de gestión de SST ya estructurado dentro de la organización. En segunda instancia las estrategias de crecimiento que fueron construidas a partir de estrategias genéricas en donde se contempló los diferentes entornos externos que pueden afectar a la organización. Esta distinción permitió priorizar y clasificar los objetivos.

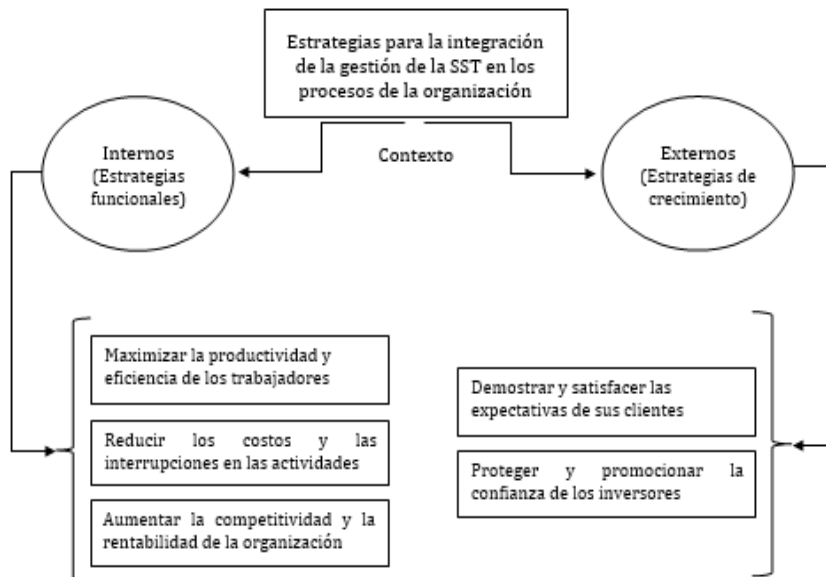


Figura 29. Estrategias de la integración de la gestión de la SST en el negocio

3.7.1 Estrategias de tipo interno para la integración

- Estrategia para maximizar la productividad y eficiencia de los trabajadores. Figura 7.

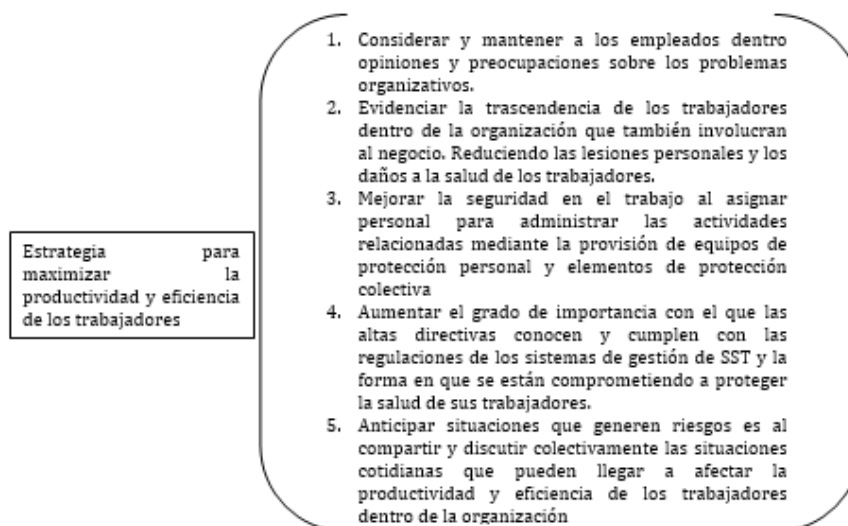


Figura 30. Estrategia para maximizar la productividad y eficiencia de los trabajadores

- Estrategia para reducir los costos y las interrupciones en las actividades de los procesos de negocio de la organización. Figura 8.

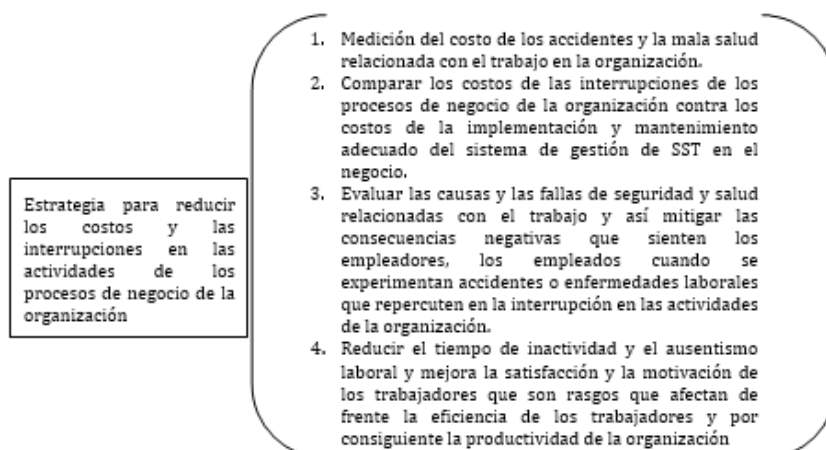


Figura 31. Estrategia para reducir los costos y las interrupciones en las actividades de los procesos de negocio de la organización

- *Estrategia para aumentar la competitividad y la rentabilidad de la organización.* Figura 9.

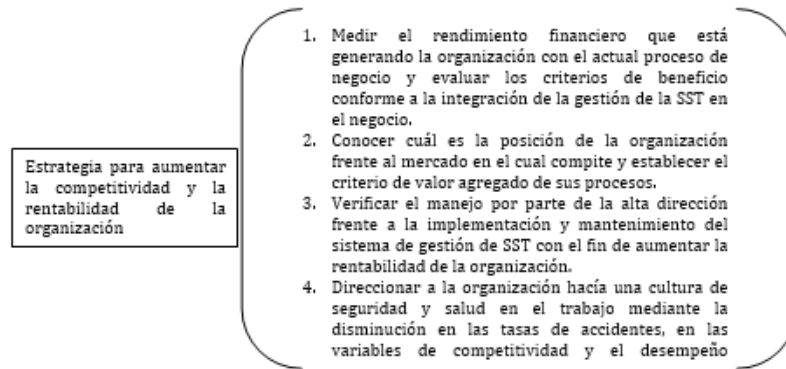


Figura 32. Estrategia para aumentar la competitividad y la rentabilidad de la organización

3.7.2 Estrategias de tipo externo para la integración

- *Estrategia para demostrar y satisfacer las expectativas de los clientes de la organización.* Figura 10.

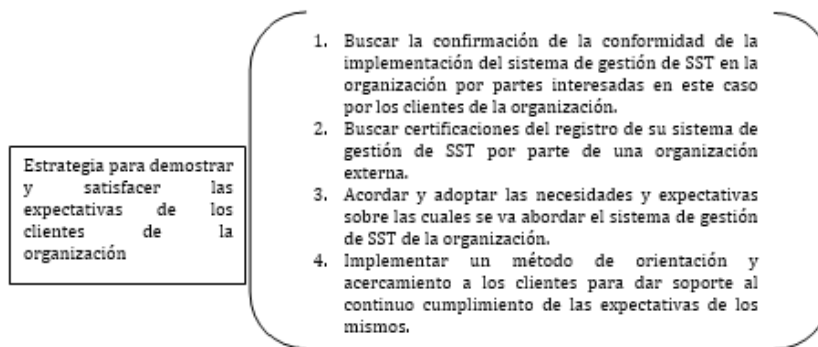


Figura 33. Estrategia para demostrar y satisfacer las expectativas de los clientes de la organización

- *Estrategia para proteger y promover la confianza de los inversores dentro y fuera de la organización.* Figura 11.

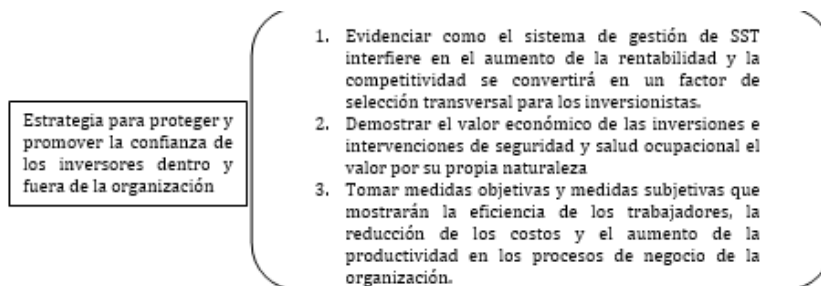


Figura 34. Estrategia para proteger y promover la confianza de los inversores

3.8 Efectos de la NO integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio

Los efectos de la NO integración de la gestión de la SST en los procesos de negocio de la organización están determinados en la NTC ISO 45001:2018, como se evidencia en el Figura 35 están diferenciados sobre el carácter interno y externo de los mismos. Los dos efectos de carácter interno responden a cómo afecta la no integración a los actores directamente involucrados dentro del proceso productivo; aquí se enmarca como las lesiones y el deterioro de la salud relacionados con el trabajo afecta a los empleados y a su vez en el marco de la alta dirección se evidencia la falta de cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos dentro de la organización. En el carácter externo se denota el daño a la reputación de la organización frente a las partes interesadas.

Conforme a esto se evidencia una relación con las consecuencias de la no integración, es decir, como los beneficios se convierten en problemas dentro de la organización. Esta situación es consecuencia de la creencia general entre las empresas que invertir en seguridad es un costo y, por lo tanto, tiene repercusiones negativas para su competitividad [22]. Por ello es necesario evidenciar los efectos que se evidenciaron en la revisión sistemática dentro de las prácticas de las organizaciones y reflejar que el desarrollo del compromiso por la gestión de la SST es insatisfactorio y refleja ausencia de una cultura de seguridad en la empresa.

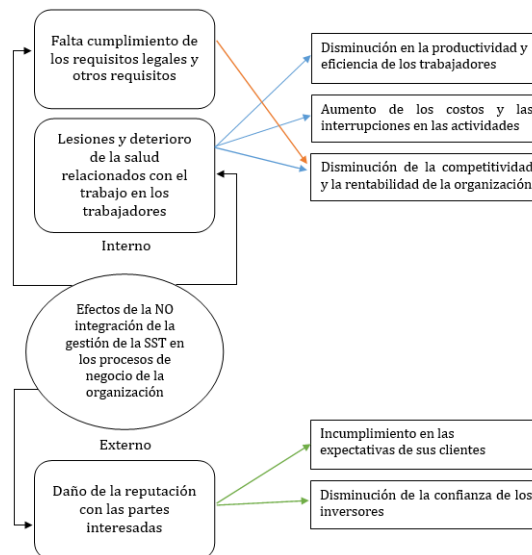


Figura 35. Efectos de la NO integración del sistema de gestión de SST en el negocio

4. CONCLUSIONES

En esta revisión de literatura se logró analizar la variable de integración de la gestión de la SST en el negocio y su aporte a la medición de la madurez de la gestión organizacional realizando una búsqueda sistemática de artículos que arrojó 50 documentos capaces de soportar un estudio sobre la relación existente entre integración de la gestión de la SST en el negocio y madurez de la gestión organizacional. Para el análisis de la información se hizo uso de la herramienta VOSviewer que permitió orientar la búsqueda a partir de términos clave.

Los resultados del presente documento dieron por cumplido el objetivo estableciendo la definición y concepto de integración de la gestión de la SST como una variable que pretende crear un sistema dinámico y eficiente, en el cual se necesita una sinergia entre las diferentes áreas y la reunión en todos los niveles de negocios para crear una base sólida con el fin de trabajar hacia un sistema de administración más sostenible [4] dentro de la organización. Seguido a ello se determinaron los beneficios de la integración para las organizaciones y se concluyó en 5 ítems que abarcan los beneficios de la de integración de la gestión de la SST en el negocio. Los beneficios son: aumento de la productividad y eficiencia de los trabajadores, disminución de los costos y las interrupciones en las actividades, aumento de la competitividad y rentabilidad de la organización, cumplimiento de las expectativas de las partes interesadas y aumento de la confianza por parte de los posibles inversores.

Con base en los beneficios obtenidos a partir de la revisión de los artículos se establecieron las estrategias que puede implementar una organización para la integración de la seguridad y salud en el negocio. Se diseñaron 5 estrategias orientadas a alcanzar cada uno de los beneficios de la integración que determinó que: 3 de las estrategias son de tipo funcional y 2 estrategias de crecimiento, cada una de las estrategias tiene por meta alcanzar respectivamente: maximizar la productividad y eficiencia de los trabajadores, reducir los costos y las interrupciones en las actividades de los procesos de negocio de la organización, aumentar la competitividad y la rentabilidad de la organización, demostrar y satisfacer las expectativas de los clientes de la organización y proteger y promover la confianza de los inversores dentro y fuera de la organización.

Se consideró transversal a los resultados exponer la importancia de la integración del sistema de gestión de SST en el negocio por lo cual se determinaron los efectos de la no integración y se correlacionaron con las consecuencias a nivel operativo y estructural. Los efectos de la no integración están causados por la falta de cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos, lesiones y deterioro de la salud relacionados con el trabajo en los trabajadores y el daño de la reputación para con las partes interesadas y todo está en términos de integración repercute en la disminución en la productividad y eficiencia de los trabajadores, aumento de los costos y las interrupciones en las actividades, disminución de la competitividad y la rentabilidad de la organización, incumplimiento en las expectativas de sus clientes y disminución de la confianza por parte de los posibles inversores en la organización.

REFERENCIAS

- [1] Y. Li and F. W. Guldenmund, "Safety management systems: A broad overview of the literature," *Saf. Sci.*, vol. 103, no. October 2017, pp. 94–123, 2018.
- [2] European Agency for Safety and Health at Work, "The business benefits of good occupational safety and health," *FACTS*, 2007.
- [3] M. A. Gopang, M. Nebhwani, A. Khatri, and H. B. Marri, "An assessment of occupational health and safety measures and performance of SMEs: An empirical investigation," *Saf. Sci.*, vol. 93, pp. 127–133, 2017.

- [4] J. P. E. Souza and J. M. Alves, "Lean-integrated management system: A model for sustainability improvement," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 2667–2682, 2018.
- [5] MDIC, "Maturity Model Research report," 2015.
- [6] B. Fernández-Muñiz, J. M. Montes-Peón, and C. J. Vázquez-Ordás, "The role of safety leadership and working conditions in safety performance in process industries," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 50, no. October, pp. 403–415, 2017.
- [7] H. Nordlöf, B. Wiitavaara, H. Högberg, and R. Westerling, "A cross-sectional study of factors influencing occupational health and safety management practices in companies," *Saf. Sci.*, vol. 95, pp. 92–103, 2017.
- [8] C. Ruiz Martí, "Análisis de capacidades dinámicas en los sistemas de gestión empresarial y en los modelos de madurez organizacionales," Universidad de Valladolid, 2014.
- [9] M. L. Quintero-Garzón, A. Carrión-García, M. Aurora Jordá-Rodríguez, and M. del Pilar Rodríguez-Córdoba, "Corporate Social Responsibility and the EFQM excellence model as a frame work for integration of management systems in organizations," 2015.
- [10] H. Muzaimi, S. R. Hamid, and B. C. Chew, "Integrated Management System for Quality Management System Accreditation," *J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 12, no. iDECON 2106, pp. 89–99, 2017.
- [11] C. F. Poltronieri, G. M. D. Ganga, and M. C. Gerolamo, "Maturity in management system integration and its relationship with sustainable performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 207, pp. 236–247, Jan. 2019.
- [12] A. P. Goncalves Filho and P. Waterson, "Maturity models and safety culture: A critical review," *Saf. Sci.*, vol. 105, no. February, pp. 192–211, 2018.
- [13] J. Álvarez-Santos, J.-Á. Miguel-Dávila, L. Herrera, and M. Nieto, "Safety Management System in TQM environments," *Saf. Sci.*, vol. 101, pp. 135–143, 2018.
- [14] N. Hoboubi, A. Choobineh, F. Kamari Ghanavati, S. Keshavarzi, and A. Akbar Hosseini, "The Impact of Job Stress and Job Satisfaction on Workforce Productivity in an Iranian Petrochemical Industry," *Saf. Health Work*, vol. 8, no. 1, pp. 67–71, 2017.
- [15] A. M. Makin and C. Winder, "A new conceptual framework to improve the application of occupational health and safety management systems," *Saf. Sci.*, 2008.
- [16] J. Zhang, X. Chen, and Q. Sun, "An assessment model of safety production management based on fuzzy comprehensive evaluation method and behavior-based safety," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [17] A. Skład, "Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach," *Saf. Sci.*, vol. 117, pp. 71–80, 2019.
- [18] N. S. N. Yiu, D. W. M. Chan, M. Shan, and N. N. Sze, "Implementation of safety management system in managing construction projects: Benefits and obstacles," *Saf. Sci.*, vol. 117, pp. 23–32, 2019.
- [19] F. A. S. Sánchez, G. I. C. Peláez, and J. C. Alís, "Integral diagnosis of occupational health and safety management in Colombian construction companies," *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 22, no. 2, pp. 101–116, 2017.
- [20] F. Laal, M. Pouyakian, R. F. Madvari, A. H. Khoshakhlagh, and G. H. Halvani, "Investigating the Impact of Establishing Integrated Management Systems on Accidents and Safety Performance Indices: A Case Study," *Saf. Health Work*, vol. 10, no. 1, pp. 54–60, 2019.
- [21] C. Haslam, J. O'Hara, A. Kazi, R. Twumasi, and R. Haslam, "Proactive occupational safety and health management: Promoting good health and good business," *Saf. Sci.*, 2016.
- [22] B. Fernández-Muñiz, J. M. Montes-Peón, and C. J. Vázquez-Ordás, "Relation between occupational safety management and firm performance," *Saf. Sci.*, 2009.
- [23] M. Haghghi, M. H. Taghdisi, H. Nadrian, H. R. Moghaddam, H. Mahmoodi, and I. Alimohammadi, "Safety Culture Promotion Intervention Program (SCPIP) in an oil refinery factory: An integrated application of Geller and Health Belief Models," *Saf. Sci.*, vol. 93, pp. 76–85, 2017.
- [24] P. Amir-Heidari, R. Maknoon, B. Taheri, and M. Bazyari, "A new framework for HSE performance measurement and monitoring," *Saf. Sci.*, vol. 100, pp. 157–167, 2017.
- [25] A. Bianchini, F. Donini, M. Pellegrini, and C. Saccani, "An innovative methodology for measuring the effective implementation of an Occupational Health and Safety Management System in the European Union," *Saf. Sci.*, vol. 92, pp. 26–33, 2017.
- [26] S. Al-Sharhan, E. Omran, and K. Lari, "An integrated holistic model for an eHealth system: A national implementation approach and a new cloud-based security model," *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 47, no. December 2018, pp. 121–130, 2019.
- [27] G. B. Garnica and G. D. C. Barriga, "Barriers to occupational health and safety management in small Brazilian enterprises," *Producao*, vol. 28, 2018.
- [28] R. Rocha, V. Mollo, and F. Daniellou, "Contributions and conditions of structured debates on work on safety construction," *Saf. Sci.*, vol. 113, pp. 192–199, 2019.
- [29] A. W. Parker, M. J. Tones, and G. E. Ritchie, "Development of a multilevel health and safety climate survey tool within a mining setting," *J. Safety Res.*, vol. 62, pp. 173–180, 2017.
- [30] G. Grote, "Diagnosis of safety culture: A replication and extension towards assessing 'safe' organizational change processes," *Saf. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 450–460, 2008.
- [31] Y. M. Goh, P. E. D. Love, G. Stagbouer, and C. Annesley, "Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 48, pp. 118–125, 2012.
- [32] A. Ghahramani and S. Salminen, "Evaluating effectiveness of OHSAS 18001 on safety performance in manufacturing companies in Iran," *Saf. Sci.*, vol. 112, pp. 206–212, 2019.
- [33] I. Mohammadfam, M. Kamalinia, M. Momeni, R. Golmohammadi, Y. Hamidi, and A. Soltanian, "Evaluation of the Quality of Occupational Health and Safety Management Systems Based on Key Performance Indicators in Certified Organizations," *Saf. Health Work*, vol. 8, no. 2, pp. 156–161, 2017.
- [34] E. Stemn, C. Bofinger, D. Cliff, and M. E. Hassall, "Examining the relationship between safety culture maturity and safety performance of the mining industry," *Saf. Sci.*, vol. 113, pp. 345–355, 2019.
- [35] K. Panuwatwanich, S. Al-Haadir, and R. A. Stewart, "Influence of safety motivation and climate on safety behaviour and outcomes: evidence from the Saudi Arabian construction industry," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 23, no. 1, pp. 60–75, 2017.
- [36] P. Domingues, P. Sampaio, and P. M. Arezes, "Integrated management systems assessment: A maturity model proposal," *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 164–174, Jun. 2016.

- [37] S. Kontogianni and N. Moussiopoulos, "Investigation of the occupational health and safety conditions in Hellenic solid waste management facilities and assessment of the in-situ hazard level," *Saf. Sci.*, vol. 96, pp. 192–197, 2017.
- [38] H. Lingard, M. Hallowell, R. Salas, and P. Pirzadeh, "Leading or lagging? Temporal analysis of safety indicators on a large
- [39] J. P. Domingues and P. Sampaio, "3. Maturity models: a useful solution to assess current OHS management system."
- [40] A. A. Karakhan, S. Rajendran, J. Gambatese, and C. Nnaji, "Measuring and Evaluating Safety Maturity of Construction Contractors: Multicriteria Decision-Making Approach," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 7, 2018.
- [41] D. Podgórski, "Measuring operational performance of OSH management system - A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators," *Saf. Sci.*, 2015.
- [42] G. González, R. Montequín, V. Balsera, and B. Alonso, "Methodology for assessment of the R&D process maturity of an organization."
- [43] A. Saracino et al., "Quantitative assessment of occupational safety and health: Application of a general methodology to an Italian multi-utility company," *Saf. Sci.*, 2015.
- [44] J. Novak, B. Farr-Wharton, Y. Brunetto, K. Shacklock, and K. Brown, "Safety outcomes for engineering asset management organizations: Old problem with new solutions?" *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 160, pp. 67–73, 2017.
- [45] M. Pęciłło, "The concept of resilience in OSH management: a review of approaches," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2016.
- [46] T. M. Probst, L. M. Goldenhar, J. L. Byrd, and E. Betit, "The Safety Climate Assessment Tool (S-CAT): A rubric-based approach to measuring construction safety climate," *J. Safety Res.*, vol. 69, pp. 43–51, 2019.
- [47] P. Foster and S. Hault, "The Safety Journey: Using a Safety Maturity Model for Safety Planning and Assurance in the UK Coal Mining Industry," *Minerals*, vol. 3, no. 1, pp. 59–72, Feb. 2013.
- [48] A. H. Sutawijaya and L. C. Nawangsari, "THE strategic of implementation health and safety to improved performance construction management system (Case in Arcamanic project, Indonesia)," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 176–181, 2018.
- [49] A. A. Shikdar and N. M. Sawaqed, "Worker productivity, and occupational health and safety issues in selected industries," *Comput. Ind. Eng.*, 2003.
- [50] L. Moore, S. Wurzelbacher, and T. Shockey, "Workers' compensation insurer risk control systems: Opportunities for public health collaborations," *J. Safety Res.*, vol. 66, pp. 141–150, 2018.
- [51] A. Bakri, R. Mohamad Zin, M. S. Misnan, and M. A. H. Mohammed, "Occupational Safety and Health (OSH) management systems: towards development of safety and health culture," *6th Asia-Pacific Struct. Eng. Constr. Conf.*, no. September, pp. 5–6, 2006.

Protocolo para la medición de la fuerza máxima de agarre: Una revisión sistemática

Cinthia A. Reales A.¹

Magda V. Monroy S.²

Christian R. Zea F.³

^{1,2} Universidad Santo Tomás

³ Pontificia Universidad Javeriana

Colombia

El estudio de las capacidades físicas de los humanos ha demostrado su importancia a través de los años y por medio de la valoración de la fuerza máxima de agarre de la mano en humanos se han generado estrategias de diagnóstico, control, vigilancia y prevención de condiciones de salud en la población en general y en población laboral. Sin embargo, la literatura científica refiere diversas técnicas, protocolos y equipos de medición para valorar la fuerza máxima de agarre, por lo tanto, este capítulo presenta la revisión sistemática por medio de estrategias de búsqueda en bases de datos como Scopus, Science Direct y Google académico sobre este tema. Como resultado se consideraron en la revisión 57 trabajos clasificados en: 1) los que se concentran en la fuerza máxima de agarre, y 2) los que consideran la medición de la fuerza máxima de agarre y la fuerza máxima de pinza (11 artículos). La síntesis comprendió la apropiación en las variables: Equipos de medición, número de repeticiones realizadas, mano o manos en la se realiza la prueba, postura del participante y consideraciones para la toma de pruebas. Los resultados obtenidos permitieron establecer un protocolo estandarizado para la medición de la fuerza de agarre que integra los hallazgos de la revisión de la literatura.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación sobre las dimensiones y capacidades físicas del ser humano llega a ser un tema que logra cobrar un importante interés en la sociedad actual. Es por ello que principalmente las caracterizaciones en ramas físicas como la Antropometría y la Dinamometría relacionadas con la fuerza máxima de agarre y pinza en miembro superior cumplen el propósito de establecer aspectos propios de los individuos y los grupos de personas de una población determinada [1]. Sus resultados se han aplicado en el mundo para el diseño de diferentes elementos de uso cotidiano que hacen parte de cada uno de los entornos que rodean a cada persona; ya que son un medio que permiten establecer la relación entre las herramientas y medidas para efectos de mejora en el diseño y producción de instrumentos, objetos y elementos para el ser humano.

Desde otro enfoque la incursión de la sociedad en los dispositivos manuales y electrónicos como estilo de vida y en el entorno laboral han generado cambios significativos en el trabajo, es por esto que la caracterización de medidas antropométricas y su relación con la fuerza máxima de agarre y de pinza en los trabajadores, permite el desarrollo conjunto de un ambiente laboral y puesto de trabajo adecuado en pro del trabajador según sus condiciones y necesidades reales. De esta forma, en diferentes países se realizan estudios en el campo de dimensiones y capacidades físicas en búsqueda de optimizar la productividad que, en complemento con la salud y seguridad, se caracteriza una población laboral específica, lo que ha permitido establecer referentes para el diseño de herramientas y ambientes de trabajo seguros [2] [3]. Sin embargo, en Colombia la documentación, estudios e información sobre las capacidades físicas de su población, en relación con la fuerza máxima de agarre y antropometría en diferentes sectores laborales son escasos e insuficientes, como consecuencia se acude a parámetros internacionales que, al diseñar productos, elementos de trabajo, muebles, espacios, etc., no se ajustan a las condiciones de la población en el país.

Con base en lo anterior y lo señalado por el Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) se evidencia el incremento de enfermedades asociadas con la actividad laboral relacionadas y los desórdenes musculo esqueléticos (DME): Grupo de condiciones que involucra nervios, tendones, músculos y estructuras asociadas a la mano por esfuerzos, en gran proporción relacionados con movimientos repetitivos, posturas forzadas y la fuerza de agarre [4]. Los DME de origen laboral son un problema de salud pública en países desarrollados y en desarrollo. Para el caso de Colombia, representan el 88% de los diagnósticos de enfermedades de origen laboral, dentro de los que predomina el Síndrome de Túnel del Carpo correspondiente al 42.5% de los diagnósticos [5].

El estudio, investigación y documentación de las capacidades físicas de los humanos, a nivel ocupacional ayuda a evidenciar las relaciones entre los DME, los factores de riesgo en el lugar de trabajo y la fuerza máxima de agarre y pinza. La presente revisión de literatura sobre la metodología para la valoración de la fuerza máxima de agarre sirve como referente de estandarización de protocolos de medición al respecto. Asimismo, es una oportunidad para potenciar sistemas de aplicación en caracterizaciones de las dimensiones y capacidades físicas al obtener datos completos de estas ramas, que en el ámbito ocupacional permitan direccionar a las variables y factores pertinentes para evaluación de la población laboral [6], lo que permite ser un aporte significativo en el sector de Salud y seguridad en el trabajo y en riesgos laborales, que a su vez contribuye en la contextualización para la valoración, caracterización y aplicación de pruebas en fuerza de agarre en la población Colombiana.

¹ cinthiareales@usantotomas.edu.co

² magdamonroy@usantotomas.edu.co

³ crzea@javeriana.edu.co

2. MÉTODO

Se establece una estrategia de búsqueda de documentos, publicaciones científicas y artículos de investigación en bases de datos focalizada en la fuerza máxima de agarre. Teniendo en cuenta la amplitud de la literatura científica existente, se realizó la depuración y revisión sistemática de literatura científica comprendida entre el año 2010 y el año 2019. El análisis se concentró en identificar la metodología y herramientas para la medición y recolección de información de la fuerza máxima de agarre.

2.1 Estrategia de búsqueda

La búsqueda de literatura científica se realizó a través de las bases de datos Scopus, Science Direct y Google Scholar. Los criterios de búsqueda se basaron en los sinónimos de "fuerza máxima de agarre". Se incluyeron en la revisión sistemática, aquellos artículos o documentos que presentaban en detalle el protocolo de recolección de información para la valoración de la fuerza máxima de agarre.

2.2 Búsqueda de la literatura

Se realizó una búsqueda sistemática entre febrero y mayo de 2019 utilizando como término central de búsqueda "fuerza máxima de agarre". Los términos que comprendieron la búsqueda fueron: "maximal grip strenght", "maximun grip streght", "hand grip strenght", "handgrip strenght", "grip strenght" y "hand strenght".

En total se identificaron 1832 documentos relacionados con los términos de búsqueda, al depurarse por año de publicación, área de conocimiento (Medicina y áreas de la salud, tipo de documento (artículo de investigación y artículo de revisión) y acceso al documento completo, finalmente se identificaron 191 documentos útiles para el estudio (Figura 1). Tras la revisión de título y resumen, se seleccionaron 57 referentes que se clasificaron en dos grupos: artículos que se concentraron en la fuerza máxima de agarre (46 artículos) y artículos que consideraron la medición de la fuerza máxima de agarre y la fuerza máxima de pinza (11 artículos).



Figura 1. Búsqueda y depuración de la literatura científica

Con apoyo de la herramienta VOSviewer se realizó un análisis de co-ocurrencia de las palabras claves de los documentos seleccionados. En la Figura 2 se evidencian que los términos con mayor relación son *grip strenght*, *femal*, *male*, *adult*, *controlled study* y *normal human*. En la Figura 3 se observa que los estudios consideran principalmente el sexo y la edad como variable en el momento de medir fuerza máxima de agarre, y utilizan como metodología estudios controlados. Así mismo en la figura 4, se evidencia que la tendencia de estudio de la fuerza de agarre está relacionada con variables como las dimensiones antropométricas, la masa corporal, la edad, el género y se está concentrando en estudios transversales.

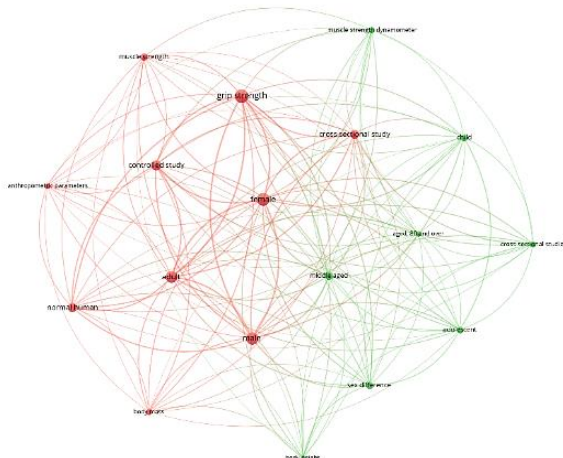


Figura 2. Análisis de co-ocurrencia palabras claves

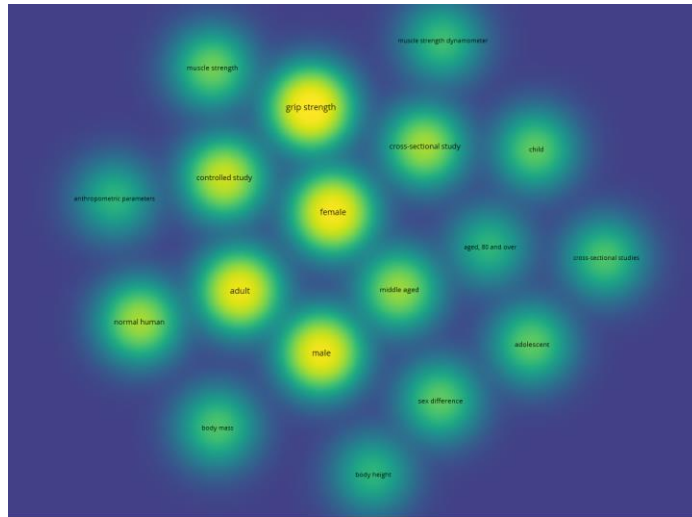


Figura 3. Análisis de densidad palabras claves

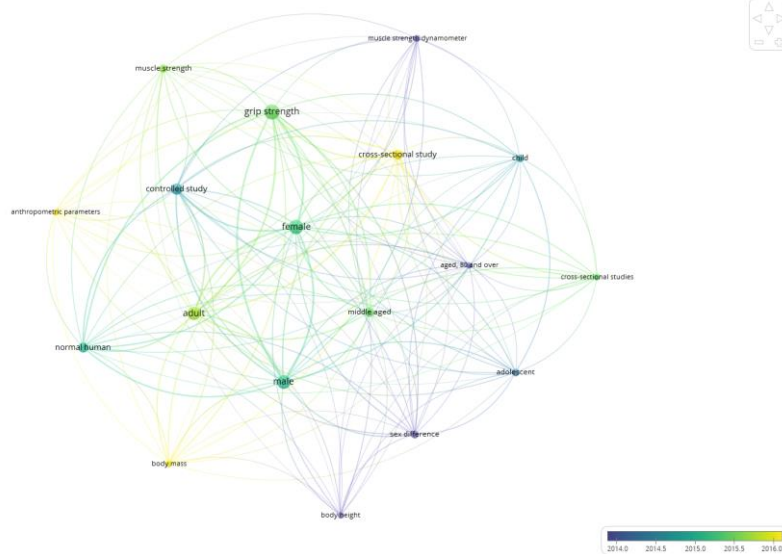


Figura 4. Análisis co-ocurrencia palabras claves por años

3. RESULTADOS

Teniendo en cuenta el método y estrategia empleada para la revisión de literatura sobre la metodología para la medición la fuerza máxima de agarre se realiza una síntesis global para un total de cincuenta y siete (57) artículos que se consideraron relevantes para esta revisión, de los 1832 identificados inicialmente. Mediante la selección de información pertinente de los artículos seleccionados y con el fin de establecer las variables, factores y herramientas adecuadas en la metodología para la toma de mediciones fuerza máxima de agarre, en las tablas 1 y 2 se presenta la síntesis correspondiente. En la Figura 5 se presenta una clasificación global que se realiza en la revisión seleccionada de la literatura.



Figura 5. Clasificación global de la revisión de Literatura

Teniendo en cuenta la clasificación global de los 57 artículos seleccionados se procede a realizar una segmentación de la información registrada en tablas 1 y 2, en las cuales se presentan las características propias y en común de relevancia para cada una de las variables: Población medida, equipo de medición, mano de medición, número de repeticiones y medida tomada para el análisis de datos, como se muestra a continuación.

3.1 Artículos que consideraron medición de fuerza máxima de agarre

En la Tabla 1 se hace un registro total de 45 artículos para la revisión sistemática en relación a la fuerza máxima de agarre, las variables que se consideran en el análisis están agrupadas en: población medida, equipo de medición, mano medida, el número de repeticiones de la medición por cada mano y si registra información sobre la selección de la medida de referencia respecto al número de intentos.

Tabla 35. Artículos relacionados con fuerza máxima de agarre

	Población	Equipo	Mano	Repeticiones	Medida
[7]	105 trabajadores del sector floricultor de Bogotá que no presentaban síntomas osteomusculares de miembros superiores (73 M y 32 H).	Dinamómetro Dynatron®	Ambas	Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[8]	1.798 escolares entre 6 y 15 años. (1.031 varones y 767 mujeres)	Dinamómetro digital 'Takei Ltd.', ajustable y con precisión de 100 g	Ambas	Dos alternandas	Mejor repetición (máx. valor)
[9]	Adultos mayores de 60 años, 22 eran mujeres y 38 hombre	Dinamómetro Baseline, graduado en puntos y kilogramos, cuya tara máxima es de 80 Kg o 120 puntos, con una precisión de 2 kg	Ambas	No registra	No registra
[10]	294 estudiantes universitarios entre 20 y 40 años que no tienen enfermedad aparente			Tres por cada mano	
[11]	Adultos caucásicos sanos en Munich, Alemania, que incluye principalmente áreas urbanas y suburbanas y también áreas rurales		Mano dominante	Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[12]	Estudiantes Universitarios en Colombia	T-18 TTK SMEDLY III® dinamómetro de empuñadura analógica estándar, ajustable	Ambas	Dos alternadas	No registra
[13]	11,073 individuos (10–80 años) de Corea, centro de salud transversal KNHANES			Tres por cada mano	
[14]	55 sujetos de un hospital con diversos diagnósticos, 26 hombres y 29 mujeres.	Dinamómetro de mano no especificado	Ambas	Tres por cada mano	No registra
[15]	51 mujeres posmenopausicas			Dos por cada mano	
[16]	20 personas, 11 H y 9 M entre 18 y 65 años (Texas y New York). Que tuvieran las manos completamente funcionales, sin dolor y con fluidez en inglés			20 mediciones alterando cada 5 de forma consecutiva por cada mano	No registra
[17]	211 voluntarios (128 H y 83 M) entre 18 y 69 con diversas ocupaciones de la ciudad de Estambul			Dos por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)
[18]	Niños y adolescentes sanos entre 4 y 15 años en los países Bajos			Cuatro por cada mano	
[19]	139691 participantes entre 35 y 70 años procedentes de 17 países con ingresos y entornos socioculturales diferentes			Tres por cada mano	No registra
[20]	Se estudiaron 47 varones de 72.3 ± 5.6 años y 69 mujeres 72.4 ± 6.0 años que se dividieron en dos grupos de edad (65-70 y ≥ 71 años)			Tres por cada mano	
[21]	40 adultos jóvenes sanos de 19 a 30 años de edad			No registra	
[22]	Población entre 18 y 80 años	Dinamómetro Hidráulico Jamar	Ambas	Tres por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)
[23]	31 pacientes con CIDP			Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[24]	500 personas en España			Tres por cada mano	No registra
[25]	233 sujetos sanos entre H y M de 60 años o más			Única medición	N/A
[26]	58 voluntarios varones			No registra	Mejor repetición (máx. valor)
[27]	Personas sanas entre los 18-60 años			Tres por cada mano	
[28]	214 voluntarios mayores de 16 años			Dos por cada mano	No registra
[29]	(3317 sujetos) 12 grupos de adultos (20–24, 25–29, 30–34, 35–39, 40–44, 45–49, 50–54, 55–59, 60–64, 65–69, 70–74, 75+ años)			No registra	
[30]	112 participantes, 56 por género			Tres por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)
[31]	32 varones sanos, con edades entre 23 y 39 años		Mano dominante	Tres por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)

	Población	Equipo	Mano	Repeticiones	Medida
[32]	44 jóvenes sanos de una población universitaria			Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[33]	40 voluntarios entre 19 y 22 años			Tres por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)
[34]	150 hombres y mujeres adultos mayores			Única medición	N/A
[35]	49,964 participantes, 26,687 M y 23,277 H, muestra recolectada de 12 estudios de población en Gran Bretaña con cubrimiento de todas las etapas del curso de la vida		11 de Ambas y 1 de mano dominante	De tres a seis por cada mano	No registra
[36]	135 niños sanos de 5 a 9 años	Dinamómetro de mano digital Jamar® Plus +		Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[37]	1366 H y 1312 M mayores de 18 años	Dinamómetro analógico de mano Jamar	Ambas	Tres por cada mano	
[38]	745 voluntarios aparentemente sanos (409 H y 336 M) de 20 a 70 años de Ile-Ife, Nigeria.	Dinamómetro modelo 84466; Takei Kiki		Tres por cada mano	Promedio entre mediciones
[39]	902 adultos aparentemente sanos (478 M y 424 H) mayores de 20 años de la Ciudad de México	Dinamómetro de mano Smedley		Tres	Mejor repetición (máx. valor)
[40]	500 participantes de Santiago, Concepción, Talcahuano, Valparaíso y Viña del Mar. De ambos sexos, de 60 o más años para lo cual se utilizó el diagnóstico de funcionalidad del AM (EFAM-Chile). Se consideró a la persona que tenía un puntaje ≥ 43 puntos	Dinamómetro (Hand Dynamometer T-18; Country Technology)	Mano dominante	Dos	No registra
[41]	25 hombres y 25 mujeres	Dinamómetro hidráulico Enterprises		Seis	No registra
[42]	11 mujeres pertenecientes al área de aseo y cafetería de una empresa de servicios	Dinamómetro análogo Lafayette, rango de 0-100 k y resolución 1 k.		Tres	Mejor repetición (máx. valor)
[43]	30 participantes (15 hombres y 15 mujeres)	Equipo Finger TPS™		Única medición	N/A
[44]	10 hombres sanos (21 \pm 29 años)	Dinamómetro manual Lafayette y banda nylon		Tres por cada mano	No registra
[45]	84 mujeres de 60 a 85 años de edad	Dinamómetro (Kern & Sohn GmbH).		Tres por cada mano	Mejor repetición (máx. valor)
[46]	125 M y 222 H, de 18 a 47 años	dinamómetro de mano Lafayette 78010	Ambas	Cinco por cada mano	No registra
[47]	7 adultos sanos (21-28 años, 177 \pm 5 cm de altura y 74,6 \pm 11 kg de peso corporal)	Electrodos EMG, Flexor Digitorium Superficialis Sensores EMG AM 530		Única medición	N/A
[48]	346 sujetos sanos de entre 5 y 80 años	MyoGrip y Jamar		Dos por cada mano	No registra
[49]	Niños con parálisis cerebral y cuadripléjicos. 23 niños lo cuales fueron 14 varones y 9 mujeres	Dinamometría de mano test-retest		Única medición	N/A
[50]	Adultos sanos (16 H, 29 M), enfermeras, personal paramédico y médicos de Leicester Royal Infirmary, Reino Unido, entre 19-58 años	Analizador de agarre digital (MIE) aleación aeroespacial	Mano no dominante	Dos	No registra

Con base en los datos de la Tabla 1 se puede concluir:

1. Existen varios equipos de medición, para esta revisión se encontró con 26 tipos de equipos de medición entre ellos digitales, análogos, hidráulicos, funcionamiento con sensores, etc. Sin embargo, el *dinamómetro hidráulico Jamar* es el equipo de más recurrencia dentro de la literatura, este representó un 45,65 % (21 Artículos) de concurrencia para la medición en fuerza máxima de agarre entre los 46 artículos seleccionados en esta clasificación.
2. La población de estudio es diversa, esta segmentada al alcance y proyección propio de cada estudio. Es importante resaltar que se evaluó la medición de la fuerza de agarre principalmente a las personas mayores de 18 años, con mayor concurrencia en hombres. En el caso de la población de niños y escolares se caracterizaban por cumplir con condiciones de salud como parálisis cerebral o cuadriplejía ya que se realizan estimaciones en la pérdida de este tipo capacidades físicas. Países como España, Nigeria, Chile, gran Bretaña y Países bajos realizaron la medición para la caracterización en condiciones propias a los habitantes de estos países, sin embargo, la mayoría de los artículos se refiere al estudio experimental y teórico propio hacia el personal segmentado al área laboral: Salud, educación, recreación.
3. Para la medición en fuerza máxima de agarre de cada participante, las manos seleccionadas para la medición se clasifican según su dominancia; o si el estudio optó por realizar mediciones para ambas manos. En la clasificación se encuentra que prevalece el registro de medición para ambas manos en un 69,56% (32 Artículos) de similitud en comparación de si se realizó la medición para la mano dominante que representa un 28,26% (13 Artículos) y en mano no dominante un 2,17% (1 Artículos) en la revisión de los 46 artículos.

4. El número de repeticiones empleadas por medición se realiza desde una única prueba hasta seis (6) pruebas en fuerza máxima de agarre, la literatura no es muy clara para los criterios de selección de la cantidad de medidas y que medida se debe optar para el registro final de la prueba y su posterior análisis. Cabe resaltar, sin embargo, que los 24 artículos que representan el 52,17% de la revisión de la literatura en esta clasificación refieren que la cantidad realizada por mediciones para este tipo de pruebas se ejecutan 3 repeticiones en ambas manos (discriminando la dominancia) y se puede optar por escoger la medida de mayor resultado o el promedio entre las repeticiones realizadas.

Es importante resaltar que en la literatura científica de referencia no registró información sobre la apertura de la empuñadura del dinamómetro (ajuste de las asas del equipo de medición) empleado para cada prueba de fuerza máxima de agarre, a excepción de 3 artículos que registran la siguiente información: ajuste por comodidad al tamaño de agarre para todos los participantes en (9, 18) cm [27], dinamómetro de un palmo ajustable de cinco posiciones de agarre de 35–86 mm (1.375–3.375 pulgadas) en incrementos de 12.7 mm (0.5 pulgadas), para cada participante, de modo que las fuerzas de la punta del dedo del participante se apliquen completamente al mango del dinamómetro [31] y por último lo referido por el autor [20] quien realiza para la prueba : Aperturas de 4,5, 5,0, 5,5, 6,0, 6,5 y 7,0 cm. En donde su criterio se realizó bajo la siguiente suposición: Si la medida del ancho de la mano abierta era < 20 cm, la apertura mayor (7,0) se rechazaba; si, por el contrario, esta medida era > 20 cm, la que se rechazaba era la menor (4,5). Ninguno de los artículos hizo referencia a la hora del día en la que se realizó la medición.

3.2 Artículos que consideraron medición de la fuerza máxima de agarre y fuerza máxima de pinza

En la revisión sistemática global de la literatura se encontraron 11 artículos que relacionan en sus informes la aplicación de pruebas en fuerza máxima de agarre y de pinza de forma paralela, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 36. Artículos relacionados con fuerza máxima de agarre y de pinza

	Población	Equipo	Medición	Repeticiones	Medida
[51]	20 personas capacidad reducida en agarrar, sostener, 18 años o más, Atlanta, sin limitación sensorial	Dinamómetro Jamar	Ambas	Tres por mano	Promedio entre repeticiones
[52]	1232 participantes de 18 a 85 años de edad	Jamar dynamometer	Ambas	Dos por mano	No registra
[53]	Hombres y mujeres sanos de edad de 20 a 69 años 6 Hombres y 6 Mujeres	Dinamómetro de mano Jamar Plus (digital) Lafayette	Ambas	Tres por mano	No registra
[54]	741 estudiantes y 767 mujeres con edades comprendidas entre los 6 y los 19 años	3 dinamómetros hidráulicos de mano Jamar, Engineeringb pizca medidores	Ambas	Tres por mano	No registra
[55]	342 individuos sanos normales con edades 18-60 años	Jamar Dynamometer	Ambas	Tres por mano	No registra
[56]	20 años con un total de 1128 H y 80 M	Medidor de pellizco de Osco y dinamómetro Jamar3.12	Ambas	No registra	No registra
[57]	237 sanos (20-34 años), 154 M y 83 H	Dinamómetro hidráulico de mano Jamar	Ambas	Tres por mano	Promedio entre repeticiones
[58]	199 niños y jóvenes entre 6 y 19 años	Dinamómetro Jamar para palmar, para pellizco se utilizó un Preston Pinch Gauge	Ambas	Tres por mano	No registra
[59]	Grupos de edad de 5 años desde los 20 años hasta los 75 años	La prueba de fuerza de agarre con dinamómetro de mano Jamar Plus (digital) Lafayette, valor inicial de 28 kg. De Pinch Gauge mecánico	Ambas	Tres por mano	No registra
[60]	25 sujetos sanos participaron en este estudio con una edad promedio de 31.9 años (23.2-44.5). Se incluyeron solo sujetos masculinos con la mano derecha dominante.	La fuerza de agarre con dinamómetro hidráulico manual Jamar. Para otras formas de agarre con dinamómetro Pinch Gauge	Ambas	Tres por mano	No registra
[61]	1,609 adultos y ancianos residentes en Rio Branco, Acre, Brasil	Hydraulic hand dynamometer (SAEHAN SH50011)	Ambas	Tres por mano	No registra

La población medida en artículos registrados en la Tabla 2 principalmente se encuentra centrada en niños, jóvenes y adultos que comprenden un rango de edad desde los 5 hasta 35 años como se presenta en 7 artículos, 4 artículos se centran en medir población madura y anciana mayores de 60 años. Los 11 artículos registrados en la Tabla 2 conciden en la aplicación de la prueba de fuerza máxima de agarre con Dinamómetro Jamar sin importar su modelo o tecnología implementada y en realizar la prueba en ambas manos, es decir, sin discriminación por dominancia en el miembro superior, 10 de los artículos refieren 3 repeticiones por cada mano.

Es importante resaltar que la literatura no refiere cuál es el criterio de selección del valor de referencia respecto a las repeticiones, solo 1 artículo refiere que se realiza el promedio entre las repeticiones para el análisis de los datos recolectados en dicha prueba. Ninguno de los artículos hizo referencia a la hora del día en la que se realizó la medición. Con respecto a la postura que adoptaron los participantes en las pruebas, en la Tabla 3 se presenta las utilizadas.

Tabla 3. Postura adoptada por el participante

Clasificación	Postura de medición
[7]	Para la prueba se ubicó al trabajador frente al escritorio del examinador en posición sedente, con los pies apoyados en el piso, hombro de la extremidad a evaluar en flexión de 20 grados, codo en flexión de 70 grados con antebrazos en neutro apoyado sobre la superficie y la muñeca y mano en posición neutra con apoyo del dinamómetro también sobre la superficie.
[8]	El sujeto, de pie y con el brazo extendido paralelamente al tronco, sujetaba el aparato y ejercía la fuerza máxima de presión
[9]	Los datos antropométricos y la dinamometría se determinaron de acuerdo a las técnicas establecidas por la OMS.
[10]	los participantes se encontraban sentados, con el codo a su lado y flexionado en ángulo recto y una posición neutra de la muñeca con el dinamómetro en la posición del mango
[11]	En posición neutra de brazo, antebrazo, y muñeca
[12]	Se midió con el sujeto en una posición de pie con el hombro aducido y con una rotación neutra y los brazos paralelos, pero no en contacto con el cuerpo. El mango del dispositivo se ajustó para adaptarse al tamaño de la mano de los participantes, de modo que el índice de cada mano estuviera a 90° de expresión entre la articulación falangeal proximal y media.
[13]	Los sujetos se mantuvieron erguidos con los hombros en posición neutra, los brazos a los lados y los codos completamente extendidos.
[14]	Acostado a 30° con los codos apoyados, sentado con los codos apoyados a 90° y sentado sin apoyo con los brazos a 90°
[15]	Fueron 15 minutos sentado y el resto parado con la espalda recta, el brazo izquierdo apoyado y el derecho fue apoyado al nivel del corazón y equipado con un dedo fotopleletismografico.
[16]	El participante se sentó cómodamente frente a una computadora y sostuvo el dinamómetro verticalmente en su mano, el codo a su lado y se inclinó a 90°, el antebrazo y la muñeca en posición neutra (es decir, con la palma mirando hacia arriba).
[17]	La posición de prueba se describe como sentado en una silla de respaldo recto con los pies apoyados en el suelo, el hombro aducido y neutral. girado, el codo flexionado a 90, y el antebrazo y la muñeca en neutral posición. En todos los casos, el brazo no fue apoyado por el examinador o por un reposabrazos. Para las medidas de fuerza de agarre, el dinamómetro se presenta verticalmente y en línea con el antebrazo para mantener las posiciones estándar de antebrazo y muñeca.
[18]	El participante está sentado con hombros aducidos y girados neutros, codo flexionado en 90 grados, muñeca entre 0 y 30 grados de extensión, y entre Desviación cubital de 0 y 15 grados. El mango del dispositivo se ajustó al segundo. Puesto para todos, con excepción de 4 y 5 años de edad, para quienes la barra se colocó en la primera posición, y se les permitió apoyar manualmente el brazo.
[19]	No registra
[20]	Los sujetos adoptaron la posición sedente con el brazo aducido, el codo flexionado a 90° y la muñeca neutra. Se sostuvo el dinamómetro en posición II con garra cilíndrica mientras el evaluador lo apoya ligeramente desde la base.
[21]	La fuerza de agarre de la mano se evaluó en tres posiciones cabeza-cuello (neutral, rotación a la izquierda y rotación a la derecha)
[22]	Los datos antropométricos y la dinamometría se determinaron de acuerdo a las técnicas establecidas por la OMS.
[23]	El dinamómetro se colocó en ambas manos y se mantuvo en la esfera con el examen realizado en una posición estandarizada.
[24]	Codo flexionado en 90°, Antebrazo en rotación neutra , Muñeca libre en un sector entre 0° -30° de extensión, Muñeca en unos grados de 0 - 15 grados de desviación cubital
[25]	Los sujetos estaban sentados en posición vertical en una silla con los pies apoyados en el suelo, los hombros aducidos con las manos en rotación y flexión neutras, y los codos flexionados a 90°
[26]	La posición de la mano fue definida por cinco direcciones del ángulo de flexión del hombro (es decir, 0, 45, 90, 130 y 180 en grados), y tres distancias mano-hombro (es decir, 100%, 75%, y 50% del alcance del brazo). Después de agarrar la fuerza máxima, los sujetos calificaron su malestar percibido usando un Escala analógica visual (VAS).
[27]	Los participantes estaban sentados con la espalda, la pelvis y las rodillas lo más cerca posible a los 90 grados. El hombro neutral rota con el codo flexionado a 90 grados, el antebrazo y la muñeca neutra celebrada entre 0 y 15 grados de desviación cubital. El dinamómetro se presentó de forma vertical, en línea con el antebrazo, la mano dominante del participante.
[28]	La Sociedad Americana de Terapeutas de Manos (ASHT, por sus siglas en inglés) recomienda una posición estandarizada: sentado sentado, hombros aducidos y con rotación neutra, codo flexionado a 90°, antebrazo en posición neutra y muñeca entre 0 y 30° de flexión dorsal
[29]	No registra
[30]	Cada sujeto se probó mientras estaba sentado cómodamente en una silla sin reposabrazos, con la espalda apoyada contra la silla; Se indicó a cada sujeto que se sentara con las caderas y las rodillas flexionadas a 90°, los hombros aducidos y con rotación neutra, el codo flexionado a 90°, la rotación del antebrazo a 0°, muñeca entre 0 y 30° de dorsiflexión y entre 0 y 15° de desviación cubital.
[31]	Sentado con espaldar, agarre prono con un ángulo de 90 grados entre en brazo y antebrazo
[32]	Posición estándar, el hombro de prueba está aducido y girado neutralmente, codo flexionado a 90°, antebrazo en punto muerto, y la muñeca en ligera extensión y desviación cubital. Los sujetos sostuvieron el dinamómetro de mano calibrado de 1.4 lb con el dial de lectura de espaldas.
[33]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En la posición sentada, se usó la posición de prueba recomendada por ASHT '. Se le indicó al sujeto que se sentara con el hombro aducido y con rotación neutra, el codo flexionado 90o, el antebrazo en posición media y la muñeca en una extensión de neutro a 30° (la muñeca en posición ligeramente extendida), con una desviación de radio neutra para un rendimiento óptimo en el agarre de potencia ASHT . ▪ En posición supina, se utilizó la misma posición de la extremidad superior, pero el sujeto estaba acostado con el cuerpo alineado (las piernas estiradas y los pies separados). El probador

Fuerza Máxima de Agarre

Clasificación	Postura de medición
	<p>mantuvo el dinamómetro en la base y alrededor del dial de lectura para evitar que se caiga accidentalmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> En la posición prona, se utilizó la misma posición de la extremidad superior, pero el sujeto estaba acostado sobre su abdomen con el antebrazo fuera de la cama. En posición acostada de lado, se usó la misma posición de extremidad superior, pero el sujeto estaba acostado de lado con la mano probada arriba. En posición de pie, se usó la misma posición de extremidad superior, pero el sujeto estaba de pie con el antebrazo sin apoyo.
	[34] No registra
	[35] Se hace toma de datos de los participantes en posición sedente y bípeda
	[36] Los participantes se sentaron en una silla de altura ajustable con los pies apoyados. El brazo evaluado se colocó en una mesa con los hombros ligeramente abducidos (~ 10°) y girados neutralmente, el codo en 90° de flexión, el antebrazo en 0° entre pronación y supinación, y la muñeca en posición de reposo neutral. Los participantes fueron instruidos para mantener esa posición durante la prueba.
	[37] El codo a su lado y flexionado a los ángulos rectos, y una posición neutra de la muñeca, la posición II del asa del dinamómetro y la provisión de soporte debajo del dinamómetro.
	[38] Posición sentada con el hombro aducido y con rotación neutra y codo en flexión de 90° sin desviación radioulnar.
	[39] Los sujetos se colocaron de pie con los brazos extendidos paralelos al tronco, luego tomaron el dinamómetro y aplicaron la máxima fuerza con cada mano sin apoyo.
	[40] Para la medición antropométrica se evaluó el peso, la técnica utilizada fue mediante el uso mínimo de ropa, utilizando una balanza mecánica (SECA, capacidad máxima de 220 kg precisión en 50 g). La estatura se midió con un tallímetro que está incorporado a la balanza, posteriormente se calculó el IMC para categorizar la clasificación ponderal de acuerdo a criterio OMS. La circunferencia de brazo fue medida con cinta métrica flexible e inextensible con una precisión de 0,1 cm. En el punto medio del brazo, con éste colgando al costado del cuerpo, posteriormente se midió el pliegue tricipital. A partir de la circunferencia braquial y el pliegue tricipital se obtuvo el perímetro muscular braquial (PMB), área grasa braquial (AGB) y área muscular braquial (AMB), utilizando las fórmulas de Jeliffe.
	[41] Se utilizó un dinamómetro hidráulico para medir la fuerza de agarre en seis posiciones de prueba con respecto a la muñeca en posición neutral y en extensión. Las seis pruebas de fuerza de agarre consistieron en tres posiciones en las que el codo se mantuvo en extensión completa con diversos grados de flexión del hombro (0,90 y 180 grados) y otras tres. Sólo la mano dominante fue probada. La media más alta. La puntuación de fuerza de agarre se registró cuando con el hombro a 180°.
	[42] *Postura 1. 0° Brazo y antebrazo extendidos paralelos al cuerpo *Postura 2. 0° Antebrazo en ángulo de 90° respecto al brazo *Postura 3. 90° Antebrazo y brazo extendidos paralelos al suelo
	[43] No registra
	[44] Se evaluaron en dos sesiones, con una semana de intervalo entre ellas, por el mismo examinador. para cada músculo, se realizaron 3 contracciones isométricas máximas utilizando el dinamómetro manual Lafayette y una banda de nylon sobre él, fijada al suelo o para la maca, para dar resistencia al movimiento. Para la evaluación del SA, los sujetos fueron colocados en supino, hombro y codo a 90° de flexión; para el TI, ram, colocados en prono, hombro a 120° de abducción y rotación lateral; para el TS, permanecieron sentados con brazos al lado del tronco. El promedio de los picos de la fuerza de cada músculo, por sesión, se utilizó para el cálculo del índice de correlación intraclase.
	[45] Los participantes estaban sentados, con el codo a un lado y flexionados a ángulos rectos, y una posición de muñeca neutral durante 3 s.
	[46] La posición correspondiente fue de pie con el hombro aducido y sosteniendo la parte superior del brazo vertical en el costado, pero sin tocar el cuerpo, mientras que el codo flexionado en la posición flexionada deseada. El codo nivel de flexión (ángulo entre los brazos superior e inferior)
	[47] Los sujetos fueron educados sobre los objetivos de la Experimenta y sus métodos en detalle antes de participar. Dependiendo del ángulo del hombro y el codo, la empuñadura La fuerza podría ser cambiada ya que está formada por múltiples articulaciones, tales como flexión / extensión y pronación / supinación del hombro, Codo y muñeca. Por lo tanto, en el estudio, adjuntamos Los electrodos EMG y luego pidieron a los sujetos que sostuvieran el estándar. Postura recomendada por la American Society of Hand. Terapeutas (ASHT) que es una posición sentada con 0° de Hombro y 90° del ángulo del brazo antes de la evaluación.
	[48] Los sujetos se sentaron en un zócalo ajustable en altura para obtener un ángulo recto en las articulaciones de la cadera, la rodilla y el tobillo, con las piernas verticales y los pies apoyados en el suelo. Los sujetos tenían sus hombros aducidos y su brazo de prueba cerca de su cuerpo, con el codo en extensión completa.
	[49] No registra
	[50] Todas las medidas fueron tomadas en la posición de pie. Inicialmente, la resistencia de agarre máxima se midió con el codo en la posición alterna elegida (90° de flexión o extensión completa) (es decir, de acuerdo con la posición inicial de la prueba en el tema anterior). Si la posición inicial en el sujeto anterior estaba en flexión, entonces la posición inicial en el siguiente sujeto fue elegida como extensión. Este valor se registró en el multianalizador y se evaluó la capacidad del sujeto para mantener una contracción de agarre al 80% del valor máximo
Fuerza Máxima de Agarre y de pinza	[51] <ul style="list-style-type: none"> La fuerza de agarre se midió con el participante sentado con el brazo apoyado sobre una superficie y doblado en un ángulo de 90 grados. Esta posición se eligió ya que se ha demostrado que proporciona mediciones altamente repetibles. Para la medición de la punta del pellizco, se instruyó al usuario a apretar el medidor de pellizco usando la punta del pulgar y la punta del dedo índice. Para la medición de pellizcos clave, se instruyó al usuario a apretar el medidor de pellizco como si estuviera sosteniendo una llave. El medidor de pellizco fue apoyado por el administrador de la prueba para la punta y el pellizco de la llave
	[52] Mientras su brazo está contra su costado y su codo esta doblado a 90°

Clasificación	Postura de medición
[53]	Cada participante se colocó en una posición sentada en la misma silla sin brazos y con respaldo recto. Se les pidió que relajaran sus hombros y doblar sus codos 90 grados. No se ofreció apoyo para los brazos. Siguiendo las recomendaciones de la American Society of Hand Therapy (ASHT), los antebrazos se colocaron en alineación neutral con las muñecas para realizar el agarre y ambas pruebas de pellizco.
[54]	Cada participante se sentó en una silla con sus pies planos en el suelo, hombro aducido neutro, codo flexionado a 90, antebrazo en posición neutral y la muñeca entre 0 y 30 de extensión y 0, 15 ulnar.
[55]	Para medición de fuerza agarre cilíndrico - el sujeto estaba sentado en una posición descansada en una silla con reposabrazos con hombro aducido y rotación neutra con codo flexionado 90°, antebrazo en posición media y muñeca en posición neutral. Se pidió al sujeto que sostuviera la mano dinamómetro para empuñadura cilíndrica donde las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas. Las articulaciones se dejaron flexionar hasta la cantidad a formar.
[56]	No registra
[57]	El participante se encuentra sentado con el hombro aducido, el codo flexionado a 90, el antebrazo en una posición neutral, y la muñeca entre 0 y 30 dorsiflexión, al evaluar el agarre y las fuerzas de pellizco con el dinamómetro o el indicador de presión como se indica en el protocolo ASHT.
[58]	El participante realizó la prueba sentado en una silla sin apoyabrazos, con los pies apoyados completamente en el suelo y cadera contra el respaldo de la silla, el brazo se mantuvo paralelo a el cuerpo, se realizaron tres mediciones consecutivas de las manos para fuerza de agarre y pinche, alternando entre el lados dominantes y no dominantes
[59]	Se les pidió que relajaran los hombros y doblaran los codos 90 grados. No se ofreció apoyo para los brazos. Siguiendo las recomendaciones de la American Society of Hand Therapy (ASHT), los antebrazos se colocaron en alineación neutral con las muñecas ligeramente extendidas para realizar el agarre y ambas pruebas de pellizco
[60]	Se realizó un agarre de trípode como un agarre entre la falange distal del pulgar y las almohadillas voladoras terminales de los dedos índice y medio. Para la fuerza de pellizco clave, el dinamómetro de presión se mantuvo entre el lado radial de la falange proximal del índice y la punta del pulgar.
[61]	Las mediciones se obtuvieron en condiciones estandarizadas, con los participantes en posición sentada, codo a 90°, manija ajustada a la segunda posición y después de recibir una explicación sobre los procedimientos y después de familiarizarse con el instrumento, deben aplicar la fuerza de agarre máxima durante 3 a 5 segundos

En su mayoría en los artículos revisados los autores registran en la metodología para la medición de fuerza máxima de agarre la postura recomendada por Sociedad Americana de Terapeutas de Manos (ASHT, por sus siglas en inglés), la cual indica una posición estandarizada, de la siguiente forma: el participante debe estar sentado, con hombros aducidos y con rotación neutral, codo flexionado a 90°, antebrazo en posición neutral y muñeca entre 0 y 30° de flexión dorsal. La postura permite una prueba segura, confortable y adecuada, así mismo, lo autores citados en esta revisión de literatura encontraron relación entre la postura y el equipo de medición, indicando que la combinación de la postura de la ASHT y el Dinamómetro de mano Jamar permite que las pruebas no presenten variaciones significativas en el protocolo de medición establecido por cada estudio.

Los artículos que presentan una variación, sin la estandarización de la postura indicada por ASHT, realizan la ejecución de la prueba de dinamometría de mano para la fuerza máxima de agarre y de pinza con el fin de comprobar desde otras posturas indicadas al participante cuál es la más adecuada o pertinente según el alcance propio de cada estudio.

3.3 Protocolo para la medición de la máxima fuerza de agarre

Resultado de la revisión de literatura, se propone como metodología estandarizada para la valoración de la fuerza máxima de agarre el siguiente protocolo (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros protocolo propuesto para la medición de fuerza máxima de agarre

Parámetro	Descripción
Tipo de Valoración	Máxima fuerza isométrica de los músculos flexores de las manos
Equipo de Medición	Dinamómetro de mano marca Jamar
Desplazamiento del asa de agarre	Se ajustará el asa de agarre en a la posición número 2 del dinamómetro. En el caso que las mujeres no se sientan cómodas con el alcance del ASA es posible cambiarlo al número 1. En el caso que los hombres no se sientan cómodos con el alcance del ASA es posible cambiarlo al número 3.
Duración del esfuerzo (Tiempo de fuerza aplicado al dinamómetro)	3 a 5 segundos
Número de intentos para registrar el máximo valor de la fuerza de agarre	Por cada participante y actividad de registro de datos, se debe realizar tres (3) mediciones. Las mediciones se realizan de forma consecutiva en la misma mano respetando el tiempo de descanso entre cada intento.
Medida de referencia respecto a los intentos	Si la diferencia de los datos obtenidos en los tres (3) intentos está dentro de un rango de 10%, se toma el valor promedio como agarre máximo, si no debe repetirse el experimento
Tiempo de descanso entre cada intento	Para registrar el valor adecuado al desarrollar fuerza de agarre, se debe permitir un tiempo de descanso entre cada intento de 5 - 10 segundos.

Parámetro	Descripción
Postura del participante	Para registrar el mayor valor de fuerza máxima de agarre se utilizará la postura recomendada por la American Society of Hand Therapists (ASHT). La persona debe estar sentada en una silla con soporte lumbar con la cintura y las rodillas en ángulo de flexión de 90°, tener los pies apoyados en el piso, debe tener los hombros en 0° de rotación paralelo al tronco, el codo debe estar flexionado a 90° grados sin soporte y el antebrazo en una posición neutra, la muñeca puede estar entre 0° y 30° de supinación, pero se recomienda estar en posición neutra
Mano a medir	Mano Derecha y mano izquierda, identificando la dominancia.
Características de la población a medir	<i>Edad:</i> Depende de los intereses de la investigación, se puede considerar poblaciones de todos los rangos de edad. <i>Sexo:</i> Mujeres y Hombres <i>Criterios de exclusión:</i> No referir diagnósticos ni antecedentes de DME de miembro superior. No pertenecer a fuerzas militares o policiales, ni a actividades laborales en las que se ejercite la fuerza de los miembros superiores. No realizar actividades de fisiculturismo o deportivas con énfasis a ejercitar los miembros superiores.
Hora de medición	Indiferente. En caso que la valoración de la fuerza de agarre se realice con intención de evaluar fatiga, se debe establecer un horario específico para la medición.

4. CONCLUSIONES

La revisión de literatura expuesta permitió evidenciar la diversidad de técnicas, equipos y protocolos de medición de la fuerza máxima de agarre utilizados en estudios de los años 2010 a 2019, a través del análisis de 57 artículos resultantes de la búsqueda de literatura en las Bases de datos Scopus, Science Direct y Google académico.

La síntesis de la información permite concluir que un protocolo de medición de la fuerza de agarre debe considerar siempre de forma clara y específica determinados parámetros de medición, y otros pueden ser adaptables de acuerdo con los intereses de las investigaciones. Con referencia a los hallazgos de la literatura, se estableció un protocolo de medición estandarizado de la fuerza máxima de agarre que considera las conclusiones significativas de los estudios revisados, que considera los siguientes parámetros: tipo de valoración, equipo de medición, desplazamiento del asa de agarre, duración del esfuerzo, número de intentos para registrar el máximo valor de la fuerza de agarre, medida de referencia respecto a los intentos, tiempo de descanso entre cada intento, postura que debe adoptar el participante, mano a medir, características de la población a medir (edad, sexo y criterios de inclusión) y hora de medición.

El protocolo propuesto sirve como referencia para la valoración de fuerza de agarre y como un modelo estandarizado que puede ser utilizado en futuras investigaciones y facilita la comparación de los resultados entre poblaciones con distintas características.

REFERENCIAS

- [1] S. Pheasant y C. M. Haslegrave, *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, vol. II, Palm Beach, Florida: Taylor & Francis, 2014.
- [2] ISO, «ISO 7250: Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico», Ginebra, 2017.
- [3] ISO, «ISO 14738: Safety of machinery. Anthropometric requirements for the design of workstations at machinery», 2012.
- [4] NIOSH, «Datos breves de Niosh: cómo prevenir los trastornos musculoesqueléticos», Madrid, 2015.
- [5] Ministerio Del Trabajo, «Informe ejecutivo de la segunda encuesta nacional de condiciones de seguridad y salud en el trabajo en el Sistema general de riesgos laborales de Colombia», Grafiq Editores S.A.S, Bogotá, 2013.
- [6] INSHT, *Herramientas manuales: Criterios ergonómicos y de seguridad para su selección*, Madrid: Docu. Divulgativos, 2016.
- [7] M. E. Leyva Zuñiga, A. Pérez Villamor y L. A. Rodríguez Muñoz, «Dinamometría como examen predictor de desordenes musculoesqueléticos (DME) de miembros superiores en trabajadores del sector floricultor», Bogotá, 2006.
- [8] M. López García, M. González Moreno, J. F. Romero Collazos, C. Prado Martínez, N. López Ejeda, A. Villarino Marín y M. D. Madorrán Serrano, «Referencias para dinamometría manual en función de la estatura en edad pediátrica y adolescente», *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria*, vol. 37, nº 4, pp. 135-139, 2017.
- [9] J. L. Pino V, M. A. Mardones H y C. & Díaz H, «Relación entre la dinamometría de mano y la circunferencia de pantorrilla con el índice de masa corporal en ancianos autovalentes», *Revista Chilena de Nutrición*, vol. 38, nº 1, pp. 23-29, 2011.
- [10] C. H. Gonzalez Correa, L. E. Sepúlveda Gallego y L. R. Santafé Sánchez, «Different reference values for hand dynamometry: a conflicting issue», *Nutrición clínica y dietética hospitalaria*, vol. 37, nº 3, pp. 104-110, 2017.
- [11] C. M. M. Günther, A. M. Bürger, M. M. Rickert, A. M. Crispin y C. U. M. Schulz, «Grip Strength in Healthy Caucasian Adults: Reference Values», *Journal of Hand Surgery*, vol. 33, nº 4, pp. 558-565, 2008.
- [12] J. A. Vivas Díaz, R. Ramírez Vélez, J. E. Correa Bautista y M. Izquierdo, «Handgrip strength of Colombian university students», *Nutrición hospitalaria*, vol. 33, nº 2, pp. 330-336, 2016.
- [13] K. Miji, W. Chang y K. Maengkyu, «Muscular grip strength normative values for a korean population from the korea national health and nutrition examination survey, 2014–2015», *Plos One*, vol. 13, nº 8, 2018.
- [14] Y. Yaginuma, A. Takashi, R. S. Thiebaud, T. Kitamura, M. Kawanishi y T. Fukunaga, «Can Handgrip Strength Improve Following», *BioResearch*, vol. 6, nº 1, 2017.
- [15] D. C. Bentley y T. Scott Gordon, «Maximal intermittent handgrip strategy: design and evaluation of an exercise protocol and a grip tool», *Clinical Interventions in Aging*, vol. 11, pp. 589-601, 2016.
- [16] A. M. Jensen, R. J. Stevens y A. J. Burls, «Muscle testing for lie detection: Grip strength dynamometry is inadequate», *Elsevier*, vol. 17, pp. 16-21, 2018.
- [17] A. Mahmut Eks, «Normative static grip strength of population of Turkey, effects of various factors and a comparison with international norms», *Elsevier*, vol. 52, pp. 8-17, 2016.

- [18] J. J. Ploegmakers, A. M. Hepping, J. H. Geertzen, S. K. Bulstra y M. tevens, «Grip strength is strongly associated with height, weight and gender in childhood: A cross sectional study of 2241 children and adolescents providing reference values,» *Journal of Physiotherapy*, vol. 59, n° 4, pp. 255-261, 2013.
- [19] D. P. Leong, K. K Teo, S. Rangarajan, P. Lopez Jaramillo, A. Avezum Jr, A. Orlandini, P. Seron, S. H. Ahmed, A. Rosengren, R. Kelishadi, Rahman, S. Swaminathan, R. Iqbal, R. Gupta y S. A. Lear, «Prognostic value of grip strength: Findings from the prospective urban rural epidemiology (PURE) study,» *TheLancet*, vol. 386, pp. 266-273, 2015.
- [20] J. Oteoa, P. Benaventea y M. Garzón, «Valores normativos de la fuerza de puño en la población española en edad laboral. Influencia de las variables antropométricas de la mano y el antebrazo,» *Elsevier*, vol. 43, n° 2, pp. 104-110, 2015.
- [21] Z. Hamayun, A. Ahma y A. Shahnawaz, «Effects of Head-Neck Positions on the Hand Grip Strength in Healthy Young Adults: A Cross-Sectional Study,» *BioMed Research International*, pp. 1-5, 2018.
- [22] A. M. P. Bertrand, K. M. Fournier OT, W. Brasey OT, M.-G. M. Kaiser OT, M.-L. P. Frischknecht, R. MD y K. M. Diserens, «Reliability of maximal grip strength measurements and grip strength recovery following a stroke,» *Journal Hand Therapy*, vol. 28, n° 4, pp. 356-363, 2015.
- [23] Y. A. Rajabally y M. Narasimhan, «Jamar hand-held grip dynamometry in chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy,» *Elsevier*, vol. 325, pp. 26-38, 2013.
- [24] M. M. Mayordomo, «Análisis dinamométrico de la mano: valores normativos en la población española,» Madrid, 2011.
- [25] S. Ita, J. Mat, L. Kai, Chan, M. K. Austin Loke, S. A. Rahim y C. T. Shian, «Normative data on functional grip strength of elderly in Singapore».
- [26] Y. Ku Kong, Y. Woong Song, M. Chul Jung y I. Lee, «Effects of hand position on maximum grip strength and discomfort,» de *HFESA 47th Annual Conference 2011. Ergonomics*, Sidney , 2011.
- [27] L. C. Nacul, K. M. Kingdon, C. C, T. G. Clark y E. Mattos Lacerda, «Hand Grip Strength as a Clinical Biomarker for ME/CFS and Disease Severity,» *Frontieres in Neurology*, vol. 9, n° 992, 2018.
- [28] H. C. Roberts, H. Denison, H. Martin, H. Patel, H. Syddall, C. Cooper y A. Sayer, «A review of the measurement of grip strength in clinical and epidemiological studies: towards a standardised approach,» *Oxford University Press on behalf of the British Geriatrics Society*, pp. 1-7, 2011.
- [29] R. W. Bohannon, A. Peolsson, N. M. Westropp, J. Desrosiers y J. B. Lehman, «Reference values for adult grip strength measured with a Jamar dynamometer: a descriptive meta-analysis,» *Elsevier*, vol. 92, pp. 11-15, 2006.
- [30] N. Shahida, S. Zawiah y K. Case, «The relationship between anthropometry and hand grip strength among elderly Malaysians,» *Elsevier*, vol. 50, pp. 17-25, 2015.
- [31] M. Z. Ramadan, «The Effects of Industrial Protective Gloves and Hand Skin Temperatures on Hand Grip Strength and Discomfort Rating,» *Environmental research and public Health*, 2017.
- [32] A. Molouki, S. M. Hosseini, M. Rustae y S. Tabataee, «The Immediate Effects of Manual Massage of Forearm on Power-Grip Strength and Endurance in Healthy Young Men,» *Elsevier*, vol. 15, pp. 112-120, 2016.
- [33] E.-S. Walaa y M. Walaa, « Influence of different testing postures on hand grip strength,» *Euro. Scientific Jour.*, vol. 10, 2014.
- [34] J. Porto, A. Midori, L. Mendes, R. Freire, S. Spilla y D. Carvalho de Abreu, «Relationship between grip strength and global muscle strength in,» *Relationship between grip strength and global muscle strength in*, vol. 82, pp. 273-278, Elsevier.
- [35] R. Dodd, H. Syddall, R. Cooper, M. Benzeval, I. Deary, E. Dennison, G. Der, C. Gale, H. Inskip, C. Jagger, T. Kirkwood, D. Lawlor, S. Robinson, J. Sarr, A. Steptoe y K. Tilling, «Grip Strength across the Life Course: Normative Data from Twelve British Studies,» *Plos One*, vol. 9, n° 12, 2014.
- [36] J. Gasior, M. Pawlowski, C. Williams, M. Dabrowski y E. Rameckers, «Assessment of maximal isometric hand grip strength in school-aged children,» *De Gruyter*, vol. 13, pp. 22-28, 2017.
- [37] N. Westropp-Massy, T. Gill, A. Taylor, r. Bohannon y C. Hill, «Hand Grip Strength: age and gender stratified normative data in a population-based study,» *BMC research Notes* , vol. 4, n° 127, 2011.
- [38] r. Adedoyin, F. Ogundapo, C. Mbada, B. Adekanla, O. Johnson, T. Onigbinde y A. Emechete, «29 Reference Values for Handgrip Strength Among Healthy Adults in Nigeria,» *Hong Kong Physiother*, vol. 24, n° 27, pp. 21-29, 2009.
- [39] W. Rodriguez, L. Castañeda, a. M. V. Orea, D. Gonzales, C. Díaz y L. Castillo, «Handgrip strength. Reference values and its relationship with bioimpedance and anthropometric variables,» *Clinical Nutrition EsPEN*, vol. 19, pp. 54-58, 2017.
- [40] S. Agüero, J. Fuentes y A. Vásquez, «Dinamometría, masa muscular y masa grasa braquial en adultos moyes autovalentes,» *ESp Nutrición Comunitaria*, vol. 23, n° 4, 2017.
- [41] V. Parvatikat y P. Mukkanavar, «Comparative Study of Grip Strength in Different Positions of Shoulder and Elbow with Wrist in Neutral and Extension Positions,» *Journal of exercise Science and Physiotherapy*, vol. 5, n° 2, pp. 67-75, 2009.
- [42] C. R. Zea y M. Q. L. Caro, «Análisis de la disminución de fuerza de agarre en la mano por uso de guante en actividades de aseo y cafetería,» *Ciencias de la Salud*, vol. 14, pp. 27-43, 2016.
- [43] Á. Valencia, M. Maradei y F. Espinel, «Estudio sobre la influencia del diámetro de apertura en la fuerza ejercida por cada dedo,» *Salud Pública*, vol. 18, n° 6, pp. 935-945, 2016.
- [44] B. Oliveira, T. Siquiera, M. Ramos, L. Carnaz, F. Serrao y G. Zanca, «Avaliação da força dos músculos escapulares utilizando dinamometria manual com faixas para resistência - confiabilidade entre sessões,» *Salusvita*, 2016.
- [45] L. Barrera, G. Muscogiuri, C. Di Somma, G. Tromontano, V. De Luca, M. Illario, A. Colao y S. Savastano, «Association between Mediterranean diet and hand grip strength in older adult women,» *Clinical Nutrition*, vol. 38, pp. 721-729, 2019.
- [46] F. Tayyari, «Effects of Elbow Flexion on the Hand-Grip Strength,» *Medwin Publishers*, vol. 2, n° 1, 2018.
- [47] S. Wook Shin y S.-T. Chung, «Evaluation of Hand Grip Strength and EMG Signal on Visual Reaction,» *Biomedical and Biological Engineering*, vol. 8, n° 7, 2014.
- [48] J.-Y. Hogrel, «Grip strength measured by high precision dynamometry in healthy subjects from 5 to 80 years,» *Hogrel BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 16, n° 139, 2015.
- [49] J. Crompton, M. Galea y B. Phillips, «Hand-held dynamometry for muscle strength measurement in children with cerebral palsy,» *Medicine & Child Neurology*, vol. 49, pp. 106-111, 2007.
- [50] K. Shyam, V. Parmar, S. Ahmend, S. Kar y W. Harper, «A study of grip endurance and strength in different elbow positions,» *Orthopaed Traumatol*, vol. 9, pp. 209-211, 2008.
- [51] Y. M. Choi, «Comparison of Grip and Pinch Strength in Adults with Dexterity Limitations to Normative Values,» *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 5326- 5333, 2015.

- [52] Y. Wang, R. Bohannon, X. Li, B. Sindhu y J. Kapellusch, «Hand-Grip Strength: Normative Reference Values and Equations for Individuals 18 to 85 Years of Age Residing in the United States,» *Orthopaedic & sports physical therapy*, vol. 48, n° 9, 2018.
- [53] C. Larson y Y. Zhan, «Development of an updated normative data table for hand grip and pinch strength: A pilot study,» *Computers in Biology and Medicine*, vol. 86, pp. 40-46, 2017.
- [54] V. McQuiddy, C. Scheerer, R. Lavalley y T. L. McGrath, «Normative Values for Grip and Pinch Strength for 6- to 19-Year-Olds,» *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 96, pp. 1627-1633, 2015.
- [55] D. Sorani y S. Rathod, «Reference values of Grip strength by Hand Held Dynamometer in Gujarati Population,» *Government Physiotherapy College*, vol. 10, n° 1, 2019.
- [56] V. Mathiowetz, N. Kashman, G. Volland, K. Weber, M. Dowe y S. Rogers, «Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults,» *Occupational Therapy Program*, vol. 66, pp. 69-72, 1985.
- [57] E. Fain y C. Weatherford, «Comparative study of millennials' (age 20-34 years) grip and lateral pinch with the norms,» *Journal of Hand Therapy*, vol. 29, pp. 483-488, 2016.
- [58] A. Campos, A. Shimano, N. Mazzer, C. Barbieri, V. Carril y M. d. C. Registro, «Grip and pinch strength in healthy children and adolescents» *Acta Ortop Bras.*, vol. 19, n° 2, pp. 92-97, 2011.
- [59] F. Rojas, L. Chiroso, C. Vergara, J. Fuentes, F. Delgado y M. Valderrama, «Fuerza prensil de mano y su asociación con la edad, género y dominancia de extremidad superior en adultos mayores autovalentes insertos en la comunidad. Un estudio exploratorio,» *Medicina Chile*, vol. 143, pp. 995-1000, 2015.
- [60] N. Wachter, M. Mentzel, G. Krischak y J. Gülke, «Quantification of hand function by power grip and pinch strength force measurements in ulnar nerve lesion simulated by ulnar nerve block,» *Journal of Hand Therapy*, vol. 31, pp. 524-529, 2018.
- [61] C. Amaral, T. Maciel, G. Torres, R. Monteiro, M. Leite y M. Portela, «Hand grip strength: Reference values for adults and elderly people of Rio Branco, Acre, Brazil,» *Plos One*, vol. 14, n° 1, 2019.

Diseño de un brazo robótico con propósitos educativos: Una experiencia formativa

Juan D. Rivera T.¹

Carlos W. Sánchez²

John E. Ordoñez Ñ.³

Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium – Colombia

En los últimos años tanto en escuelas como en universidades ha sido ampliamente difundido el uso de tecnologías relacionadas con la automatización y la robótica. Adicionalmente, ha demostrado ser un gestor de estímulo investigativo en los niños, adolescentes y jóvenes, siendo catedra obligada en las instituciones de educación superior que tienen carreras de ingeniería, relacionadas con esta temática, a nivel nacional e internacional. La Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium (UNICATÓLICA), es una institución de formación superior de amplio crecimiento en los últimos años, con un especial énfasis en la formación tecnológica y profesional en el área de la ingeniería industrial y de sistemas que viene haciendo grandes esfuerzos en la preparación de los estudiantes con herramientas tecnológicas vanguardistas que posicionen al egresado en el sector laboral con competencias en estas áreas sin descuidar la formación en valores humanos. Con el propósito de brindar elementos de apoyo en la estructuración de los estudiantes acercándolos a los ambientes productivos donde la manufactura avanzada presenta un papel preponderante se plantea este trabajo cuyo propósito es el de diseñar un brazo robótico que pudiera ser usado como herramienta de apoyo en el aula de clase brindando al docente un instrumento automatizado a manera de ejemplo de los ambientes de producción modernos. El brazo *Robotic Arm for Classroom Support* (RACSu), permitiría que los estudiantes de ingeniería industrial y de sistemas dentro de UNICATÓLICA dispongan de una herramienta robótica para brindar experiencia real en su manejo y en su participación en un ambiente productivo simulado, a la vez que abre nuevas posibilidades de formación en la automatización de procesos base de la manufactura avanzada. Para su desarrollo se consideraron los requerimientos logísticos de la institución, así como los requerimientos académicos a partir de un análisis de currículo que permitiera ofrecer la mejor solución acorde a los recursos disponibles para el desarrollo. El proyecto se desarrolló mediante una metodología por fases donde varias de estas usaron la metodología de prototipado para su desarrollo.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica en la educación se ha convertido en un factor clave para la motivación de niños y jóvenes en las escuelas y universidades, esto se debe a que, según estudios de algunas de las universidades más importantes del mundo, tales como el Instituto Técnico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés), la Universidad de Stanford, entre otras, los estudiantes logran beneficios cognitivos al estructurar programas, secuencias, patrones y comandos, por lo cual, se genera una necesidad de implementar este tipo de herramientas en el aula de clase con el fin de brindar a los estudiantes la posibilidad de adquirir estos beneficios [1, 2].

Actualmente en Colombia se llevan a cabo foros y conferencias donde los docentes y tutores abordan temas acerca de tecnología, programación informática y robótica educativa con el fin de compartir y analizar las experiencias exitosas con respecto a estos temas dentro del aula de clase [3,4]. En el caso del departamento del Valle del Cauca, diversas instituciones educativas han implementado en sus instalaciones una o más tecnologías robóticas con el propósito de que los estudiantes tengan un acercamiento a estas áreas del conocimiento y de paso, adquieran experiencias en el manejo de estos dispositivos, puesto que, además de mejorar la oferta tecnológica ofrecida en la institución, mejora las competencias tanto educativas como laborales de los estudiantes, tal cual es el caso de un grupo de aprendices del Centro de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN), quienes, gracias a su dedicación con respecto a cursos ligados con la robótica, participaron en el campeonato mundial *VEX Robotics Competition In The Zone*, representando a Colombia y logrando posicionarse en el puesto 37 entre 200 participantes de universidades del resto del mundo [5-7].

Con el fin de suplir esta necesidad cada vez más presente, UNICATÓLICA optó por insertar como herramienta tecnológica equipos ampliamente conocidos y predispuestos para el aprendizaje como lo son los LEGO de la serie *MINDSTORMS EV3*. Estos equipos brindarían una respuesta parcial a esta necesidad debido a que, estos dispositivos presentan flexibilidad en cuanto a la posibilidad de construir diferentes tipos de máquinas automatizadas, con variables de programación, versatilidad en el diseño de programa y una posibilidad parcial de generar algunas variantes a los diseños preestablecidos.

Sin embargo, no deja de ser un producto orientado hacia un público más joven que el ámbito universitario sin tener el enfoque empresarial que requiere una institución educativa. Adicionalmente, para complementar el aprendizaje de los estudiantes se adquirió un conjunto de maquetas de simulación de procesos productivos de la línea *Fischer Technik education*, la cual es más acorde a lo requerido en los procesos de formación de los estudiantes de ingeniería industrial con una proyección hacia la industria 4.0, la cual es empleada por diferentes instituciones educativas para el aprendizaje de sus estudiantes [8]. Esta herramienta permite analizar en un entorno simulado métodos de optimización de sistemas, pero constituye un sistema cerrado y poco flexible que no permite al estudiante innovar de forma significativa.

¹ juandavidr9603@gmail.com

² csanchez@unicatolica.edu.co

³ jordonex@unicatolica.edu.co

No obstante, surge la inquietud acerca de la implementación de un proceso automatizado que permita el ajuste de parámetros y una puesta a punto del sistema que conlleve la formación de estudiantes, puesto que, los equipos adquiridos vienen pre-ensamblados y son muy específicos. Esta es la razón del planteamiento de este trabajo, el cual consiste en disponer de un dispositivo como herramienta de apoyo en la enseñanza de procesos productivos, concretamente que permita simular un proceso industrial que pueda ser creado desde cero, automatizarlo y optimizarlo. También, permite al estudiante acercarse aún más a la experiencia real de trabajar en entornos automatizados que involucren brazos robóticos por ejemplo en la implementación de este en una línea de producción.

2. MÉTODO

La investigación se realizó mediante una metodología por fases, en primer lugar, se ubica la etapa de investigación de conceptos teóricos, en la cual, se realizó una búsqueda de fuentes de información y conocimiento que permitieron, junto con el levantamiento de requerimientos del sistema, poder escoger el modelo base del cual se partiría para el diseño del brazo que se adecue al contexto académico y locativo de UNICATÓLICA.

En la segunda fase, una vez considerando los requerimientos dados por UNICATÓLICA, se escogió un modelo disponible como hardware libre bajo la licencia *Creative Commons* (Atribución – Compartir igual) [9-12], con el fin de disminuir costos en cuanto a licencias y además que se tuviera un punto de partida. En esta fase se trabajó mediante la metodología de desarrollo evolutivo o prototipado [13], que se esquematiza en la Figura 1, donde se observa que partiendo de una comunicación con el cliente (UNICATÓLICA) se llegan a acuerdos con el desarrollo del trabajo, esto conduce a un plan rápido de desarrollo lo que conlleva un proceso de diseño la construcción de un prototipo que será sometido al cumplimiento de los requerimientos, lo que genera de nuevo una comunicación con el cliente que reinicia el ciclo hasta finalizar con un prototipo depurado. En este caso, esta metodología permitió tener resultados con una mayor brevedad de tiempo. Posteriormente, se dispuso de un prototipo de esta versión, se hizo un análisis de la funcionalidad del mismo, lo que condujo a la creación del primer prototipo que después de ser probada dio origen a tres prototipos más, en cada caso se definieron los ajustes necesarios en el diseño.

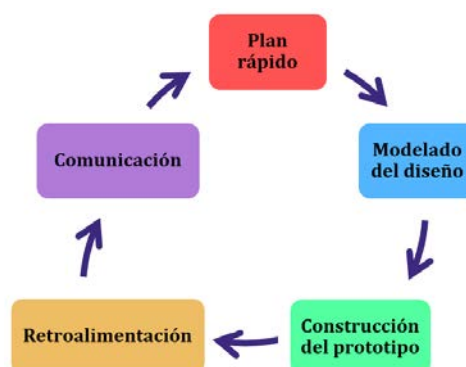


Figura 36. Esquema de la metodología de desarrollo evolutivo

Las construcciones de los prototipos del brazo robótico permitieron validar el diseño al ejecutar las pruebas necesarias para comprobar la funcionalidad del mismo, obteniéndose resultados parciales para poder realizar las mejoras pertinentes al sistema que, posteriormente permitieron obtener el diseño del prototipo final. En la última etapa, se realizó la validación del brazo como herramienta de apoyo en el aula de clase evaluando además la viabilidad de implementación en el laboratorio de ingeniería industrial de UNICATÓLICA, confrontando los requerimientos impuestos al proyecto en la primera fase de este.

3. RESULTADOS

3.1 Requerimientos del Sistema

Con el propósito de seleccionar un tipo de brazo robótico, se especifican a continuación, los requerimientos operativos del mismo necesarios para que el dispositivo pueda ser implementado en las instalaciones de UNICATÓLICA, donde actualmente se encuentra el laboratorio de ingeniería industrial. En la Figura 2(a), se observa este espacio de trabajo que tiene como dimensiones 7 m de ancho por 9 m de largo aproximadamente. El laboratorio cuenta con 6 mesas de 1 m de ancho por 2.5 m de largo, las cuales, presentan una capacidad de carga de hasta 300 kg, por lo cual, el brazo robótico no debe superar estas dimensiones.

Además, cada mesa conlleva 5 sillas, por lo que, en el espacio pueden desempeñar labores hasta 30 estudiantes por sesión de trabajo. También, todas las mesas disponen de tomacorrientes de acceso al sistema eléctrico, los cuales pueden brindar hasta 110 V a 20 A, por lo que, el brazo robótico podría ser conectado directamente a la toma. Es importante tener en cuenta que luego de ser utilizado, el brazo robótico requerirá de un proceso de almacenamiento

por lo que no debería superar los 25 kg de peso, que es el valor límite que una persona no debe manipular de acuerdo con la aseguradora de riesgos profesionales contratada por UNICATÓLICA. [14, 15] Además, se cuenta con equipos y periféricos que pueden en un determinado momento usarse como partes activas del proceso a manera de productos como se muestra en la Figura 2(b). Además, se cuenta con equipos y periféricos que pueden en un determinado momento usarse como partes activas de un proceso a manera de productos, este es el caso de piezas lego entre otras, ver Figura 2(b), que deberían poder integrarse con el brazo en prácticas establecidas.

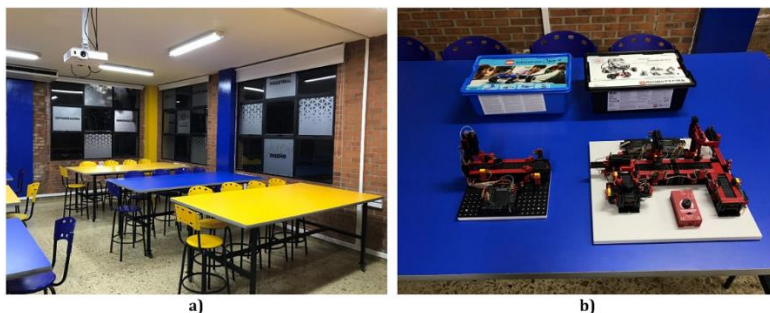


Figura 37. a) Laboratorio de Ingeniería Industrial, b) Equipos y periféricos disponibles en UNICATÓLICA

UNICATÓLICA en su carrera de ingeniería industrial imparte cátedras como “Lógica Computacional y Programación”, “Ingeniería de Métodos”, “Programación y Control de la Producción”, “Modelación y Simulación” entre otras que podrían integrarse y beneficiarse de prácticas de laboratorio con el sistema robótico a desarrollar, de manera que se conecte a los estudiantes con técnicas de manufactura avanzada, permitiendo dinamismo en la implementación de las mismas, así como, la propuesta de desarrollos futuros que mantengan vigente el sistema. Es decir, se debe disponer de una herramienta escalable, fácil de operar e implementar en un proceso productivo y fácil de mantener, de esta forma impacta no solo estas asignaturas sino otras como el “Diseño asistido por computadora”, donde se pueden explorar desarrollos que puedan implementarse en el sistema robótico como pinzas, extensiones, nuevas bases, entre otros.

Por lo anterior, se hace necesaria la búsqueda de un brazo robótico que presente un área de trabajo no mayor al ancho de la mesa, respetando el espacio de los estudiantes, que debe estar demarcado con seguridad y que, en su defecto, pueda movilizar masas variables de hasta 100 g, muy por encima de lo requerido en un ejercicio con legos, con el fin de que se pueda simular diversos procesos productivos dentro del espacio definido brindando elementos de práctica y evaluación a asignaturas impartidas en la institución.

3.2 Diseño del sistema

Tras una revisión bibliográfica y consultas a sitios web, se escogió un diseño base existente bajo la licencia *creative commons* (Atribución – Compartir igual) y se analizan sus características generales evaluando la pertenencia para los objetivos trazados en el desarrollo de este trabajo. Una vez escogido el diseño, se desarrolla el plano digital de las piezas del brazo en un software de diseño asistido por computador (CAD por sus siglas en inglés), de manera que se dispusiera de una base de diseño que pudiese ser mejorada sistemáticamente. La dinámica y cinemática de este modelo fueron simuladas en el ordenador, lo que ofreció una vista del acople de las partes del mismo observándose en este inconveniente de diseño que fueron abordados en el desarrollo del primer prototipo con aportes al diseño por el grupo de trabajo.

Con la herramienta CAD y haciendo uso de la tecnología de corte Láser e impresión 3D se ajustaron los prototipos hasta tener cuatro versiones del brazo que evolucionaron de uno fabricado de acrílico, con servomotores como actuadores en sus articulaciones y una capacidad de carga de unos cuantos gramos a uno desarrollado en aluminio, funcionando con motores paso a paso y con un aumento en la capacidad de carga a centenas de gramo. El diseño del brazo se extiende no solo a la generación de los planos del mismo sino al instructivo de ensamble del mismo, de manera que se disponga de un producto que UNICATÓLICA pueda comercializar en instituciones educativas del sector.

3.2.1 Diseño base

Durante el periodo de selección se encontraron varias alternativas, pero la opción que más llamó la atención fue la del brazo robótico MeArm V1.0, mostrada en la Figura 3, esto debido a que, este manipulador en particular presenta la mayoría de los actuadores en la base y no en cada articulación como se presenta en la mayoría de los brazos robóticos existentes en el mercado y que, además, cumplieran con la condición de ser una herramienta que pudiera ser modificada sin afectar los derechos de autor, para este caso la licencia es *Creative Commons* (Atribución – Compartir igual) que permite realizar modificaciones al mismo y libre distribución del producto final siempre y cuando se haga alusión a los autores de la versión original.

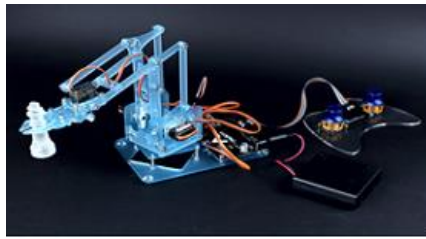


Figura 3. Brazo Robótico MeArm V1.0 [5]

Una vez seleccionado el modelo de brazo robótico, se inició al proceso de revisión de las especificaciones técnicas con el fin de conocer las propiedades generales del manipulador, dentro de las cuales se encontró que, las partes del brazo robótico se pueden cortar en diversos materiales como policarbonato, fibropanel de densidad media o MDF (Por sus siglas en inglés), acrílico o metales como el aluminio, lo que posibilitó una rápida construcción del prototipo base con el propósito de realizar pruebas sobre este [16]. De igual manera, el brazo robótico puede ser controlado mediante el uso de una gran variedad de tarjetas de desarrollo programables (Arduino, Raspberry Pi, Beaglebone Black, Sparkcore y Espruino), lo que facilitó realizar pruebas de funcionalidad de este al eliminar la limitación de un solo lenguaje de programación para el control [17]. Otra característica que posibilitó la rápida construcción del prototipo base fue el hecho de requerir servomotores de baja potencia como actuadores puesto que, para controlarlos solo requieren de una tarjeta de desarrollo programable junto a una fuente de 12 V con un suministro de corriente menor a 3 A.

La Tabla 1, expone de forma resumida, los diferentes materiales y componentes que conforman el diseño base, allí se ven que la estructura fue realizada de acrílico, para este caso el corte se hizo manual. Una vez realizado el montaje usando herramientas de sujeción como tornillos y arandelas. Se emplearon servos accionados por una tarjeta de desarrollo arduino mega funcionando en conjunto con un motorshield, un periférico que permite controlar los servos con facilidad mediante pocas instrucciones de código implementado en el lenguaje nativo de arduino. Para la corriente se usó una fuente que proporciona máximo 12 v. El prototipo obtenido se puede observar en la Figura 4.

Tabla 37. Lista de materiales

Elemento	Descripción
Piezas mecanizadas	Piezas de acrílico mecanizadas mediante corte láser o manual
Placas de desarrollo y periféricos	Arduino UNO, motorshield
Actuadores	Servomotor, motores paso a paso
Componentes mecánicos varios	Tornillos, tuercas, arandelas entre otros
Fuentes de poder	Fuente regulada de 0-12V a máximo 3A
Elementos de conexión eléctrica	Cables jumper, cables de datos, conectores, borneras entre otros.



Figura 4. Diseño base ensamblado

Las pruebas realizadas permitieron determinar varios inconvenientes de funcionamiento como es el hecho de que la pinza no presentaba un movimiento uniforme, sino que realizaba saltos, esto debido a que los engranajes no se acoplaban de la forma adecuada, algunas de las articulaciones intermedias presentaron movimientos innecesarios (Tensiones, oscilaciones y demás desplazamientos indebidos), a causa de problemas en cuanto a dimensiones de algunas piezas. La base presentó el mayor problema de esta versión, referente a la fricción presente entre las dos superficies de la base que se desplazan una con respecto a la otra conformando el primer grado de libertad. Para dar solución a todos los problemas presentados en esta versión se prosiguió a la digitalización de todas y cada una de las piezas del brazo robótico mediante el uso de un software CAD, con el fin de modificar las piezas con una mayor efectividad en cuanto a tiempo y costos a la vez que se pueden simular los movimientos del dispositivo sin incurrir en grandes gastos.

- *Prototipo 1.* Teniendo en cuenta el análisis de los requerimientos establecidos para la construcción, se prosiguió a modificar las piezas previamente digitalizadas. El resultado se puede observar en la Figura 5, gracias a la virtualización de las piezas, se facilitó la modificación de una serie de partes alrededor del brazo con el fin de generar mayor resistencia en la estructura, mejorar la compatibilidad de otras y, sobre todo disminuir la fricción generada por tensiones innecesarias en algunas articulaciones.

Una de las modificaciones más importantes es que se realizó un cambio al grosor de la placa de acrílico que paso de ser de 3 mm a 5 mm esto con el fin de que, al momento de asegurarlas, estas no tuvieran una tendencia a partirse fácilmente lo cual se evidencio en el primer modelo del brazo. Además de esto, se modificaron las dimensiones de la zona que conformó el primer grado de libertad (El cual se puede evidenciar en la Figura 5 en el lugar indicado por la flecha donde se juntan las piezas de la base fija y la que rota), a fin de minimizar la fricción entre estas piezas y, por ende, el esfuerzo requerido por el motor para poder iniciar y mantener su movimiento a través del tiempo. La mordaza también se modificó usando la teoría de engranajes con el fin de mejorar la fiabilidad de acople de las partes del mismo. También se ajustaron algunos detalles de acople de las piezas, debido a que estas presentaban inconvenientes en el movimiento como dimensiones de los tornillos y tuercas.

En la Figura 5 se observan las piezas del modelo obtenido cortadas de una lámina de acrílico de 5 mm de espesor, así como el ensamble de las mismas, se puede observar que la forma es muy similar a la versión base, puesto que, las modificaciones fueron básicamente, un escalamiento de las piezas (2:1) que afecto longitudes, diámetros de agujeros y demás encajes de las diferentes partes. Esta versión permitió a realizar pruebas de funcionalidad donde se observó que el primer grado de libertad, presento un mejor desempeño al igual que la pinza, pero esto no se trató de una solución completa ya que desafortunadamente, en el caso de las articulaciones encargadas del movimiento transversal y longitudinal del dispositivo, el movimiento no fue el esperado, puesto que, al intentar ejecutar la rotación, no ejecutaron el giro completo ya que se quedaban bloqueados a causa del excesivo torque requerido por el sistema a causa del aumento en la masa en las piezas.



Figura 5. Diseño 3D (Piezas en contacto que forman el 1^{er} grado de libertad) y versión física en acrílico del prototipo 1

Al hacer un análisis dinámico del brazo, la fuerza necesaria para poder realizar el movimiento correctamente resultaba en mínimo 14.2 kg/cm, mientras que, la fuerza de los servomotores utilizados era de máximo 4.1 kg/cm. Esto condujo a la necesidad de implementar actuadores común torque mayor, se propuso el uso de motores paso a paso. Otro detalle observado en esta versión fue el tema de la precisión del brazo robótico debido a que, los movimientos de la base (1^{er} grado de libertad) y de la pinza (4^o grado de libertad), generaban movimientos bruscos que afectaban la precisión en el posicionamiento de esta última.

- *Prototipo 2.* Con el fin de reducir los errores generados en las modificaciones del diseño del primer prototipo se solicitó apoyo, en el tema, al Tecnoparque del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), puesto que, esta entidad tiene una extensa experiencia en el ámbito de la automatización industrial y la robótica (además existe un convenio entre UNICATÓLICA y dicha entidad), que por ende, ayudaría en la reducción de inconvenientes a la hora de pasar de lo intangible a lo tangible con las partes y componentes del sistema y su respectivo ensamblaje.

Este segundo prototipo se muestra en la Figura 6, en la cual, por medio de la implementación de un eje empotrado en un rodamiento en la articulación que conforma el primer grado de libertad, se redujo considerablemente la fricción. La falta de torque, necesario para poder ejecutar los movimientos transversal y longitudinal, se solucionó por medio de la implementación de motores paso a paso de mayor potencia, que además de presentar un mayor torque (19 kg/cm) a comparación de los servomotores (4.1 kg/cm), ofrecen una mayor precisión a la hora de girar debido a su naturaleza de funcionamiento [17]. El ultimo problema al que se le dio solución fue la compatibilidad de los engranajes ubicados en la pinza, los cuales, fueron normalizados, estandarizados y optimizados.

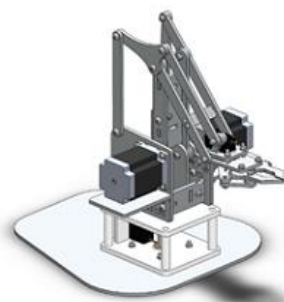


Figura 6. Diseño 3D de la versión 2

Puesto que esta versión posee muchas similitudes con el primer prototipo, muchas de las piezas fueron reutilizadas de la versión anterior, junto al desarrollo de la base en acrilonitrilo butadieno estireno (por sus siglas en inglés ABS), por parte de Tecnoparque SENA, quien suministro la materia prima junto con la impresión 3D. esta colaboración no tuvo costos ya que se presentó ante esta entidad un proyecto que fue aprobado por el comité respectivo colocando a disposición la infraestructura de desarrollo de prototipos de esta institución. Durante el proceso de ensamblaje, se encontró un defecto en la integridad de la base del brazo robótico, tal como se muestra en la Figura 7, donde vemos la base impresa mediante tecnología 3D en la cual, la sección de coloración roja fue la que presentó el defecto. Al proceder con el ensamblaje con las otras partes del brazo se presentó un inconveniente. El eje se fracturo en su parte superior, mostrando una vulnerabilidad en el material escogido para el desarrollo. El ABS es un polímero muy rígido, el peso de las componentes del brazo sobrepasa la capacidad de carga del material y el diseño coloca el centro de masa fuera del eje, lo que genera un torque que propicia la fractura del eje.

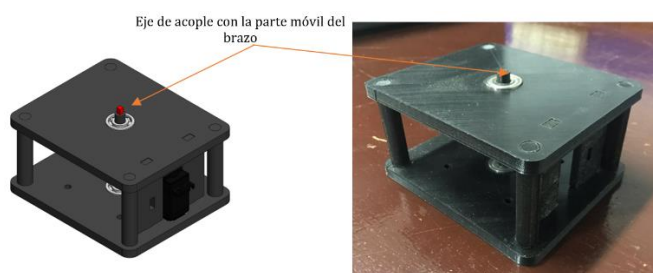


Figura 7. Diseño de la base 3D (a) del 2º prototipo y pieza en ABS de la base (b) en ambos e observa la pieza problema

- **Prototipo 3.** Luego de haber analizado todas las fallas, advertencias y problemas generados en el segundo prototipo del brazo robótico, se prosiguió a generar una nueva versión del mismo, como se puede ver en la Figuras 8, donde se a bordo con una solución radicalmente diferente el problema de la base, rediseñando la base con una superficie mucho más extendida que mantuviera el eje del centro d masa sin mucha variación evitando torques que generaran daños en la estructura. Además, se tomó la decisión de cambiar el material estructural a uno que ofrezca una mayor capacidad de carga, el material escogido es el aluminio, en la Tabla 2 se observa las características mecánicas del acrílico comparadas con las características del aluminio y el acero inoxidable escogido para el desarrollo. Para la pinza se escogió un material más duro que garantizara la duración de los engranajes, el material escogido es el acero inoxidable.

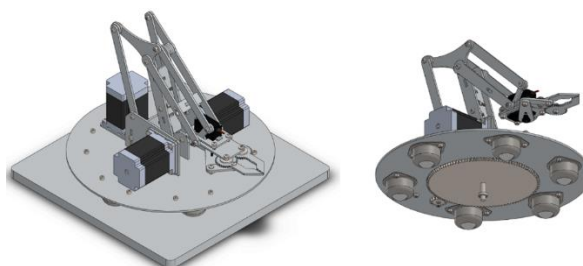


Figura 8. Vista isométrica e inferior del diseño 3D de la versión final

Tabla 38. Características mecánicas de los materiales considerados

	Propiedad	Acrílico	Policarbonato	MDF	Aluminio	Acero
1	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	27.500	24.470	30.590	690.000	1,968.05 2
2	Densidad (g/cm ³)	1,18	1,2	0,45	2,7	8
3	Toxicidad	No	Si	No	No	No
4	Mecanizable	Si	Si	Si	Si	Si
5	Costo	Económico	Económico	Económico	Económico	Costoso
	Referencias	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]

La escogencia de estos materiales obedece no solo por sus características mecánicas, sino porque se debe considerar no aportara peso excesivo al diseño establecido, un factor decisivo para mantener la capacidad de carga del brazo, así como el fácil acceso en el mercado local. La segunda mejora sustancial de esta versión consistió en la modificación de la base del brazo robótico, en la cual, se aplicó un soporte circular con el propósito de ubicar todos los actuadores sobre este y, además se le implementaron 6 ruedas locas en la zona inferior, como se muestra en la Figura 8, para poder estabilizar de mejor forma el sistema a comparación de las versiones anteriores.

- **Prototipo 4.** A pesar de no haberse realizado la construcción de la versión anterior, se detectaron cambios pertinentes en la etapa de diseño y en la modelación del movimiento del mismo, tal cual se muestra en las Figura 9 (a) y (b), los cuales permitieron la optimización de múltiples piezas y mecanismos, sin mencionar el aumento teórico de la capacidad de carga.

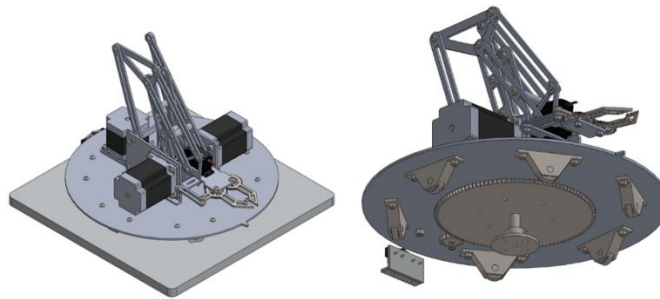


Figura 9. Vista isométrica e inferior del diseño 3D de la versión final

Entre las mejoras realizadas, se encuentra el cambio de materia para los piñones de la mordaza de aluminio a acero inoxidable, puesto que, de esta manera, el material se desgastaría menos con el uso constante y así mismo, le daría mayor vida útil a este mecanismo. De igual manera, se cambió el material del sistema de piñones comprendido en la base. Además, se realizó el cambio de uno de los tres motores paso a paso, ya que, no era requerido tanto torque para ejecutar el movimiento del primer grado de libertad. Otra de las mejoras realizadas fue el cambio del soporte de rodamientos de bola POLOLU usado en la versión anterior, puesto que, con el actual sistema de rodamiento de rodillo, se mejoró la capacidad de carga de este soporte y, además, la confiabilidad en cuanto al uso de este. Para finalizar, la última mejora aplicada al brazo robótico fue la sustracción de material en diferentes piezas sin afectar significativamente su resistencia mecánica, lo cual, redujo considerablemente el peso de las mismas y por ende el del dispositivo, sin mencionar el hecho de que al reducir esta masa, la capacidad de carga se vería afectada de forma positiva ya que, los actuadores de los grados de libertad longitudinal y transversal, requerirán de menor potencia para ejecutar su movimiento.

3.2.2 Grados de libertad

Teniendo el diseño final del brazo robótico, se prosiguió a especificar los diferentes grados de libertad que posee el manipulador, esto con el fin de analizar a mayor detalle, donde se generan las rotaciones que permiten el movimiento del dispositivo. Con el fin de facilitar la identificación de los grados de libertad, se seccionó el diseño del robot de acuerdo con el actuador y las respectivas partes que incurren en movimiento cuando está ejecuta una rotación. El primer grado de libertad consiste en un actuador, el cual posee un cabezal de tipo engranaje, que, a su vez, conecta con otro mecanismo, el cual se encuentra anclado al eje central, como se puede observar en la Figura 10, donde las piezas de color azul hacen representación al área que presenta movimiento con la ejecución del actuador.

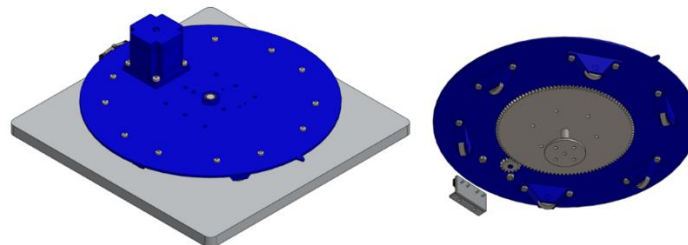


Figura 10. Perspectiva superior(a) e inferior (b) del primer grado de libertad

Para el caso del segundo grado de libertad, se retiraron todas las piezas que no presentaran ni movimiento, ni tampoco conexiones relacionadas con las que lo presentasen. Además, se añadió una coloración verdosa a las piezas que presentan el principal movimiento de, tal cual se muestra en la Figura 11.

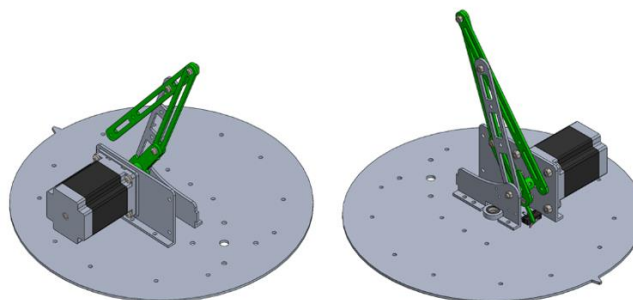


Figura 381. Perspectiva derecha (a) e izquierda (b) del segundo grado de libertad

Prosiguiendo a la zona de la pinza, se extrajo todas las demás partes con el fin de tener una imagen clara de los partes que la conforman donde, además de ello, se le añadió una coloración amarilla con el fin de resaltar las piezas que presentan movimiento en esta sección, tal cual se puede observar en las Figura 12. Cabe resaltar que, debido al nivel

de apertura de la pinza, esta puede manipular objetos de hasta 10 cm de ancho puesto que, si se utilizan objetos con anchura mayor a esta, posiblemente la pinza no pueda sostener la pieza de forma adecuada.

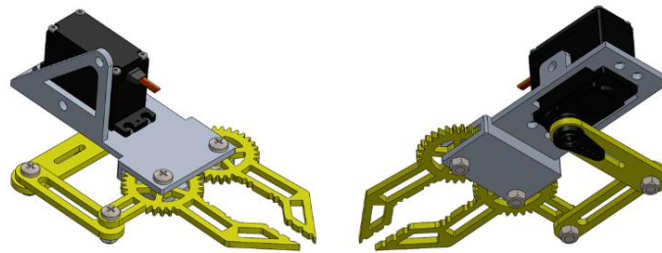


Figura 12. Perspectiva superior(a) e inferior (b) de la zona de la pinza

Luego, se extrajeron las diferentes piezas que no entraban en contacto cercano al último grado de libertad, y además, se le aplicó una coloración roja a las piezas que presentan movimiento directo con el último grado de libertad, tal cual se puede ver en las Figura 13.

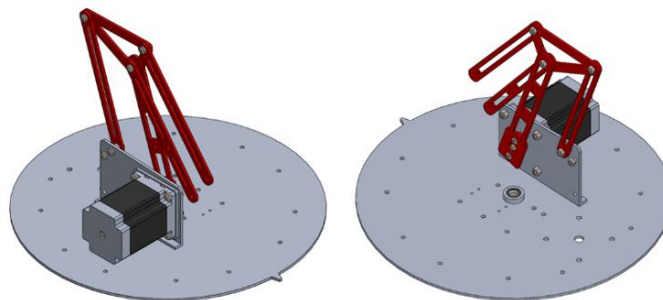


Figura 13. Perspectiva lateral izquierda y derecha del último grado de libertad

Para finalizar, se realizó un esquema del brazo robótico por colores, tal cual se evidencia en las Figura 14, con el fin de analizar fácilmente los diferentes componentes asociados a los grados de libertad que posee el brazo robótico. Entre los cuales, el primer grado de libertad hace referencia al color azul, mientras que, el verde representa el segundo, el color amarillo hace referencia a la zona de la pinza y para concluir, el color rojo presenta el último grado de libertad del sistema. Cabe resaltar que, las piezas que presentan coloración azul celeste, son piezas que, con la ejecución de los dos actuadores laterales, presentan un movimiento compartido a lo largo de su operación.

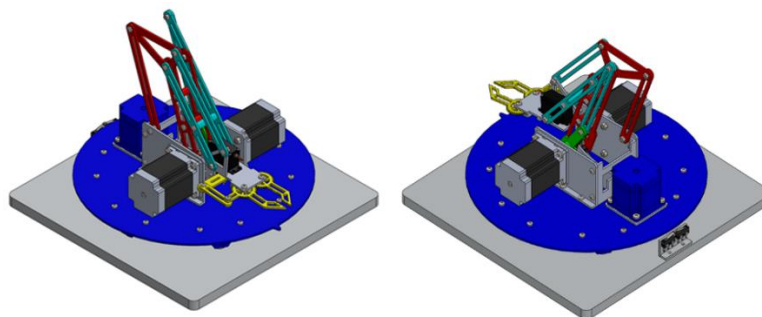


Figura 14. Perspectiva izquierda y derecha del esquema del brazo con los grados de libertad distinguidos por colores

3.2.3 Área de trabajo

Una vez definidos los grados de libertad del manipulador robótico, se prosiguió a especificar el espacio de trabajo, como se puede ver en las Figura 15, con el fin de conocer en qué áreas puede operar este dispositivo. En la Figura 15 (a), se puede observar el área de trabajo especificada para el brazo robótico, en ella se observa el alcance máximo en el eje x es de 42.7 cm a una altura de 7.5 cm y, además, un alcance mínimo de 17.9 cm a una altura de 9 cm. Por otro lado, en el eje y se presenta una altura máxima de 29.8 cm a una distancia 27.5 cm, y también, una altura mínima de 1.3 cm a una distancia longitudinal de 31.6 cm que, a diferencia del máximo y mínimo longitudinal, esta altura mínima se puede prolongar hasta 41.6 cm de distancia en x .

En la Figura 15 (b), se puede evidenciar el área de trabajo desde una vista superior, en la cual, se presenta un diámetro máximo de operación de 85.4 cm. Con el fin de poder analizar de una forma más clara el área de trabajo, se presenta la imagen de la Figura 15 (c) donde se observa la imagen 3D del brazo robótico con las áreas de trabajo incluida. La curva azul clara muestra la mínima zona activa y la zona gris clara la máxima zona activa.

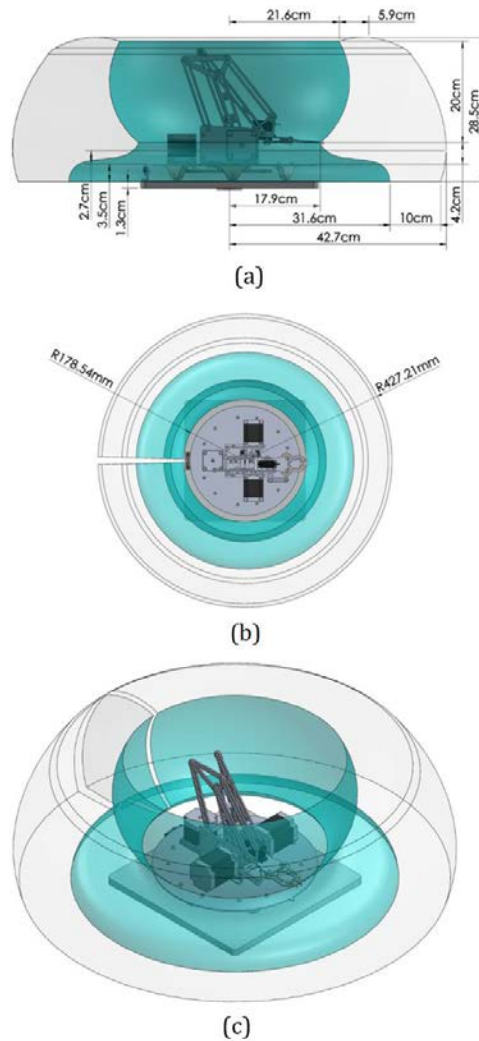


Figura 15. Área de trabajo del Brazo Robótico desde una vista lateral (a), desde una vista superior (b) y desde una vista tridimensional (c)

4. ASPECTOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Diseñada la versión final del brazo robótico, se prosiguió a establecer una guía que le permitiese al usuario final, la posibilidad de construir las partes del brazo mediante la tecnología de corte Láser o corte a chorro de agua, de manera que el maquinado de piezas se reduzca a unas cuantas de ellas y el costo de fabricación se reduzca de forma significativa con respecto al precio del prototipo, en la Figura 16 (a) se observa el plano de las piezas que se proporciona al fabricante para el corte. Además, se explica de forma clara el ensamble acompañando las instrucciones de un inventario de elementos requeridos para el ensamble como tornillos tuercas de dimensiones milimétricas, así como una lista de herramientas necesarias para el armado del dispositivo. Para facilitar la comprensión del manual y evitar los contratiempos en la fabricación y ensamble, se procedió a emplear esquemas explosionados de las partes del brazo robótico por secciones, ver Figura 16 (b).

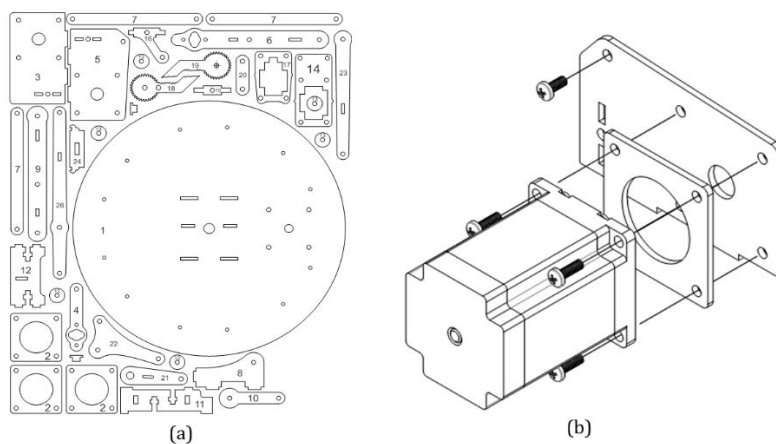


Figura 16. (a) planos para corte Láser de las piezas del brazo. (b) Ejemplo de esquemas de ensamble de secciones

En una siguiente fase del proyecto se desarrollará el manual de instalación del sistema electrónico, así como el de puesta a punto del hardware mediante el software básico diseñado para tal fin. Pero esto no hace parte de los resultados especificados es este trabajo que se centra en el diseño del hardware específicamente.

4.1 Costo de fabricación del prototipo

El costo de la fabricación de un prototipo de un producto siempre es más elevado que cuando se establece la producción en serie del mismo. Los costos asociados a la producción del hardware del brazo se especifican en la Tabla 3, donde se discriminan los valores asociados al prototipo final. El costo total asociado es de Col\$ 3'845.000, donde el 68% se asocia al mecanizado y ensamble de piezas del brazo robótico, el resto es asociado a la compra de elementos que constituyen el armado del brazo. Dentro de los costos no se considera las herramientas necesarias para establecer los procesos, y a que estos están incluidos en el servicio de mecanizado contratado.

Tabla 3. Costos asociados al prototipo final (Los precios a junio de 2019)

Descripción	Unidades (u.a.)	Costo Total (Col\$)
Arduino Mega 2560 R3	1	40.000
Corte laser + Material (Acero Inoxidable)	1	110.000
Driver Motor PaP Tb6560	4	120.000
Fuente conmutada 3V 20A	1	35.000
Lamina Aluminio 400 x 400mm	2	230.000
Límites de carrera	6	30.000
Mecanizado + ensamble brazo	1	2'500.000
Motores PaP NEMA 23 + Servo	4	490.000
Paquete de cables jumper	1	10.000
Cable vehículo de colores	50	150.000
Tornillería + Tuercas	176	100.000
Total		3'825.000

El costo de la fabricación del prototipo es más bajo al de otros productos similares equivalentes del mercado como el brazo DOBOT de la empresa RobotLab con un costo cercano a los Col\$ 7'000.000 o el robot ANNO de 6 grados de libertad con un costo de \$9'305.000, estos valores son considerados con el precio del dólar al 2 de junio de 2019 (1US\$= 3400Col\$). El costo de la producción en serie puede constituir en un ahorro de un 30% en el costo de producción, es decir que el producto costaría alrededor de Col\$ 2'700.000 por unidad el cual podría ser un costo competitivo para ser comercializado si se tiene en cuenta las características del brazo, la precisión del mismo, la versatilidad que implica un desarrollo propio, que puede ser escalable y actualizable. Ala vez que al ser desarrollado con elementos del mercado local entonces es posible un mantenimiento económico y ágil del dispositivo.

5. EXPERIENCIA FORMATIVA

El desarrollo del brazo robótico se realizó por el grupo KHIMERA, el grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium donde se tiene una línea de investigación en Automatización Industrial y Robótica la cual es liderada por el semillero de investigación Métodos Físicos Aplicados a la Industria (MeFAI). El semillero adelanta investigaciones en esta área desde el año 2014 y apoya otras líneas de investigación desarrollando proyectos financiados por la institución, tras un proceso de selección auditado por pares.

El proyecto RACSu vinculo estudiantes de las carreras de ingeniería industrial e ingeniería en sistemas, el primero encargado del diseño, construcción y costeo del brazo robótico y el segundo encargado del desarrollo del software que permitirá la utilización del brazo como herramienta de apoyo en la formación de futuros ingenieros. Los resultados de la etapa de diseño son los abordados en este capítulo. El estudiante a su vinculación en el proyecto no tenía bases sobre el uso de herramientas CAD ni de procesos de automatización, las cuales adquirió completamente en el primer semestre de vinculación, específicamente sobre la herramienta Solid Works en lo referente al diseño y el manejo de Arduino en lo concerniente a automatización. Esta capacitación le permitió al proyecto avanzar rápidamente pues se pudo disponer de un modelo tridimensional cuyas partes podrían redimensionarse y modificarse, así como construir piezas nuevas. Los primeros prototipos se crearon mediante la tecnología de corte Láser, la cual el estudiante conoció y exploró en cuanto a sus posibilidades, así como en cuanto a sus costos. Además, se realizaron piezas con la tecnología de impresión 3D en colaboración con Tecnoparque SENA quien brindó apoyo logístico y tecnológico al proyecto, este proceso fue abanderado por el estudiante que debió adelantar un proyecto con esta entidad para que estos apoyaran la investigación.

Alcanzado el prototipo final el estudiante coordino las actividades de construcción del brazo lo que permitió que este desarrollara capacidades de gestión en la construcción, siendo el estudiante responsable del diseño y de los ajustes al mismo que la construcción requirió. En la Figura 17, se observa la imagen del brazo en su versión final y el resultado de la construcción del mismo, se observa que el resultado es fiel reflejo del diseño propuesto con algunos ajustes propios del proceso de construcción como lo son redimensiones en orificios y cambio de tornillería.

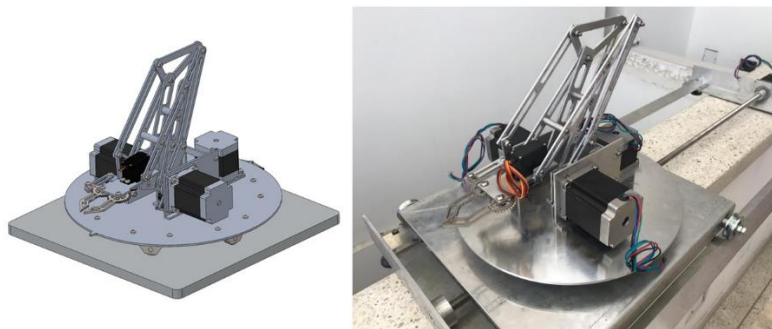


Figura 17. Desarrollo CAD del brazo robótico y brazo construido en los materiales seleccionados

Con todo esto se extendió una formación al estudiante de ingeniería industrial de manera que conoció de primera mano tecnologías de manufactura avanzada, desde la operatividad, así como desde los costos de la misma. A la vez que se pulió la formación como ingeniero industrial abanderando el proceso de diseño y construcción, así como llevando un control del presupuesto a la hora de asumir los costos de producción. Sin lugar a dudas el estudiante, después del paso por el semillero y adelantando su labor investigativa y de desarrollo adquirió competencias por encima de las estipuladas en el currículo académico de la carrera, es entonces muy importante el hecho de que estudiantes hagan parte de los semilleros de investigación apoyando el desarrollo de proyectos en pro de desarrollar en ellos competencias investigativas y laborales. Para finalizar el estudiante presentó el proyecto en 11 eventos regionales y nacionales entre los años 2016 y 2018 organizados por ACIET y RedCOLSI dos organizaciones que apoyan la investigación adelantada en los semilleros de investigación y brindan una ventana de divulgación de dichos procesos a la comunidad académica del país. La preparación para la presentación de estos eventos aportó formación a nivel de oratoria y la participación en el proyecto formación a nivel investigativa.

6. CONCLUSIONES

Con base a lo visto a través de los resultados, se puede afirmar que el brazo robótico representa una excelente posibilidad de desarrollo para los estudiantes al ser implementado en los escenarios de prácticas de laboratorio de ingeniería industrial en UNICATÓLICA, esto debido a que, el brazo brinda la posibilidad al estudiante de experimentar un escenario de producción con herramientas de manufactura avanzada. Además, de acuerdo con el diseño, este se acopla al contexto requerido en todos los aspectos, por ejemplo, el área de trabajo, ya que el rango de acción es de un diámetro máximo de 86 cm aproximadamente y respecto a la capacidad de carga, este podría levantar por lo menos 120g (20% más de lo que se solicitó inicialmente), que abarcan carga externa y la carga del mismo brazo(274g).

Un producto obtenido de forma paralela al diseño del brazo robótico fue la posibilidad de disponer de un sistema propio escalable y reproducible en la institución, lo que permitirá el desarrollo de prácticas para ingenieros industriales relacionadas con ingeniería de métodos, así como en diseño industrial y un escenario para explorar ámbitos de programación orientados a la automatización y al control.

Puesto que el brazo robótico está diseñado con el propósito de promover la línea de investigación “Automatización industrial y robótica” en UNICATÓLICA, este se encontrará bajo la misma licencia que el diseño base (Licencia CC-BY-SA) con el fin de que haya facilidad en la manipulación y modificación de este para futuros desarrollos a la vez que se disponga de una filosofía de distribución que pueda en algún momento determinado ser ajustada a otras, según la conveniencia de la institución.

Para finalizar se tiene que, gracias a la estructuración de guías experimentales para asignaturas referentes a ingeniería de métodos, es posible emplear la herramienta desarrollada como apoyo al aula de clase en varias asignaturas de los currículos de ingeniería de UNICATÓLICA. Este desarrollo constituye no solo en la construcción de un dispositivo sino en la transformación de metodologías y procesos formativos que tienen como objetivo en últimas transformar modos de pensar de los futuros ingenieros que podrán disponer de bases de producción orientadas a la manufactura avanzada.

REFERENCIAS

- [1] D. Rincón, C. Herrera, y P. Munevar. Robótica educativa: Experiencias en el mundo. Editorial Académica Española, 2015.
- [2] G. Ocaña. Robótica Educativa Avanzada. España: Dextra Editorial, 2018.
- [3] T. Terrazas, V. Becerril y A. Padilla. La robótica y la competencia comunicativo-ortográfica: Desarrollo de los saberes. Editorial Académica Española. 2018.
- [4] J. Arlegui, y A. Pina. Didáctica de la robótica educativa: un enfoque constructivista. Dextra Editorial, 2016.
- [5] Comunicaciones Valle, “Aprendices vallecaucanos dejan en alto la robótica nacional en los Estados Unidos,” SENA, mayo. 08, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=3417>. [Accedido: jun. 10, 2019].

- [6] A. Montoya, (2018, agosto 21). "Aprendices SENA obtienen medalla de plata en Mundial de Robótica," SENA, agosto. 21, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=3550>. [Accedido: jun. 10, 2019].
- [7] R. García, E. Ocampo, D. Gómez, y A. González. Asimov: Programa de Robótica Tecnoparque Rionegro. Rionegro: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), 2016.
- [8] G. E. Juan J., y J. B. Jovani A., "La robótica como herramienta para la educación en ciencias e ingeniería," Revista Iberoamericana de Informática-Educativa, no. 10, dic., pp. 31-36, 2009.
- [9] Creative Commons Colombia, "Licencias," Creative Commons, (s.f.). [En línea]. Disponible en: https://co.creativecommons.org/?page_id=13. [Accedido: jun. 11, 2019].
- [10] Creative Commons Colombia, "Presentamos la Guía de bolsillo Creative Commons Colombia," Creative Commons, diciembre. 5, 2012. [En Línea]. Disponible en: <https://co.creativecommons.org/?p=1368>. [Accedido: jun. 11, 2019].
- [11] S. Aliprandi. Creative Commons: A User Guide. Milano: Ledizioni, 2011.
- [12] D. Tapias. Curso 2014/15. Conferencia de clase, "Proyectos de Desarrollo Software". Escuela Politécnica Superior, Madrid, España, 2014.
- [13] W. R. Alfredo y G. B. Silvia, "Ingeniería de software: el proceso para el desarrollo de software," en Introducción a la computación, A. Gomez and I. Ania Editores, México: Cengage Learning, 2007, pp. 355-396.
- [14] Sura, "Manejo manual de cargas" sura, (s.f.). [En línea]. Disponible en: <https://www.arlsura.com/index.php/component/content/article?id=785>. [Accedido: jun. 12, 2019].
- [15] P. A. Vargas Porras, "Guía para la Manipulación Manual de Cargas," Universidad Manuela Beltran Seccional Bucaramanga, 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://umb.edu.co/bucaramanga/descargas/investigacion/documentos-de-trabajo/manipulacion-manual-de-cargas-investigaciones-universidad-manuela-beltran.pdf>. [Accedido: jun. 12, 2019].
- [16] B. Gray, Me Arm, Assembly Manual for v1.0, Instructables, 2015.
- [17] H. B. Irming Isaac, y O. L. Cristóbal., "Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar," Tesis profesional, UDLAP, Universidad de las Américas Puebla, Pue, México, 2004.
- [18] Ideplas, "Ficha Técnica Lamina PMMA (Acrílico)," Ficha Técnica, 2001 [Accedido: jun. 13, 2019].
- [19] Elaplas, "Propiedades Físicas del Policarbonato", Ficha Técnica, 2016 [Accedido: jun. 13, 2019].
- [20] Proteak, "Soluciones Básicas en MDF", Ficha Técnica, 2016 [Accedido: jun. 13, 2019].
- [21] Madecentro, "Ficha técnica Aluminio", Ficha Técnica, 2018 [Accedido: jun. 13, 2019].
- [22] Italuminio, "Acero Inoxidable 304", Ficha Técnica, 2015 [Accedido: jun. 13, 2019].



INVESTIGACIÓN FORMATIVA EN INGENIERÍA (Tercera Edición)

Las universidades han comprendido que el relevo generacional de sus investigadores depende del trabajo organizado y consiente en Investigación Formativa. Este libro es reflejo de ese compromiso y contiene el resultado del trabajo investigativo de los estudiantes, acompañados de sus tutores, el cual contiene datos e información que puede ser de utilidad para profesores e investigadores, pero, por encima de esto, para otros estudiantes interesados en emular el contenido aquí presentado. El texto se organiza por capítulos y por disciplina ingenieril en la que se enmarcan, además de las Ciencias Computacionales.

ISBN: 978-958-52333-1-7