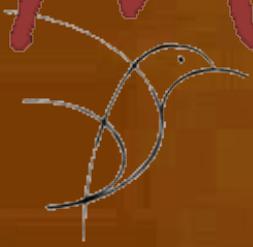


ISSN 1390-6712

# MASKAY



Vol. 11, No. 2

## **Revista MASKAY**

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

### DIRECTOR DEL DEEE

Tcn. Freddy Williams Pérez Arias, Mgs.

### EDITOR GENERAL

Diego Arcos Avilés (ESPE)

### COEDITORES

Enrique V. Carrera (ESPE)

Vanessa Vargas (ESPE)

### EQUIPO EDITORIAL

Enrique V. Carrera (ESPE, Ecuador)

Vanessa Vargas (ESPE, Ecuador)

Francesc Guijoan (UPC, España)

Juan Antonio Clemente (UCM, España)

Nelson Díaz (UD, Colombia)

Daniel Ochoa (ESPOL, Ecuador)

Martha Cecilia Paredes (EPN, Ecuador)

Carlos Julio Tierra (UFRJ, Brasil)

### INFORMACIÓN DE CONTACTO

Revista MASKAY

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui (S/N)

P. O. Box 17-15-243B

Sangolquí, Pichincha, Ecuador

e-mail: [maskay@espe.edu.ec](mailto:maskay@espe.edu.ec)

Telf. +593 2 3989400 ext 1867

El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus correspondientes autores. Mayor información en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay>.

# Presentación

El Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, consciente de su gran responsabilidad con la sociedad, busca proponer e impulsar iniciativas tendientes a fomentar el desarrollo integral de la ingeniería eléctrica y electrónica en el Ecuador. Como resultado de este compromiso, nace en el año 2011 la revista Maskay. Esta revista sintetiza de una forma documentada los esfuerzos en investigación y desarrollo que desarrollan los docentes/investigadores y estudiantes de la región.

En la actualidad, la revista MASKAY se encuentra indexada en diversas bases de datos: **SciELO-Ecuador**, **Latindex catálogo v2.0**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Matriz de Información para el análisis de Revistas), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** y **REDIB** (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico), con el objetivo de difundir a nivel internacional las publicaciones realizadas en esta revista. Además, para que exista una mejor divulgación de sus contenidos, la revista MASKAY cuenta con número **DOI (Digital Object Identifier)** legítimamente registrado y validado por **Crossref**, lo que permite una fácil localización de sus contenidos en la web.

En este segundo número de su décima primera edición, la revista MASKAY pone a consideración de la comunidad científica tres trabajos realizados por investigadores de centros de educación superior del país

*Diego Arcos Avilés*  
Editor General

# Contenido

**Juguete electrónico para niños con trastorno de hiperactividad en la educación inicial**

DOI: 10.24133/maskay.v11i2.1837

*Darwin Toca, Fidel Parra Balza, Millard Escalona, René Cortijo* ..... 1

**Sobre sistemas de control en red bajo incertidumbres de tiempo, medición y proceso**

DOI: 10.24133/maskay.v11i2.1826

*Carlos Rosero, Cristina Vaca, Iván Iglesias, Luz María Tobar, Milton Gavilanez*.7

**Una breve introducción a la electrónica orgánica: celdas solares y transistores**

DOI: 10.24133/maskay.v11i2.1927

*Dayana Cristina Morales, Freddy Del Pozo*.....14

## Comité Técnico

Paúl Ayala  
Joe Carrión  
Henry Carvajal  
Mercedes Delgado  
Tatiana Gualotuña  
Raúl Haro  
Luis Montoya  
Darwin Ramírez  
Carlos Silva  
Gloria Valencia  
Andy Vega

William Calvopiña  
Christian Carvajal  
Fernando Chicaiza  
Cristian Gallardo  
Juan Guevara  
Rubén León  
Washintong Quevedo  
Ana Rodas  
Soraya Sinche  
Javier Vargas

# Juguete electrónico para niños con trastorno de hiperactividad en la educación inicial

## *Electronic toy for children with hyperactivity disorder in early education*

Darwin Toca, Fidel Parra Balza, Millard Escalona, René Cortijo

**Abstract**—This paper describes the development of a prototype electronic toy capable of teaching, in a participatory and entertaining way, the basic concepts of addition in Basic Mathematics. The main objective is the development of a toy that allows hyperactive children to improve their learning using a ball-based game, which also contributes to the development of their logical thinking and can easily respond to the teacher's indications and orientations. Through an exploratory and descriptive methodology, previous research is carried out to define the most successful didactic strategies in the treatment of hyperactivity, and thus, establish the design parameters of the electronic device. The obtained results during the functional tests demonstrated that the children who participated in the project showed greater interest in solving mathematical problems and recognizing colors with a percentage of success (knowledge retention) that reached 86%. Therefore, it could be concluded that the interactive digital system contributes to the development of learning.

**Index Terms**— toy, thinking, logical, didactics, hyperactivity, electronic.

**Resumen**—Este estudio describe la creación de un juguete electrónico prototipo, capaz de enseñar -de manera participativa y entretenida- los conceptos básicos de la suma en Matemáticas Básica. El objetivo principal fue el desarrollo de un juguete, que le permita al niño hiperactivo mejorar su aprendizaje por medio de un juego basado en pelotas, que contribuya además al desarrollo del pensamiento lógico del mismo y pueda responder con facilidad a las indicaciones y orientaciones del docente. Mediante una metodología exploratoria y descriptiva se realizó una investigación previa para definir las estrategias didácticas más acertadas en el tratamiento de la hiperactividad y con ello establecer los parámetros de diseño del dispositivo electrónico. Los resultados obtenidos durante las pruebas de funcionamiento mostraron que los niños que participaron en el proyecto llegaron a manifestar mayor interés en resolver problemas matemáticos y reconocer los colores con un porcentaje de aciertos (retención de conocimiento), que alcanzó un 86%. Por lo que se pudo concluir, que el sistema digital interactivo contribuye al desarrollo del aprendizaje.

**Palabras Claves**— juguete, pensamiento, lógico, didácticas, hiperactividad, electrónico.

D. Toca is with the SERTECPRIV CIA LTDA, Ecuador (e-mail: daralexito@hotmail.com).

F. Parra and R. Cortijo are with the Engineering Department, Universidad Israel, Ecuador (e-mail: {fparra, recortijo}@uisrael.edu.ec).

M. Escalona is with the Director Académico MK, Ecuador. (e-mail: millard.escalona@gmail.com).

### I. INTRODUCCIÓN

EL Trastorno por Déficit de Atención por Hiperactividad (TDAH), es el problema de desarrollo neurológico más común en las clínicas neurológicas pediátricas. El diagnóstico en los niños antes de los 7 años es problemático y controvertido. Sin embargo, de acuerdo con informes retrospectivos y varios estudios longitudinales, se ha podido constatar que, un alto número de niños de primaria presentan TDAH y muestran el comportamiento típico de la enfermedad [1]. En los niños de edad preescolar no es tan significativa esta cifra en términos de intensidad. Desde la perspectiva del TDAH, el cuidado temprano de los niños de 0 a 6 años de edad, incluye el diagnóstico, la atención especializada inmediata y tratamiento temprano. Los niños entre 0 y 6 años presentan un 50% menos de TDAH, que los niños en edad escolar, lo que representa aproximadamente el 3% de los niños [2].

Por otra parte, según el "Manual de diagnóstico de trastornos mentales" de la Asociación Americana de Psiquiatría (DSM-IV), el 5% de los bebés sufren de TDAH, y afecta más a los niños que a las niñas [3]. El Ministerio de Educación de Ecuador, registró la impulsividad como un síntoma común en niños diagnosticados con trastorno por déficit de atención e hiperactividad, un síndrome conductual con una base neurobiológica y un fuerte componente genético. Esta es una enfermedad muy común que afecta del 5 al 10% de la población infantil [4].

En este sentido, se recomienda emplear juegos, cuentos, historias, desarrollo de actividades dinámicas, pinturas, narración, ejecución, metáforas, expresión, resolución de problemas y otros, para inspirarlos y promover el enfoque en los niños [1] [5].

Por otra parte, se sugiere usar juegos que motiven a sus hijos a aprender Matemática y contribuyan al desarrollo cognitivo a través del razonamiento matemático lógico [5].

Es por eso que se desarrolla esta investigación, con la finalidad de diseñar y construir un dispositivo electrónico que consiste en un sistema didáctico que utiliza software y hardware libre, con el que se pretende facilitar el desarrollo del pensamiento a través de las operaciones básicas para potenciar las relaciones, dentro del medio en el que se desenvuelve el niño con problemas de atención. Esto facilitará

la resolución de problemas sencillos en las edades comprendidas entre 4 a 5 años, específicamente del Centro de Desarrollo Infantil “La Primavera” de la Ciudad de Quito.

El juego consiste en una prueba de desempeño, para determinar la cantidad de éxitos y fracasos que obtiene cada niño al realizarla. La prueba es supervisada por los maestros de la institución para obtener parámetros de calificación. Por una parte, parámetros cuantitativos al determinar el porcentaje de éxitos y por otra cualitativos, en relación con la actitud del niño o niña. Cabe destacar, que para los fines del proyecto solo interesó construir el juego, con lo cual los especialistas pudieron analizar la habilidad, es decir, permitió obtener resultados de acuerdo a los objetivos propuestos.

## II. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen diferentes trabajos científicos, en los que se evidencia el problema del trastorno por déficit de atención por hiperactividad. El TDAH es un trastorno común que comienza en la niñez y afecta aproximadamente a 4 millones de niños de 6 a 11 años. Entre los síntomas se incluyen la dificultad para prestar atención, para mantenerse concentrado y la hiperactividad. La FDA (Food and Drug Administration) de los Estados Unidos ha realizados estudios documentados con cientos de niños que demuestran, que algunos juegos pueden contribuir de manera significativa en el tratamiento de esta enfermedad [6].

De acuerdo con la revisión de los trabajos relacionados, se ha constatado que, en el país, existen algunos dispositivos creados para interactuar con niños y personas adultas con problemas de aprendizaje. El más significativo es el “sistema de aprendizaje interactivo enfocado al desarrollo de la percepción y comprensión del entorno en los niños de 4 a 5 años del Centro de desarrollo infantil La Primavera” en la Universidad Técnica del Norte, Ciudad de Ibarra. El sistema emplea la inteligencia artificial para desarrollar las funciones sensoriales, interpersonales y auditivas de los usuarios. El mismo consiste en la utilización de un teclado y de varias aplicaciones basadas en la placa de desarrollo Arduino UNO, el que alimenta el teclado a través de tres plantillas intercambiables con diferentes números y colores [6].

Otro de los trabajos importantes revisados para la consecución de nuestro proyecto fue el dispositivo Endeavor Rx, que es una aplicación digital indicada como tratamiento para mejorar la función de la atención, medida por pruebas informáticas, en niños de 8 a 12 años con TDAH [7]. Es el primer y único tratamiento autorizado por la FDA, que se administra por una experiencia de videojuego. Fue evaluado en más de 600 niños, a través de 5 estudios clínicos y tuvo sus bases de desarrollo en un estudio de la Universidad de California, San Francisco. Utiliza estímulos sensoriales y desafíos motores de forma simultánea para dirigirse a las partes del cerebro que desempeñan un papel clave en el desarrollo de la atención. El propósito es que el niño navegue con éxito por un recorrido mientras recoge los objetivos y evita chocar con los obstáculos [7].

El Bouncyband Fidget Phone fue otro de los dispositivos interesantes revisados en el estudio previo de nuestro trabajo.

Permite a niños y adultos jugar mientras reciben satisfacción sensorial con una gratificante liberación de la tensión, que a su vez alivia la ansiedad y mejora la concentración. Es una herramienta silenciosa que mantiene las manos ocupadas y la mente concentrada lo que permite ejercer un control sobre la hiperactividad, la atención, el aburrimiento y la mejora de la productividad. El dispositivo, probado de forma segura, cuenta con el aval de estudios realizados por la Universidad de Clemson EE. UU [8].

Estas y otras investigaciones consultadas, certifican que el uso de juguetes con características especiales, contribuyen de manera significativa en la mejora de las funciones ejecutivas de los niños con TDAH, como la memoria, la atención, el autocontrol y el lenguaje [9]. Además, se ha comprobado que atenúan la hiperactividad mientras se divierten, lo que ha constituido nuestro punto de partida para fomentar la idea de desarrollar un juguete electrónico, que, en fase de prototipo para una primera fase, pueda ser utilizado en centros educativos o de atención especial, con niños afectados por este trastorno.

## III. METODOLOGÍA

Para la realización de esta investigación se utilizó un enfoque proyectivo. Al plantear la solución fue necesario un proceso previo de indagación que permitió explorar, describir y explicar la forma de construcción de un dispositivo electrónico como una herramienta didáctica. El objetivo es que permitiera un adecuado desarrollo del pensamiento mediante operaciones matemáticas básicas y que al mismo tiempo se convierta en una creación de carácter técnico dirigida a cubrir una necesidad basado en los trabajos y estudios previos. Así también fue un estudio aplicado, por cuanto permitió solucionar un problema detectado en el Centro de Desarrollo Infantil “La Primavera” de la Ciudad de Quito [10] [11].

Con la finalidad de recolectar información sobre la necesidad de este dispositivo electrónico, se aplicó la técnica de la entrevista a los tres docentes del Centro de Desarrollo Infantil, con lo que fue posible valorar la situación objeto de estudio. Además se hizo una entrevista a las dos Psicólogas del Departamento de Consejería Estudiantil (DECE), instancia responsable de brindar apoyo y acompañamiento psicológico, psicoeducativo, emocional y social, de la institución, con la finalidad de extraer información sobre la actividad recomendada para atender a los niños que presentan este tipo de problema como es el trastorno de hiperactividad. De las entrevistas se pudo desprender, por una parte, la necesidad de contar con una herramienta para facilitar el proceso de aprendizaje y por otra la aplicación ideal para la construcción del dispositivo electrónico y sus aplicaciones. Finalmente, una vez construido el dispositivo electrónico, se analizó la aceptación y funcionalidad de este, con la realización de pruebas reales de funcionamiento en los niños del Centro de Desarrollo Infantil. Durante todo el proceso de investigación se siguieron los lineamientos del método científico [12].

Las actividades planificadas para el desarrollo de la investigación, de acuerdo con el objetivo que se ha propuesto en esta investigación, se basa en una metodología de nueve (9)

fases [12].

En la primera fase se definirán las especificaciones; en la segunda se establecerá el esquema general del hardware; en la tercera, se conformará el organigrama general; en la cuarta, se realizará la adaptación entre el hardware y el software; en la quinta, se constituirán los ordinogramas modulares y se realizará la codificación del programa; en la sexta, se establecerá la implementación del hardware; en la séptima, se ejecutará la depuración del software; en octavo lugar se llevará a cabo la implementación del hardware con el software. Y en noveno lugar se construirá el modelo definitivo y se realizarán las pruebas finales.

#### IV. PROPUESTA TÉCNICA

El dispositivo se estructura en 4 bloques como se detalla a continuación:

- BLOQUE 1: Identificación del niño por medio de la lectora RFID RC522
- BLOQUE 2: Sensado de pelotas por módulo infrarrojo IR FC-51
- BLOQUE 3: Sensado de color de la pelota mediante el dispositivo TSC 32000
- BLOQUE 4: Visualización y operación mediante pantalla Nextion NX4827T043
- BLOQUE 5: Almacenamiento de la información en memoria microSD SDHC Mini TF.

Para el diseño de la etapa de control se decidió utilizar un microcontrolador Arduino Mega 2560, que se encarga de recibir y tomar acciones sobre las variables provenientes de cada uno de los bloques y mostrar la visualización de los procesos a través de una pantalla Nextion de 3.2 pulgadas. La Fig. 1 muestra de forma simplificada la estructura de módulos que constituyen el del dispositivo.

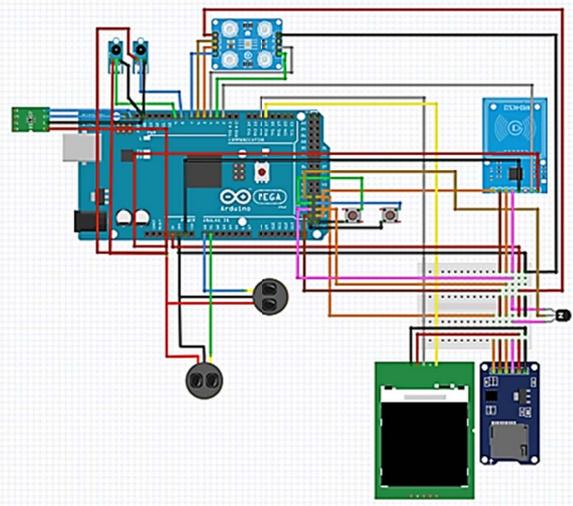


Fig. 1. Diagrama de bloques simplificado del sistema basado en Arduino Mega 2560.

En la Fig. 2, se puede observar el diagrama de flujo que sigue la lógica de la programación. Al energizar el dispositivo se muestra una pantalla de presentación de números como

inicio del juego. El niño es reconocido con un tag de identificación, que se verifica con la visualización de su nombre en la pantalla. El niño comienza el juego con la inserción de las pelotas a través de los ductos. Se podrá observar en la pantalla la cantidad de veces que pasan las pelotas y luego el color de cada una de ellas. El niño ingresará la información observada según su operación matemática y si el resultado es acertado le indicará con un mensaje de “correcto” y con un mensaje de “falló” si el resultado es erróneo. Toda la información se almacena en una memoria SD y el manejo de la base de datos de los niños será administrada mediante un archivo de Excel. La programación fue realizada mediante C++ para la etapa de control con el Arduino Mega 2560. En la Fig. 3 se presenta el diseño electrónico del dispositivo.

Para el diseño de la pantalla se utilizó interfaz gráfica de usuario GUI del software de Nextion Editor. Con él se realizó toda la programación para obtener la respuesta de cada uno de los módulos y poder interactuar con la pantalla táctil e introducir la respuesta lógica del ejercicio. Además se configuró para visualizar si el niño acertó o no en su respuesta como se muestra en la Fig. 4.

#### V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas de funcionamiento se realizan en base a la información que se obtiene de los sensores de los ductos y del menú de números que se muestran en la pantalla para la selección de las respuestas correctas. Para ello se selecciona una muestra de un tamaño apropiado para que ponga a prueba el dispositivo mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z_o^2 \cdot p \cdot q}{d^2} \quad (1)$$

En donde Z es el nivel de confianza (1.96), p es la probabilidad de éxito, o proporción esperada (50%), q es la probabilidad de fracaso (50%) y d es la precisión (error máximo admisible en términos de proporción 5%). Al considerar estos parámetros se obtienen como resultado  $n = 384.16$ , por lo que se realizarán 385 pruebas.

El programa incluye la lógica matemática, donde el acceso se realiza por medio de un lector RFID que señala el lugar de lectura. Una vez realizada la identificación, se da acceso al niño que va a realizar el juego. Luego se procede con la introducción de las pelotitas por los orificios de la parte superior de la caja. El dispositivo posee una pantalla que muestra la información de los dos ductos y un menú de números para la selección de la respuesta correcta. Ver Fig. 5.

En cuanto a la etapa del indicador, que muestra la cantidad, se presentó un déficit en la detección por temas de calibración del rebote de la señal del emisor infrarrojo, para lo cual se procedió a la regulación del potenciómetro del módulo para lograr una calibración adecuada y corregir así el problema con lo que estas etapas quedaron funcionales.



TABLA I  
FUNCIONAMIENTO DE LOS MENÚS GRÁFICOS

Pruebas realizadas para comprobación de las funciones de visualización	Si	No
Se muestran las opciones de forma correcta	98.96	1.04%
Realiza un recorrido de menús hacia adelante y hacia atrás	100%	0%
Cada opción se corresponde con su Pulsador correspondiente	100%	0%
Cada indicador muestra la cantidad de cada ducto	98.7%	1.3%

En la Tabla II se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con las pruebas realizadas en el funcionamiento de los pulsadores.

TABLA II  
FUNCIONAMIENTO DE LOS PULSADORES

Pruebas de funcionamiento de los pulsadores	Si	No
Cada pulsador se corresponde con su correspondiente menú gráfico.	100%	0%
Se activa de forma efectiva los menús seleccionados.	100%	0%
La respuesta del pulsador es lo suficientemente Buena.	100%	0%

En la Tabla III se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con las pruebas realizadas del funcionamiento de las tarjetas y objetos con Tags RFID.

TABLA III  
FUNCIONAMIENTO DEL LECTOR RFID

Pruebas de funcionamiento de los dispositivos RFID	Si	No
Detecta entre el lector y el Tag RFID es de por lo menos 2 cm.	100%	0%
Reconoce cada Tag RFID de forma diferente con identificación de secuencia.	100%	0%
La respuesta del lector es suficientemente rápida.	96.61%	2.86%

En la Tabla IV se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con las pruebas realizadas del funcionamiento del sensor de color.

TABLA IV  
FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE COLOR

Pruebas de funcionamiento de los sensores de color	Si	No
Reconoce los colores de las pelotitas ingresadas.	96.35%	3.65%
La respuesta del sensor es suficientemente rápida.	97.14%	2.86%

Una vez realizadas las pruebas, se puede concluir que el juguete prototipo presenta muchas bondades, ya que por medio del juego se motiva al niño a aprender las Matemáticas y a reconocer los colores, lo que es muy importante para los niños con hiperactividad. La forma de atraer la atención del niño, en este caso, se orienta hacia el juego, el que se inicia con un sonido agradable para llamar su atención al usar el juguete prototipo. Una vez ejecutada la acción del juego, en la pantalla se reflejan los registros sobre las veces que pasó el objeto por el dispositivo y cuántas veces el niño aplicó su lógica por medio del reconocimiento, cuyo número aparece en la pantalla o mediante el conteo de las pelotas introducidas. Para ello el niño verificará si acertó o no la respuesta, ya que de manera didáctica se ilustra una imagen que llama su atención una vez que agrega la respuesta. En la figura 10 se puede observar el dispositivo final.



Fig. 6. Prototipo final en funcionamiento.

## VI. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la investigación, se obtiene un conjunto de datos relevantes que permitieron dar cumplimiento del objetivo propuesto en la misma, arrojando resultados que hemos considerado como satisfactorios.

Con respecto a la visualización, el 98.96% de las veces muestra las opciones correctas lo cual demuestra que el sistema de detección es el adecuado. Con un 100% de efectividad, el sistema puede hacer el recorrido hacia adelante y hacia atrás y además la cuenta total de cada pelota presenta aciertos de un 98.7% por cada ducto. Con esos resultados se demuestra que el sistema de conteo y visualización son adecuados por lo que el especialista puede trabajar con la confianza de que el equipo no generará errores que puedan afectar desempeño de los niños que usen el equipo. Esto demuestra, además, que, aunque existen diferentes tecnologías de hardware y software que se pueden adoptar para el diseño y construcción de un dispositivo electrónico para niños con trastorno de hiperactividad, toda la información explorada

brindó una nueva metodología para el diseño y arquitectura del juguete desarrollado.

Así también con respecto a los pulsadores de control el 100% de las veces, funcionaron de forma adecuada según la función específica de cada uno, lo cual evidencia que los mismos fueron seleccionados de manera apropiada y embebidos en la placa electrónica de forma correcta. Los usuarios podrán utilizar adecuadamente el juguete electrónico, y no habrá ningún tipo de perturbación o distracción por un funcionamiento inadecuado del juguete.

Con respecto al reconocimiento por medio de la tarjeta RFID, el 100% de las veces se realizó de manera satisfactoria, lo que garantiza que cada especialista podrá llevar un registro adecuado de la actividad de cada niño o niña sin la posibilidad de errores de identidad.

Finalmente, pese a que existen múltiples algoritmos para detección de color, utilizar un diodo para hacer esta función, fue suficientemente apropiado y facilitó tanto la circuitería como la programación general del juguete electrónico. Según los resultados arrojados, en el 96.35% de los casos el color es reconocido adecuadamente, mientras que el 97.14% lo hizo en el tiempo establecido por el fabricante, ambos resultados coinciden con las especificaciones técnicas del fabricante del 3% de error.

Por otra parte, el producto desarrollado tiene la virtud de llamar la atención mediante interesantes juegos electrónicos. Los niños que participaron en el proyecto llegaron a manifestar mayor interés en resolver problemas matemáticos y reconocer los colores. Pudieron jugar y encontrar diferentes elementos electrónicos para resolver problemas de razonamiento lógico matemático. El diseño del prototipo resultó sencillo y fácil de usar por parte de los niños.

No obstante, por ser una primera versión del equipo, presenta deficiencias con respecto al alcance de este, ya que solo permite aprender sumas o restas mediante un juego, por tanto, se recomienda ampliar sus posibilidades, mediante la modificación del algoritmo de reconocimiento y conteo de pelotas. Se recomienda hacer uso de otro hardware para hacer más versátil al dispositivo e incluir diferentes aplicaciones relacionadas con el razonamiento lógico, como, desarrollar operaciones de multiplicación y divisiones sencillas que animen a los niños con déficit de atención a interesarse por lo cognitivo de forma amena.

#### RECONOCIMIENTOS

Agradecimientos muy profundos a la Universidad Tecnológica Israel y sus docentes, quienes fueron parte fundamental en el desarrollo de este trabajo. También agradecemos a la Unidad Educativa “Manuelita Sáenz” ubicada en la ciudad de Quito en el sector de Cotocollao, por haber brindado información y sus instalaciones para la realización de esta investigación.

#### REFERENCIAS

[1] I. Pascual-Castroviejo, “Trastornos por déficit de atención e hiperactividad (TDAH)”, *Asociación Española de Pediatría*, Madrid, 2008, pp. 140-150.

- [2] Fundación CADAH, 2012. [En línea]. Available: <https://www.fundacioncadah.org/web/articulo/tdah-y-trastornos-del-aprendizaje.html>. [Último acceso: 2020].
- [3] J. López-Ibor, M. Valdés, “Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales”, Barcelona, España: Masson, 1995.
- [4] H. Ferreyra, S. Vidales y G. Peretti, “Una propuesta para el desarrollo de capacidades,” *Mejora en los aprendizajes de la Lengua, Matemáticas y Ciencia*, no. 2, pp. 1-15, 2014.
- [5] M. E. Anaya Meneses, «Siete olmedo,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sieteolmedo.com.mx/2013/04/07/desarrollo-motriz-en-el-nino-etapas-y-sugerencias-para-su-estimulacion/>. [Último acceso: 2020].
- [6] FDA. US. FOOD & DRUG ADMINISTRATION, “FAD NEWS RELEASE,” [En línea]. Available: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements>. [Último acceso: 2020]
- [7] Akili Interactive, Endeavor Rx, “Endeavor Rx,” 2020. [En línea]. Available: <https://www.endeavorrx.com/>. [Último acceso: 2020].
- [8] Bouncyband, “Bouncyband,” 2020. [En línea]. Available: <https://bouncyband.com/products/fidget-phone>.
- [9] Fundación CADAH, [Fundación CADAH](https://www.fundacioncadah.org/web/articulo/bajo-rendimiento-escolar-y-tdah.html), 2012. [En línea]. Available: <https://www.fundacioncadah.org/web/articulo/bajo-rendimiento-escolar-y-tdah.html>.
- [10] R. Hernández Sampieri , C. Fernández Collado y L. Pilar Baptista, *Metodología de la investigación*, 6 ta edición ed., México DF: Mc Graw Hill, 2014.
- [11] M. Balestrini Acuña, *Cómo se elabora el proyecto de investigación*, 7ma edición ed., Caracas: BL Consultores asociados servicios editoriales, 2005.
- [12] J. Lozada, “Definición, Propiedad Intelectual e Industria,” *CienciaAmérica*, vol. 3, no. 1, pp. 47-50, 2014.
- [13] A. M. Bavaresco de Prieto, *Proceso metodológico en la investigación*, Sexta edición ed., Maracaibo: Imprenta Internacional, CA, 2013.
- [14] J. M. Angulo Usategui, *Robótica práctica: tecnologías y aplicaciones.*, Barcelona: Paraninfo, 1986.

# Sobre sistemas de control en red bajo incertidumbres de tiempo, medición y proceso

## *On networked control systems under time, measurement, and process uncertainties*

Carlos Xavier Rosero, Cristina Vaca, Iván Iglesias, Luz Tobar Subía y Milton Gavilanez

**Abstract**—The performance of control loops closed over communication networks can deteriorate due to variable time delays caused by network congestion and latency, and by processing of the control algorithms, an effect known in periodic sampling as jitter. To remove this detrimental effect on stability/performance, the method of synchronization at actuation instants uses an observer to estimate the value of the states at actuation, knowing state measurements at sampling, which entails to strictly periodic actuations. However, its successful application requires noise-free samples and undisturbed processes, issues not achievable. In this work, the aforementioned model is extended to the case of other non-ideal operating conditions. In particular, a Kalman filter is incorporated into the synchronized actuation model, considering that the available measurements of the states are not periodic. This raises the problem of adapting the standard discrete-time Kalman filter to the case under study and deciding when to apply the prediction and correction phases. The immediate benefit is that synchronized actuation eliminates the harmful effects of uncertainty over time and the Kalman filter improves performance in the face of uncertainty in measurements and in the process.

**Index Terms**— Networked control system, real-time control, time-varying delay, synchronization at actuation, Kalman filter.

**Resumen**—El rendimiento de los lazos de control cerrados a través de redes de comunicación puede deteriorarse debido a retardos variables de tiempo provocados por congestión y latencia en la red, y por procesamiento de los algoritmos de control, efecto conocido en muestreo periódico como jitter. Para remover este efecto perjudicial sobre la estabilidad/rendimiento, el método de sincronización en instantes de actuación usa un observador que estima el valor de los estados en el instante de actuación, conociendo las medidas de estos en el instante de muestreo, lo que conlleva a actuaciones estrictamente periódicas. Sin embargo, su aplicación exitosa requiere de muestras libres de ruido y procesos sin perturbación, cuestiones no alcanzables en la realidad. En este artículo se extiende el modelo mencionado al caso de condiciones no ideales de funcionamiento. En particular, se incorpora un filtro de Kalman en el modelo de actuación sincronizada, considerando que las mediciones disponibles de los estados no son periódicas. Esto plantea el problema de adaptar el

filtro estándar de Kalman de tiempo discreto al caso en estudio, y decidir cuándo aplicar las fases de predicción y corrección. El beneficio inmediato es que las actuaciones sincronizadas eliminan los efectos nocivos de la incertidumbre en el tiempo y el filtro de Kalman mejora el rendimiento ante condiciones de incertidumbre en las mediciones y en el proceso.

**Palabras Claves**— Sistemas de control en red, control en tiempo real, retardo de tiempo variable, sincronización en la actuación, filtro de Kalman.

### I. INTRODUCCIÓN

EN los sistemas de control en red (NCSs, Networked Control Systems) la red de comunicaciones es un componente fundamental que soporta las interacciones entre los nodos de sensado, control y actuación [1]. El propósito de la red es entregar mensajes de control de manera confiable, segura y puntual, siendo este último el aspecto más crítico en NCSs ya que los retrasos variables impiden el funcionamiento exitoso de los lazos de control [2].

Para mitigar los efectos negativos de los retrasos variables, los resultados en [3] se enfocan en el supuesto de que los lazos de control se sincronizan en los instantes de muestreo, suponiendo así el análisis y diseño de controladores con muestreo periódico. Además, a menudo se considera que los retrasos son constantes en relación con los instantes de muestreo; si los retrasos varían en el tiempo, no se pueden aplicar modelos de control simples.

En [4] se propone un enfoque para analizar y diseñar NCSs sincronizando las operaciones de control en los instantes de actuación, reemplazando el muestreo periódico por la actuación periódica. El beneficio de este enfoque es que los efectos dañinos que tienen los retrasos variables sobre la estabilidad/rendimiento de los lazos de control, se eliminan si el controlador está diseñado de acuerdo con las reglas propuestas. Sin embargo, su operación se basa en predicciones calculadas a partir de cada muestra. Si las muestras tienen ruido, su operación rápidamente se ve deteriorada.

En el presente trabajo se extiende el modelo de NCSs sincronizados en actuación en [4] al escenario en el que, además de retardos variables, existen mediciones ruidosas y perturbación en el proceso. Se sabe bien que los sistemas están alterados por perturbaciones y que los sensores en un lazo de control no proporcionan lecturas exactas de las cantidades deseadas [5]. En estos casos, el filtrado es deseable ya que

C. X. Rosero, I. Iglesias, L. Tobar Subía y M. Gavilanez pertenecen a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio 5-21, CP 100105, Ibarra-Ecuador. (email: {cxrosero, iiglesias, lmtobarsubia, magavilanes}@utn.edu.ec).

C. Vaca está con la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Técnica del Norte, Av. 17 de Julio 5-21, CP 100105, Ibarra-Ecuador. (email: cvaca@utn.edu.ec).

elimina el ruido de las señales mientras conserva la información útil. Se ha demostrado que el filtro de Kalman [6] es una herramienta valiosa para inferir la información faltante de mediciones indirectas y ruidosas.

La contribución del presente trabajo es integrar un filtro de Kalman en el modelo de sincronización de NCSs en instantes de actuación. El enfoque estándar para la implementación de un filtro de Kalman de tiempo discreto asume muestreo y actuación estrictamente periódicos. Sin embargo, en el modelo de sincronización de NCSs en instantes de actuación, las mediciones realizadas no son periódicas. Esto plantea el problema de adaptar el filtro estándar de Kalman al caso de muestreo irregular, y decidir cuándo aplicar las fases de predicción y de corrección, requiriendo un filtro de Kalman asíncrono. Se presenta una estrategia de implementación y se analiza su rendimiento de control a través de simulaciones de tiempo real.

La aplicación de las técnicas de Kalman para sistemas con diversos tipos de muestreo no periódico se puede encontrar en la literatura para sistemas de control de velocidades múltiples [7], o para sistemas de control basados en eventos [8]. Sin embargo, ninguno de ellos se aplica al problema abordado en este trabajo.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La Sección II introduce los preliminares sobre NCSs. La Sección III presenta los aspectos teóricos del filtro de Kalman y la nueva estrategia para implementarlo en NCSs sincronizados en instantes de actuación. La Sección IV describe la configuración de las simulaciones y los resultados. Finalmente, la Sección V concluye el artículo.

## II. SISTEMAS DE CONTROL EN RED

### A. Modelo estándar

Considere un sistema lineal invariable (LTI, Linear-Time Invariant), en tiempo continuo, gobernado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  y  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  son los estados y señales de entrada respectivamente,  $A_c \in \mathbb{R}^{n \times n}$  y  $B_c \in \mathbb{R}^{n \times m}$  son las matrices que describen la dinámica del sistema, y  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  es la matriz de salida.

Sea  $t_k \in \mathbb{R}$  la representación de los instantes de muestreo donde  $k \in \mathbb{N}$  es el número de muestra discreta, los valores que separan dos instantes consecutivos se llaman intervalos de muestreo,  $h_k$ . Los instantes de muestreo y los intervalos de muestreo se relacionan entre sí a través de:

$$h_k = t_{k+1} - t_k \quad (2)$$

En muestreo periódico,  $h_k$  es constante para todos los  $k$ , siendo  $h$  el período de muestreo.

A través de técnicas habituales de discretización, estableciendo:

$$A(h) = e^{A_c h} \quad (3)$$

$$B(h) = \int_0^h e^{A_c(h-t)} dt B_c \quad (4)$$

la dinámica (1) puede ser equivalentemente descrita por el siguiente sistema LTI discreto, así;

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A(h)x_k + B(h)u_k \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (5)$$

siendo  $x_k = x(t_k)$  el estado muestreado en  $t_k$ .

Para la operación en lazo cerrado de (5), la entrada  $u_k$  puede ser reemplazada por el comando de control, como sigue:

$$u_k = Lx_k \quad (6)$$

donde  $L \in \mathbb{R}^{m \times n}$  es la ganancia de retroalimentación de estados obtenida usando métodos de diseño de control estándar en base a las matrices  $A(h)$  y  $B(h)$  [9].

### B. Modelo subyacente en NCS

En la Fig. 1 se muestra una arquitectura común para un solo lazo de control en un NCS, donde los nodos sensor, controlador y actuador intercambian datos a través de mensajes de red. Se pueden identificar cinco retrasos de tiempo: en el sensor,  $\tau_s$ , entre el sensor y el controlador,  $\tau_{sc}$ , en el controlador,  $\tau_c$ , entre el controlador y el actuador,  $\tau_{ca}$ , y en el actuador,  $\tau_a$ . El retardo acumulado de entrada/salida (E/S) dentro de cada periodo de muestreo  $h$  viene dado por:

$$\tau = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} \quad (7)$$

donde  $\tau_{sc}$  y  $\tau_{ca}$  dependen de la red de comunicación,  $\tau_c$  depende del algoritmo de control y del hardware del nodo de procesamiento (controlador). En esta caracterización se asume que las operaciones de sensado y actuación no agregan una sobrecarga de sincronización significativa, por lo tanto, se considera  $\tau_s = \tau_a = 0$ . Sin embargo, si su sobrecarga no es despreciable, estos retrasos se pueden agregar a (7).

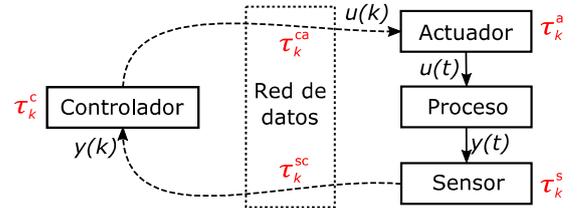


Fig. 1. Arquitectura de un sistema de control en red (los retardos se muestran en rojo)

El modelo del sistema en (5) se puede ampliar para hacer frente a un retraso de tiempo que modela una latencia de E/S causada por el cálculo del algoritmo de control y/o por la inserción de una red de comunicaciones, como en el caso de NCSs. El modelo estándar [9] que incorpora un retraso  $\tau \leq h$  es:

$$x_{k+1} = A(h)x_k + B(h-\tau)B(\tau)u_{k-1} + B(h-\tau)u_k \quad (8)$$

que a menudo es considerado como el modelo de control subyacente para diseño y análisis de NCSs. Supone una referencia de tiempo dada por los instantes de muestreo con un retraso de tiempo fijo,  $\tau$ , desde el muestreo,  $t_{k,s}$ , hasta la actuación,  $t_k$ , cuando se ejecuta la acción de control,  $u_k = f(x_k)$ . En la Fig. 2, los cuadros con *S*, *C* y *A* representan la ejecución del código en el sensor, controlador y actuador; los cuadros con 1 y 2 representan los mensajes requeridos en cada operación de lazo cerrado. Una vez que se toma una muestra, el comando de control se calcula asumiendo que la siguiente muestra ocurrirá después de  $h$  unidades de tiempo, es decir, un periodo de muestreo, y asumiendo que la actuación ocurrirá después de  $\tau$  unidades de tiempo, es decir, un retraso. La operación de este modelo generalmente se viola en los lazos de control en red porque existen retardos variables que insertan imprevisibilidad temporal desde el muestreo hasta la actuación.

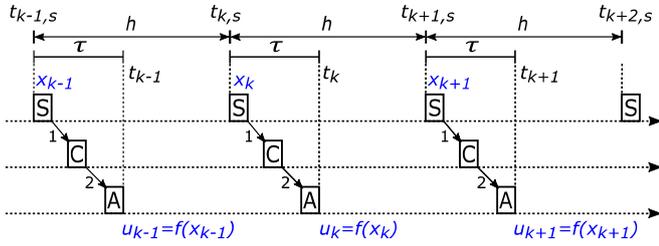


Fig. 2. Operación del modelo de control subyacente en NCS

### C. Sistemas de control en red con sincronización en instantes de actuación

En [4] se propone un modelo equivalente a (8) pero sincronizado en los instantes de actuación, donde el periodo de muestreo,  $h$ , es el tiempo transcurrido entre instantes de actuación consecutivos,  $t_{k-1}$  y  $t_k$ . Dentro de este intervalo, se muestrea el estado del sistema,  $x_{k,s} \in (t_{k-1}, t_k)$ , y se registra el tiempo de muestreo,  $t_{k,s}$ . La diferencia entre el tiempo de muestreo y el tiempo de actuación subsecuente:

$$\tau_k = t_k - t_{k,s} \quad (9)$$

es usada para estimar el estado en el instante de actuación,  $\hat{x}_k$ , tal como:

$$\hat{x}_k = A(\tau_k)x_{k,s} + B(\tau_k)u_{k-1} \quad (10)$$

Finalmente, usando  $\hat{x}_k$  el comando de control es calculado como:

$$u_k = L\hat{x}_k \quad L \in \mathbb{R}^{l \times n} \quad (11)$$

donde  $L$  es la ganancia de control original en (6). El comando  $u_k$  se aplica a la planta por interrupciones de hardware cada instante de actuación y se mantiene constante a lo largo de cada periodo de muestreo. Además, no se requiere que las muestras sean periódicas porque  $\tau_k$  en (9) puede variar en cada operación de lazo cerrado.

Este enfoque basa su funcionamiento en mediciones de

tiempo absoluto y requiere de sincronización precisa del reloj de cada uno de los nodos presentes en la red. Es así que para la implementación sobre microcontroladores de bajo costo se puede usar el protocolo PTP IEEE 1588, explicado en detalle en [10].

En la Fig. 3 se ilustra la operación del enfoque descrito en (9)-(11), que comprende mediciones distribuidas de tiempo absoluto y mensajes de control. Los cuadros con *A*, *S* y *C* representan la ejecución del código en el actuador, sensor y controlador, respectivamente. Los cuadros con 1, 2 y 3 representan los tres mensajes requeridos en cada operación de lazo cerrado. El nodo actuador, después de aplicar a la planta la señal de control,  $u_{k-1}$ , calcula el siguiente instante de actuación,  $t_k$ , que se envía al sensor (mensaje 1). El sensor al recibir este mensaje toma una muestra desde la planta,  $x_{k,s}$ , y registra el tiempo de muestreo absoluto,  $t_{k,s}$ . Este último, junto con  $t_k$ , se usa para calcular  $\tau_k$ . Tanto  $x_{k,s}$  como  $\tau_k$  se envían al nodo controlador (mensaje 2). Al recibir este mensaje, el nodo controlador estima el estado de la planta,  $\hat{x}_k$ , que se aplicará en  $t_k$ , según (10), y calcula el comando de control  $u_k = f(\hat{x}_k)$ , según (11). Este comando se envía al actuador (mensaje 3), que lo aplicará a la planta en el instante de actuación sincronizada,  $t_k$ .

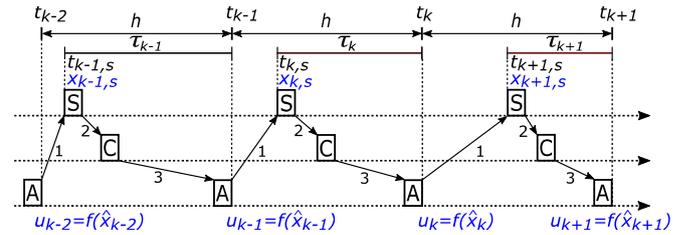


Fig. 3. Operación del modelo de control sincronizado en actuación

El control en red con sincronización en instantes de actuación puede ser implementado sin dificultad en la práctica. Por ejemplo, en [4] se presenta un conjunto de experimentos implementados sobre microcontroladores de bajo costo dentro de una red de área de controlador (CAN, Controller Area Network). Sin embargo, su operación confía en predicciones calculadas en base a cada muestra,  $x_{k,s}$ . Si las muestras contienen ruido, el rendimiento rápidamente se ve deteriorado.

## III. FILTRO DE KALMAN SOBRE SISTEMAS DE CONTROL EN RED SINCRONIZADOS EN ACTUACIÓN

### A. Filtro de Kalman para sistemas con ruido

Previamente se modela a (1) como un sistema lineal estocástico que incluye la perturbación en el proceso  $w_k \in \mathbb{R}^n$  y el ruido de medición  $v_k \in \mathbb{R}^p$ , tal como en:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (12)$$

El filtro de Kalman aplicado a una planta controlada en tiempo discreto proporciona una estimación óptima de sus estados. La información que usa proviene de dos fuentes:

desde mediciones hechas a través de los sensores y desde estimaciones realizadas usando el modelo del sistema. Mezcla estos dos recursos de información de manera óptima considerando las descripciones probabilísticas de su exactitud, es decir, la precisión de los sensores y del modelo. En consonancia con lo anterior, se pueden distinguir dos etapas: predicción y corrección.

1) *Etapa de predicción*: se realiza la estimación a priori del estado del proceso partiendo de una estimación previa usando el modelo del sistema, así:

$$\hat{x}_{k+1}^- = A\hat{x}_k + Bu_k \quad (13)$$

donde  $A$  y  $B$  describen la dinámica del sistema, tal como en (12),  $\hat{x}_k$  representa la estimación a posteriori del estado, mientras que  $u_k$  es la entrada actual. La estimación a priori del error de covarianza es:

$$P_{k+1}^- = AP_k A^T + Q \quad (14)$$

donde  $P_k$  representa la estimación a posteriori del error de covarianza, y  $Q$  es el valor constante de covarianza de la perturbación en el proceso.

2) *Etapa de corrección*: se hace una estimación a posteriori para refinar la predicción, en base a mediciones tomadas con los sensores. Esta estimación se usa en la siguiente etapa de predicción. La siguiente ganancia de Kalman es:

$$K_{k+1} = CP_{k+1}^- (CP_{k+1}^- C^T + R)^{-1} \quad (15)$$

donde  $R$  representa el valor constante de covarianza del ruido en los sensores. La estimación a posteriori del siguiente estado es:

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (y_k - C\hat{x}_{k+1}^-) \quad (16)$$

donde  $y_k$  representa la salida medida en el sistema y  $C$  define la ganancia constante de medición, ambas en (12). Finalmente, la estimación a posteriori del error de covarianza es:

$$P_{k+1} = P_{k+1}^- - CK_{k+1} P_{k+1}^- \quad (17)$$

### B. Problemas de integración del filtro de Kalman sobre NCSs sincronizados en actuación

Esta integración plantea dos problemas con respecto al tiempo de muestreo.

El primer problema consiste en que en el modelo se toman muestras en los instantes  $\{\dots, t_{k-1,s}, t_{k,s}, t_{k+1,s}, \dots\}$  y por lo tanto el muestreo es aperiódico, ya que el sincronismo con período  $h$  se considera en los instantes de actuación  $\{\dots, t_{k-1}, t_k, t_{k+1}, \dots\}$ . Sin embargo, la etapa de corrección del filtro de Kalman debe ser realizada cada tiempo de muestreo ya que requiere de una actualización de la medición de los estados de la planta.

El segundo problema radica en que los estados en los instantes de actuación en (10) se estiman en función de la dinámica que depende de  $\tau_k$  en (9), que es la diferencia entre el tiempo de muestreo y el siguiente tiempo de actuación. No

obstante, el filtro de Kalman realiza estimaciones y predicciones basadas en la dinámica que se encuentra en función del tiempo de muestreo.

### C. Integración del filtro de Kalman sobre sistemas de control en red sincronizados en actuación

La propuesta de integración se divide en dos fases.

1) *De anterior actuación  $t_{k-1}$  a actual muestreo  $t_{k,s}$* : se aplican tanto la fase de predicción como la de corrección. Primero, el predictor (13)-(14) se transforma en:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k,s}^- &= A(h - \tau_k)\hat{x}_{k-1}^- + B(h - \tau_k)u_{k-1} \\ P_{k,s}^- &= A(h - \tau_k)P_{k-1}^- A(h - \tau_k)^T + Q \end{aligned} \quad (18)$$

luego, el corrector (15)-(17) se reformula como:

$$\begin{aligned} K_{k,s} &= CP_{k,s}^- (CP_{k,s}^- C^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_{k,s} &= \hat{x}_{k,s}^- - K_{k,s} (y_{k,s} - C\hat{x}_{k,s}^-) \\ P_{k,s} &= P_{k,s}^- - CK_{k,s} P_{k,s}^- \end{aligned} \quad (19)$$

2) *De actual muestreo  $t_{k,s}$  a actual actuación  $t_k$* : se aplica la fase de predicción (13)-(14), tal como:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= A(\tau_k)\hat{x}_{k,s} + B(\tau_k)u_{k-1} \\ P_k^- &= A(\tau_k)P_{k,s}^- A(\tau_k)^T + Q \end{aligned} \quad (20)$$

Finalmente, la señal de control usa la estimación del estado en el instante de actuación,  $\hat{x}_k^-$ , así:

$$u_k = L\hat{x}_k^- \quad (21)$$

### D. Discusión

En la Fig. 4 se observa la operación del método propuesto. Para el ciclo  $k$ , el nodo controlador calcula la estimación a priori del estado muestreado en la planta,  $\hat{x}_{k,s}^-$ , y además refina esta predicción a través de la estimación a posteriori del mismo estado muestreado,  $\hat{x}_{k,s}$ . Esto capta la evolución de la dinámica a lo largo del período  $(h - \tau_k)$ , desde el anterior tiempo de actuación,  $t_{k-1}$ , hasta el tiempo de muestreo actual,  $t_{k,s}$ .

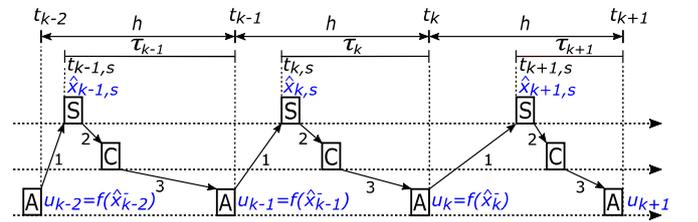


Fig. 4. Operación del modelo de control sincronizado en actuación, integrado el filtro de Kalman

Posteriormente, el nodo controlador realiza la estimación a priori del estado actual,  $\hat{x}_k^-$ , que será usada para calcular la acción de control,  $u_k$ . Esto capta la evolución de la dinámica a lo largo del período  $\tau_k$ , desde la estimación del estado muestreado,  $\hat{x}_{k,s}$ , en el tiempo  $t_{k,s}$ , hasta el tiempo de

actuación actual,  $t_k$ . El pseudocódigo presentado en los Algoritmos 1, 2 y 3 muestran la implementación de este método.

#### IV. SIMULACIONES

Las evaluaciones presentadas en esta sección se centran en el rendimiento de control. Se establece un escenario con perturbación en el proceso, ruido en los sensores y retardos variables de tiempo; se considera una sincronización subyacente de los relojes de cada nodo. Se evalúa un NCS para dos casos de sincronización: en instantes de muestreo y en instantes de actuación.

##### A. Configuración

Para realizar las simulaciones se utiliza *Truetime* [11] que es una herramienta para simular controladores en tiempo real y transmisiones de red. En el modelo básico de simulación de la Fig. 5 se distinguen el proceso implementado en espacio de estados y tres nodos (sensor, controlador y actuador), que emplean kernels de tiempo real. La referencia es proporcionada por un generador de pulsos programable conectado a la entrada analógica del nodo controlador. Es importante notar que, para proporcionar sincronización en los instantes de actuación, la única tarea periódica a ejecutar se encuentra en el nodo actuador.

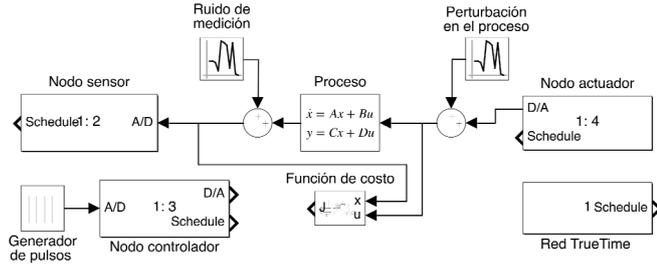


Fig. 5. Modelo de simulación

**Algoritmo 1** Pseudocódigo del nodo actuador [4], sincronizado por  $h$

**Entrada:**  $u_k$

**Salida:**  $t_k$

- 1: espera(interrupción\_cada\_h)
- 2: espera(mensaje\_desde\_controlador)
- 3:  $u_k := \text{lee\_mensaje}()$
- 4: aplica( $u_k$ )
- 5: actualiza( $t_k$ ), en (2)
- 6: envía\_mensaje( $t_k$ , a sensor)

**Algoritmo 2** Pseudocódigo del nodo sensor [4], disparado por mensaje

**Entrada:**  $t_k, t_{k,s}$

**Salida:**  $x_{k,s}, \tau_k$

- 1: espera(mensaje\_desde\_actuador)
- 2:  $t_k := \text{lee\_mensaje}()$
- 3:  $x_{k,s} := \text{estado\_actual}()$
- 4:  $t_{k,s} := \text{tiempo\_actual}()$
- 5: calcula ( $\tau_k$ ), en (9)
- 7: envía\_mensaje( $x_{k,s}, \tau_k$ , a controlador)

**Algoritmo 3** Pseudocódigo del nodo controlador [4] que integra el filtro de Kalman y es disparado por mensaje

**Entrada:**  $x_{k,s}, \tau_k$

**Salida:**  $u_k$

- 1: espera(mensaje\_desde\_sensor)
- 2:  $(x_{k,s}, \tau_k) := \text{lee\_mensaje}()$
- 3: calcula( $\hat{x}_{k,s}^-, P_{k,s}^-$ ), en (18)
- 4: calcula( $\hat{x}_{k,s}, P_{k,s}$ ), en (19)
- 5: calcula( $\hat{x}_k^-, P_k^-$ ), en (20)
- 6: calcula( $u_k$ ), en (21)
- 8: envía\_mensaje( $u_k$ , a actuador)

Para intercambiar información, los nodos están conectados a una red Ethernet (CSMA/CD) implementada a 80 Kbps a través de un bloque de red de comunicaciones. Esta tasa de transferencia provoca latencias pequeñas en  $\tau_{sc}$  y  $\tau_{ca}$ , en relación con el retardo provocado por el algoritmo de control  $\tau_c$ . Esto permite que el retardo E/S,  $\tau$ , pueda ser variado en la simulación, en mayor proporción, a través de  $\tau_c$ . El ruido de medición y la perturbación en el proceso se implementan a través de señales aleatorias distribuidas normalmente (gaussianas). Además, el rendimiento de control es medido a partir de las entradas y salidas de la planta a lo largo del período de simulación ( $t_{sim}$ ); se implementa a través del bloque que contiene la función de costo cuadrático:

$$J = \int_0^{t_{sim}} [x^T(t)Q_e x(t) + u^T(t)R_e u(t)] dt \quad (22)$$

donde las matrices de peso  $Q_e$  y  $R_e$  son iguales a la identidad.

##### B. Planta, controlador y filtro de Kalman

La planta controlada es un doble integrador, un sistema inestable cuya descripción en espacio de estados en tiempo continuo es:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -23.81 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -23.81 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) \end{aligned} \quad (23)$$

Considerando un período de actuación específico de  $h = 100\text{ms}$  y usando un regulador lineal cuadrático (LQR, Linear Quadratic Regulator) con matrices de peso iguales a la identidad, la ganancia óptima del controlador es  $L = [0.6739 \ -1.3424]$ .

El filtro de Kalman considera las covarianzas:

$$\begin{aligned} Q &= E(w \cdot w^T) = 1 \times 10^{-6} \\ R &= E(v \cdot v^T) = \begin{bmatrix} 1 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

donde  $w$  y  $v$  son la perturbación en la planta y el ruido de medición, respectivamente.

### C. Resultados del filtro de Kalman sobre el NCS sincronizado en actuación

El objetivo de este experimento es validar que el método propuesto en la Sección III.C es capaz de estimar los estados del sistema a partir de estados ruidosos. En la Fig. 6 se comparan las señales ruidosas sensadas en la planta con los estados estimados por el filtro de Kalman, el cual elimina eficazmente la incertidumbre.

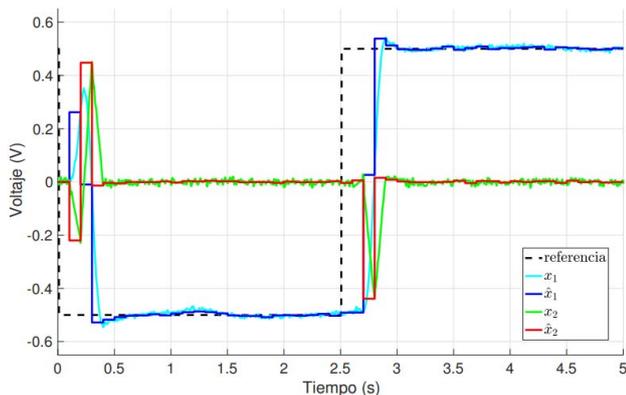


Fig. 6. Señales ruidosas de la planta ( $x_1, x_2$ ) y estados estimados, sin ruido, por el filtro de Kalman ( $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ )

### D. Resultados de la evaluación de rendimiento de control

Para esta evaluación se considera que cada lazo de control presenta variaciones temporales causadas por retardos de tiempo variable de entrada/salida,  $\tau$ , acotados dentro del intervalo 2 a 20 ms. Estas variaciones tienen naturaleza aleatoria y se implementan sobre  $\tau_{cs}$ , para  $\tau_{sc}$  y  $\tau_{ca}$  fijos, en (7). En la Fig. 7 se comparan las respuestas transitorias proporcionadas por la sincronización en muestreo y por la sincronización en actuación ante la existencia de retardos. Las dos respuestas se contrastan con la respuesta de la sincronización en muestreo en un escenario ideal (sin retardos). Se puede notar la efectividad de la actuación sincronizada, tal como se reporta en [4].

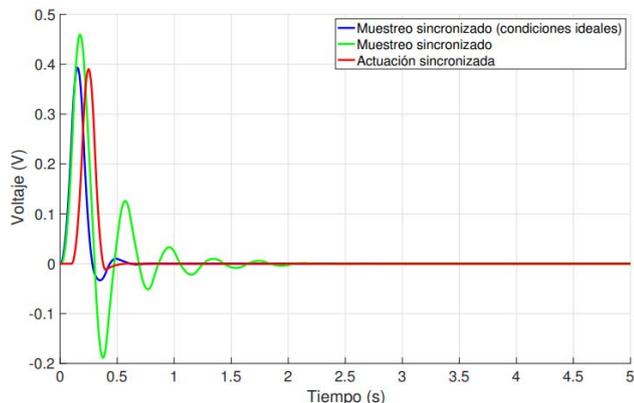


Fig. 7. Respuestas transitorias de los dos tipos de sincronización ante retardos de entrada/salida

En la Fig. 8 se considera un escenario que además de presentar retardos de tiempo, incluye perturbación en el

proceso y ruido en los sensores; también se incluye para efectos de comparación, un escenario ideal. La respuesta transitoria del lazo de control con actuación sincronizada y filtro de Kalman muestra mejor rendimiento que las respuestas de los lazos con muestreo sincronizado y sólo con actuación sincronizada. Es notorio que el transitorio proporcionado por el lazo con filtro de Kalman se acerca más rápidamente al estado estacionario, y que las oscilaciones provocadas por el ruido tienen menor amplitud.

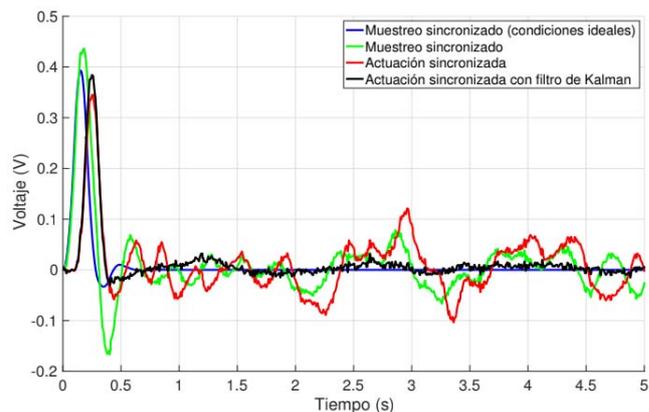


Fig. 8. Respuestas transitorias de los dos tipos de sincronización ante retardos de entrada/salida, ruido en los sensores y perturbación en el proceso

Finalmente, para evaluar el rendimiento del enfoque presentado en este trabajo en comparación con otras implementaciones, se estableció un conjunto de diez escenarios con diferentes referencias, retardos y varianzas en ruidos. Tres implementaciones fueron sometidas individualmente a este conjunto de escenarios: muestreo sincronizado, actuación sincronizada, y actuación sincronizada y filtro de Kalman. El promedio de su costo de control, medido a través de (22), se comparó con el costo de control de la implementación con muestreo sincronizado en condiciones ideales (sin ruido, ni latencia de red). En la Tabla I se evidencian los resultados obtenidos para los cuatro enfoques. Se puede observar que el modelo con actuación sincronizada y filtro de Kalman logró un mayor rendimiento (menor costo) que las otras dos aproximaciones sometidas al mismo conjunto de escenarios, pero menor rendimiento (mayor costo) que el muestreo sincronizado en condiciones ideales.

TABLA I  
RENDIMIENTO DE CONTROL

Implementación	Costo de control promedio
Muestreo sincronizado (condiciones ideales)	1.129
Muestreo sincronizado	1.304
Actuación sincronizada	1.247
Actuación sincronizada y filtro de Kalman	1.202

### V. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado la integración del filtro de Kalman en el modelo de NCS con actuación sincronizada. Los

resultados en simulación han demostrado que este método presenta sus propios beneficios: eliminación de los efectos de los retardos variables y de la incertidumbre. La aplicación de este enfoque hace que la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado converja más rápidamente hacia el estado estacionario, y una vez en él, que las oscilaciones provocadas por la incertidumbre tengan menor amplitud. Como efecto específico, propicia la disminución del costo de control ya que las variaciones de tiempo son absorbidas por el modelo de sincronización en actuación, mientras que la incertidumbre en las medidas y en el proceso es eliminada por el filtro de Kalman. Trabajos futuros se centrarán en analizar la demanda de recursos computacionales de esta aproximación sobre sistemas implementados físicamente.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Tipsuwan y M. Y. Chow, "Control methodologies in networked control systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 10, pp. 1099-1111, Oct. 2003.
- [2] J. Baillieul y P. J. Antsaklis, "Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 9-28, Jan. 2007.
- [3] J. Hespanha, P. Naghshtabrizi y Y. Xu, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, n.o 1, pp. 138-162, Jan. 2007.
- [4] C. Lozoya, P. Martí, M. Velasco y J. M. Fuertes, "Analysis and design of networked control loops with synchronization at the actuation instants," in *The 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, Nov. 2008, pp. 2899-2904.
- [5] P. S. Maybeck, "Stochastic Models, Estimation, and Control," Academic Press, 1979.
- [6] R. E. Kalman, "A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *J. Basic Eng.*, vol. 82, no. 1, pp. 35-45, Mar. 1960.
- [7] W. Li, S. L. Shah, y D. Xiao, "Kalman filters in non-uniformly sampled multirate systems: For FDI and beyond," *Automatica*, vol. 44, no. 1, pp. 199-208, Jan. 2008.
- [8] Y. S. Suh, V.H. Nguyen, y Y. S. Ro, "Modified Kalman filter for networked monitoring systems employing a send-on-delta method," *Automatica*, vol. 43, no. 2, pp. 332-338, Feb. 2007.
- [9] K. J. Aström y Björn Wittenmark, "Computer-controlled systems: theory and design (3 ed.)," Prentice-Hall, 1997.
- [10] Martí, M. Velasco, C. Lozoya y J. M. Fuertes, "Clock Synchronization for Networked Control Systems Using Low-Cost Microcontrollers," Research report ESAT-RR-08-02, Automatic Control Dept., Technical University of Catalonia, Abr. 2008.
- [11] Henriksson, A. Cervin y K.E. Arzén, "TrueTime: Simulation of control loops under shared computer resources," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 35, no 1, pp. 417-422, Jan. 2002.

# Una breve introducción a la electrónica orgánica: celdas solares y transistores

## *A brief introduction to organic electronics: solar cells and transistors*

Dayana C. Morales, Freddy G. Del Pozo

**Abstract**—Responsible innovation in a developing countries should be part of the university culture. Global innovation processes during the last two decades visions a fast development in humanity with promising applications such as portable, wearable, implantable, and even compatible with biological systems electronic devices. Innovation as a culture in different research and development centers have achieved successful and exciting advances in different organic electronic devices such as organic light emitting diodes, organic photovoltaic systems, organic field effect transistors, sensors, and memories. Here, an updated review is carried out on the emerging and innovative field of organic electronics, the focus is first to provide a clear introduction to the field while highlighting its advantages and disadvantages, also here is included two of the main devices which are considered distinguished in the field of organic electronics, such as organic solar cells and organic field-effect transistors. For each of the selected devices in this review, the state-of-the-art is addressed, the basic principle of operation is discussed, and examples are also highlighted, which clearly sets the point to innovative processes. Finally, a discussion is provided with the perspective for the inclusion of an innovative field in the research culture of Ecuador.

**Index Terms**— Organic electronics, organic light emitting diodes, organic solar cells, organic field-effect transistors.

**Resumen**—La innovación responsable en un país en desarrollo debe ser parte de la cultura universitaria. Procesos de innovación mundiales durante las dos últimas décadas presagian un desarrollo vertiginoso en la humanidad con aplicaciones prometedoras como dispositivos electrónicos portátiles, vestibles, implantables e incluso compatibles con sistemas biológicos. La innovación como cultura en distintos centros de investigación y desarrollo han logrado avances exitosos y emocionantes en distintos dispositivos electrónicos orgánicos como los diodos emisores de luz orgánicos, sistemas fotovoltaicos orgánicos, transistores orgánicos de efecto de campo, sensores y memorias. A continuación, se procede a realizar una revisión actualizada sobre el campo emergente y a su vez innovador de la electrónica orgánica, la atención se centra en una introducción clara al campo donde se resalta sus ventajas y desventajas, se incluye una revisión sobre dos dispositivos que aquí se consideran insignes en el campo de la electrónica orgánica, como son las celdas solares orgánicas y los transistores orgánicos de efecto de campo. Para cada uno de los dispositivos seleccionados en esta revisión, se realiza una revisión del estado del arte, el principio básico de

funcionamiento y ejemplos particulares que determinen de manera clara los procesos de innovación. Finalmente, se brinda una discusión con la perspectiva para la inclusión de un campo innovador en la cultura de investigación del Ecuador.

**Palabras Claves**— Electrónica orgánica, celdas solares orgánicas, transistores orgánicos de efecto de campo.

### I. INTRODUCCIÓN

LOS procesos de innovación en el mundo son incesantes y abarcan un enigma al día de hoy. Por un lado, la innovación tecnológica tiene como objetivo el desarrollar prosperidad económica y bienestar en la humanidad, así ha logrado que un gran número de personas tengan mejor salud, vivan con mayor comodidad y más seguros que nunca en la historia. Por otro lado, los procesos de innovación son continuos y alimentan a problemas mundiales complejos como la inequidad en el desarrollo social y problemas medio ambientales. Así, los estudios e iniciativas que son prácticas ya en innovación responsable se centran principalmente en la gobernanza y en los aspectos institucionales del tratamiento responsable de los impactos de la innovación tecnológica [1]. Entonces, en un país en vías de desarrollo es necesario el buscar alternativas de innovación responsable, tentativamente los materiales orgánicos están destinados hoy más que nunca a transformar la industria de bienes de consumo electrónicos [2]. El interés en la electrónica orgánica nace de la habilidad de depositar películas orgánicas en una gran variedad de sustratos [3], y que tal depósito se pueda lograr a un bajo costo de producción [4], ya que dichos sustratos pueden ser vidrio, plástico y finas láminas metálicas, también el interés recae en la facilidad de procesamiento que muestran los compuestos orgánicos [5], [6], así hace que muchos grupos de investigación dediquen sus esfuerzos en sintetizar moléculas orgánicas novedales para tal finalidad [7]–[11].

A partir del año 2009 SCImago publica anualmente dos informes, el SIR World que se enfoca en el análisis de la actividad científica en el mundo [12], y el SIR Iber que estudia, analiza y muestra la actividad científica exclusivamente de Andorra, España, Portugal y los países de Latinoamérica [12]. En ambos informes se detallan en forma de tablas la información del desempeño en investigación, innovación e impacto social.

Los sistemas de electrónica orgánica más avanzados en la actualidad y que ya han llegado a la etapa de comercialización

D. Morales y F. Del Pozo son docentes en la Facultad de Ciencia e Ingeniería de Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, (e-mail: {dc.morales, fg.delpozo}@uta.edu.ec).

son los basados en diodos orgánicos emisores de luz conocidos como OLEDs por sus siglas en inglés. Un progreso muy significativo ha sido realizado en el campo de los transistores orgánicos de efecto de campo (OFETs), y finalmente un inmenso desarrollo ha sido llevado a cabo en el campo de las celdas orgánicas fotovoltaicas (OSCs) [13]–[15]. El reto sobre todas las tecnologías antes mencionadas es lograr mejorar la eficiencia y el rendimiento de los componentes orgánicos, sin embargo, en varias aplicaciones dichos componentes orgánicos ya han excedido los requisitos para su viabilidad, pero siempre se debe mantener el paradigma de la fabricación a bajo costo, y en varios casos las rutas sintéticas escogidas no pueden ser fácilmente escalables, ya que sufren de rendimientos muy bajos. Así, una aplicación exitosa será la que logre conjugar el potencial de la fabricación a bajo costo pero al usar métodos innovadores de fabricación, además que brinde el rendimiento y eficiencia requeridos, para obtener dispositivos confiables, de bajo costo y depositados en superficies relativamente grandes [16].

En 1977 se reportó en la literatura científica un incremento dramático en la conductividad eléctrica del poliacetileno que es un semiconductor polimérico, el cual al ser dopado con iones halogenuro o con pentafluoruro arsénico ( $\text{AsF}_5$ ) mostró dicho incremento en la conductividad que sirvió como un antes y un después en la investigación de polímeros, y el logro fue reportado por Shirakawa y colaboradores [4]. Por tal descubrimiento al grupo de investigadores les mereció el premio Nobel en Química en el año 2000. Luego del mencionado logro los polímeros conjugados han ganado una atención considerable para su aplicación en dispositivos optoelectrónicos debido a sus ventajas en las propiedades mecánicas y ópticas, al mismo tiempo los polímeros conjugados prometen tener gran ventaja al ofertar un bajo costo de fabricación, principalmente al poder ser impresos en la línea de manufactura de los dispositivos [17], [18].

Luego del descubrimiento del primer diodo emisor de luz polimérico (PLED) se esto motivó al estudio del campo de los dispositivos basados en polímeros [19]–[21].

Inicialmente, el foco de investigación fue en el estudio para la fabricación de dispositivos basados en la impresión a chorro de tinta y circuitos integrados para la aplicación en etiquetas de identificación basadas en la radio frecuencia. Los polímeros semiconductores conjugados se volvieron también atractivos para la aplicación en celdas solares orgánicas. De igual manera los polímeros semiconductores son atractivos para la aplicación en transistores orgánicos de efecto de campo [4].

Entonces, los materiales orgánicos como por ejemplo los polímeros conjugados ganaron un gran terreno en el desarrollo de varias aplicaciones, pero si bien es cierto ofertan diversas ventajas, son los enlaces débiles intermoleculares de estos materiales orgánicos una de las tantas características que los hacen atractivos para las distintas aplicaciones electrónicas desarrolladas o visionadas, ya que la misma característica de los enlaces débiles intermoleculares en el estado sólido hace que dichos materiales exhiban propiedades de semiconductores y aislantes. Debido a el estudio de los materiales orgánicos, bien sean estos poliméricos o de

pequeña molécula para aplicaciones electrónicas, se ha logrado profundizar en el conocimiento de las propiedades eléctricas y ópticas de los materiales orgánicos en estado sólido [2], [16].

El depósito de los materiales orgánicos sobre superficies, es de gran interés, así destaca la impresión como uno de los métodos más atractivos, y son las energías de enlace en los Semiconductores Orgánicos (OsCs – por sus siglas en inglés) que son típicamente bajas ( $\sim 10 \text{ kcal mol}^{-1}$ , para referencia, en comparación al Silicio cristalino (c-Si) la energía es de  $\sim 80 \text{ kcal mol}^{-1}$ ) [22], [23], lo que los hace atractivos para aplicaciones electrónicas que sean fabricadas por impresión [23], [24]. Los materiales orgánicos con sus propiedades mecánicas, acopladas con la posibilidad de ser manufacturados en condiciones ambientales, los hacen candidatos perfectos y compatibles con sustratos flexibles como el plástico, lo que hace su posible uso en áreas como la bioelectrónica, tecnologías de las pantallas y electrónicos embebidos en la vestimenta [23].

Debido a la naturaleza propia de la investigación y procesos de innovación, durante los recientes años, radicales orgánicos estables al aire y polímeros radicalarios han ganado la atención debido a sus excelentes propiedades y desempeño en dispositivos orgánicos flexibles, los que incluyen transistores, baterías, diodos emisores de luz y celdas solares. Así que de manera conjunta con miles de moléculas neutras que han sido sintetizadas y aplicadas en el funcionamiento de dispositivos electrónicos flexibles, existe un futuro muy prometedor para la aplicación en la electrónica de los radicales orgánicos que son estables al aire [25].

Desafortunadamente, el potencial de dispositivos activos completamente orgánicos como celdas solares, emisores de luz, y transistores todavía permanecen en el campo de la investigación y no de la comercialización, debido a que los dispositivos totalmente orgánicos sufren aún de deficiencias principalmente en su estabilidad [2], [16].

La electrónica orgánica no es un área austera de investigación, sino todo lo contrario ya que para el desarrollo de la electrónica orgánica deben converger varias ramas del conocimiento. Así, se sugiere a la electrónica orgánica que pueda ser considerada como una rama productora de innovación responsable y que sea considerada como tal principalmente para un país en desarrollo como lo es el Ecuador. Entonces, en este artículo de revisión se promueve la investigación en el área de la electrónica orgánica, por medio del estudio y desarrollo de celdas solares orgánicas (OSC) y transistores orgánicos de efecto de campo (OFET), a continuación, se brindará una revisión de estos dispositivos, donde se muestra de manera sucinta su principio de funcionamiento, y al final se muestra un ejemplo considerado como innovador en cada uno de los casos, de igual manera se pretende tributar a la escasa literatura en castellano que se puede encontrar sobre el tema de la electrónica orgánica.

## II. CELDAS SOLARES ORGÁNICAS

En las pasadas décadas, un amplio incremento en la demanda de combustibles fósiles ha ocurrido, pero su

almacenamiento como el impacto ambiental producido es siempre motivo de debate en la comunidad internacional. Entonces el recolectar energía a partir de la luz que recibe nuestro planeta al usar tecnología fotovoltaica ya que es considerada una de las mejores alternativas para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad. En el informe del Banco Mundial “Potencial de energía fotovoltaica global por país” muestra que el Ecuador dispone de un potencial promedio de 3.0 PVOUT (kWh/kWp), se considera que el máximo potencial promedio mundial es de 3.75 PVOUT (kWh/kWp) [26], entonces se ratifica que la tecnología fotovoltaica puede ser una alternativa atractiva para la generación de electricidad con fuentes limpias y renovables; al conjugar con la electrónica orgánica se incrementa la posibilidad de tener focos de innovación responsable en el sistema de investigación y desarrollo del Ecuador.

Así, de entre las numerosas tecnologías disponibles, la tecnología fotovoltaica (PV, de sus siglas en inglés) para recoger energía solar y transformarla en energía que pueda ser distribuida es una de las tecnologías más limpias y seguras.

Los polímeros conjugados y los polímeros polares son usados de manera típica para producir numerosos dispositivos PV. De los cuales los polímeros conjugados son los más usados para la fabricación de celdas solares orgánicas (OSCs) [15]. A pesar de que las OSCs en función a la eficiencia de conversión energética y de su tiempo de vida útil, no pueden competir todavía con celdas solares inorgánicas de primera y segunda generación, es su flexibilidad, peso ligero, y bajo costo de fabricación lo que las hace atractivas a las celdas solares orgánicas para numerosas aplicaciones [10], [24].

En un campo innovador es mandatorio el analizar la productividad científica del campo, así la Fig. 1 muestra la actividad científica en el campo de las celdas solares orgánicas.

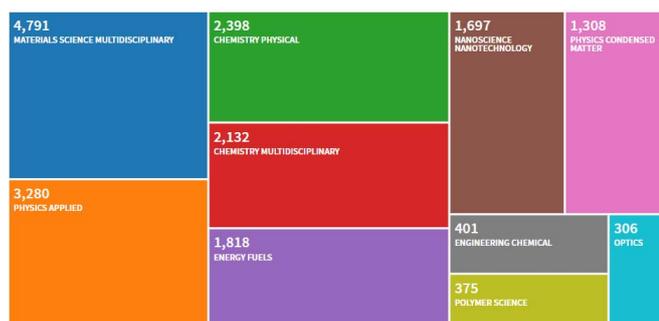


Fig.1. Análisis de publicaciones con el tema “OSC” fuente Web of knowledge

La productividad de publicaciones, para el periodo 2000 – 2020, recae en las categorías de las ciencias de los materiales y la física aplicada con 4791 y 3280, respectivamente. En el año 2020 se generaron 942 publicaciones, y 48592 citaciones. En el año 2019 se generaron 964 publicaciones, y 49027 citaciones. En el 2018 se generaron 923 publicaciones, y 42807 citaciones.

A pesar de los tremendos esfuerzos en investigación sobre celdas solares orgánicas, es indiscutible que las celdas solares

que están basadas en silicio es ya una tecnología madura y lidera el estado-del-arte en lo que a celdas solares respecta. Sin embargo, todas las tecnologías necesarias para la construcción de celdas solares basadas en silicio no son económicas y sobresalen por su complejidad, por ejemplo, la fabricación de silicio cristalino dopado es considerada una tecnología no viable para un país en vías de desarrollo. Lo que las hace no competitivas frente a centrales hidroeléctricas y combustibles fósiles. Al dejar a un lado el problema de la fragilidad del silicio y su rigidez, lo que hace aún más difícil el escalar las celdas solares inorgánicas es la dificultad del procesamiento de obleas de silicio de gran tamaño. Entonces, son por estas razones que las celdas solares orgánicas son tan investigadas durante los pasados 20 años y aún desde más atrás en el tiempo [27].

Los esfuerzos en investigación son motivados por la demanda de energía que la sociedad moderna ejerce, pero al mismo tiempo que la energía sea limpia y de fuentes responsables con el medio ambiente. A más de la cantidad de energía demandada, y que sea obtenida de fuentes renovables, la sociedad moderna exige fuentes de energía que puedan ser fácilmente integradas a los ambientes de trabajo e incluso en sus viviendas, y esto ha ganado su prioridad en las distintas planificaciones de proyectos macro de investigación [27]–[29].

La eficiencia energética es ya un concepto familiar y ha sido extendido al concepto de “energía cero”, que quiere decir edificios y dispositivos electrónicos con sus fuentes de energía incorporadas [10], [29], [30].

El potencial de las celdas solares orgánicas ha sido resaltado ya que es un sistema de conversión de energía solar limpio y considerado como renovable. Esto ha provocado el mejoramiento continuo en su desempeño y desencadenó el interés de la investigación y desarrollo de aplicaciones comerciales. Junto con el concepto de “energía cero” incluso se han llegado a demostrar que las celdas solares orgánicas pueden ser proyectos de biomimesis como el de “árboles solares” que lo demostraron Cao y colaboradores [31].

La Fig. 2 muestra diversos ejemplos de celdas solares orgánicas fabricadas, la Fig. 2(b) se resalta debido a que son celdas solares producidas a escala de laboratorio con técnicas de fabricación de relativo bajo costo, de igual manera dilucida una aplica aplicación a nivel comercial de tal tecnología.

Entonces la implementación de OSCs semitransparentes en distintas locaciones como en un área de descanso, e incluso el diseño de una palmera artificial, con la finalidad de lograr transformar áreas en la arquitectura urbana en unidades biomiméticas multifunción con la capacidad de cosechar energía [2], [29], [34].

Es importante notar que las OSCs pueden ser diseñadas y afinadas para absorber frecuencias específicas como UV, espectro visible, IR-cercano, y que estos nuevos dispositivos con objetivo específico pueden ser complementos de otros dispositivos, como por ejemplo el manejo de dispositivos electrocrómicos que sean capaces de modular el nivel de luz interior de los hogares o lugares de trabajo [35]–[37].

Un esfuerzo sinérgico y sistemático entre la química

orgánica sintética, la ciencia de los materiales y la física de dispositivos es necesario para vencer el reto de disponer celdas solares con alta transparencia y absorción del espectro visible, las mismas que sean compatibles para ser integradas en aplicaciones como invernaderos, ventanas y dispositivos electrónicos inteligentes [29], [38].

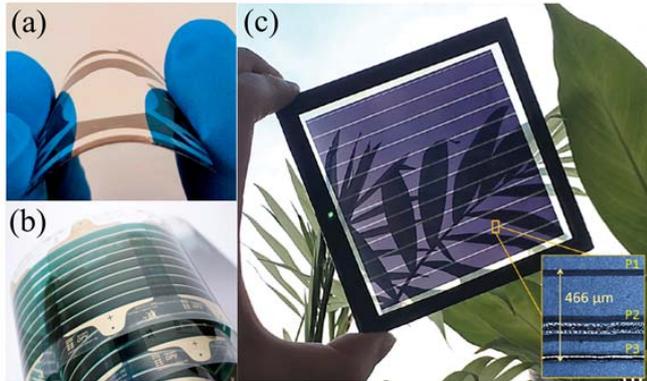


Fig. 2. Celdas solares orgánicas. (a) Fotografía de una celda solar orgánica flexible de 1.6 cm<sup>2</sup> [32]. (b) Celda solar orgánica flexible, libre de ITO, libre de técnicas de fabricación en vacío, módulo fabricado por técnicas de fabricación desarrolladas en la Universidad Técnica de Dinamarca [33]. (c) Celda solar orgánica fabricada con técnicas roll-to-roll [33]<sup>1</sup>

La estructura típica de una OSC consiste en cuatro capas denominadas, ánodo sobre un sustrato transparente, una capa de transporte de huecos (CTH), capa fotoactiva (CFA), capa de transporte de electrones (CTE) y un cátodo, como se muestra en la Fig. 3.

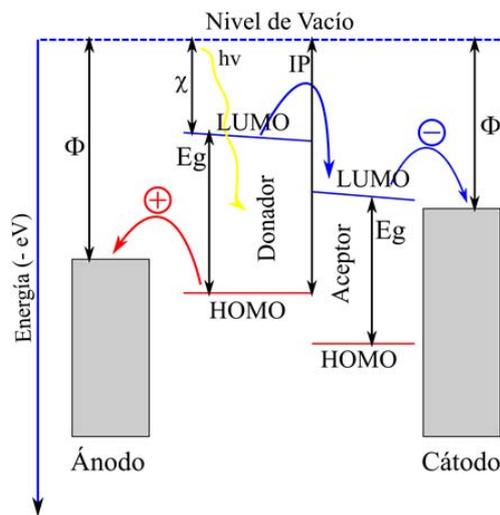


Fig. 3. Conversión de energía solar a electricidad y los niveles de energía, función de trabajo ( $\Phi$ ), afinidad electrónica ( $\chi$ ), espacio de la banda óptica ( $E_g$ ) y potencial de ionización (IP)

<sup>1</sup> Las figuras han sido reproducidas bajo los términos de la Licencia Atribución-NoComercial 3.0 No portada (CC BY-NC 3.0) y corresponden (a) Du, J., Zhang, D., Wang, X., Jin, H., Zhang, W., Tong, B., ... Ren, W. (2021). Extremely efficient flexible organic solar cells with a graphene transparent anode: Dependence on number of layers and doping of graphene. Carbon, 171, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.038> (b) y (c) Gertsen, A. S., Castro, M. F., Søndergaard, R. R., & Andreasen, J. W. (2020). Scalable fabrication of organic solar cells based on non-fullerene acceptors. Flexible and Printed Electronics, 5(1). <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ab5f57>

La capa activa está compuesta por un donador (típicamente polimérico) y un aceptor de electrones (típicamente un derivado de fullereno), entonces, la absorción de la luz solar ocurre en la capa del polímero donador de electrones. Se genera un excitón el cual no es más que un par electrón/hueco que se encuentran juntos por fuerzas coulombicas de atracción, luego ocurre la difusión del excitón al interfaz donador/aceptor. Luego de la difusión ocurre la disociación del excitón. Finalmente, la transferencia de carga de los ya separados huecos y electrones, hacia el ánodo y cátodo, respectivamente. Debe estar claro de que cada paso de los mencionados anteriormente es importante y tributan al desempeño de la OSCs. Las propiedades ópticas y electrónicas de la capa fotoactiva determinan la fotogeneración de los portadores de cargas, la separación y transporte en la OSC [27], [29], [39]–[41].

Los dispositivos fotovoltaicos orgánicos procesados por solución han atraído la atención tanto de la academia, como de la industria. Ya que la síntesis de moléculas pequeñas orgánicas como aceptoras y con el objetivo de que el fullereno esté ausente es de gran interés (NFAs – por sus siglas en inglés), e incluso trabajos en aceptores poliméricos desarrollan nuevas expectativas para las OSCs [15].

Poli (3-hexiltiofeno), P3HT, es uno de los polímeros más usado y estudiado en el campo de las OSCs. De manera histórica ya, el P3HT ha sido mezclado con aceptores basados en el fullereno como es [6,6]-fenil-C<sub>60</sub>- metil ester ácido butírico (PC<sub>60</sub>BM) con eficiencias en la conversión de 4.5%. Incluso los primeros módulos compuestos por OSCs han sido fabricados a partir de sistemas basados en P3HT:fullereno [15], [42].

En la mayoría de los casos reportados en los que estudian OSCs basadas en NFAs, los dispositivos son fabricados por la técnica del recubrimiento por centrifugación, pero este método de fabricación no es escalable [43]–[45]. Pascual y colaboradores han demostrado OSCs basados en P3HT:NFA con una técnica de fabricación escalable, y en la cual también se estudian los disolventes más amigables con el ambiente [15].

La Fig. 4 muestran los materiales orgánicos usados en el estudio para evitar el uso del fullereno, los niveles energéticos de los materiales, y la figura de mérito I-V para la caracterización de los dispositivos fabricados con una técnica compatible con la producción en masa.

Así dispositivos con una eficiencia de conversión energética superior al 5% han sido obtenidos, al mismo tiempo muestran independencia de la temperatura de depósito, y los dispositivos encapsulados han mostrado un desempeño estable de hasta 3000 h [15].

Las celdas solares orgánicas de hetero unión masiva prometen ser una tecnología limpia de generación de energía, esto a un bajo costo y con un gran potencial de manufactura a gran escala. Avances significativos han sido logrados en la síntesis de materiales, optimización de dispositivos, eficiencias de conversión, así el desempeño de las OSCs sigue en evolución a la par con las eficiencias de conversión. Sin embargo, los dispositivos líderes en eficiencia y desempeño

han sido procesados con disolventes halogenados, lo que disminuiría la tendencia de una producción a gran escala, debido al coste medio ambiental que esto podría suponer, lo que constituye una de las barreras más grandes para que se encuentren aplicaciones prácticas de las OSCs. Entonces es necesario continuar en la búsqueda de alternativas, como el reemplazo de los disolventes orgánicos tóxicos con disolventes amigables con el medio ambiente, sin perder de vista el incremento en eficiencia y desempeño que las OSCs requieren [15], [46].

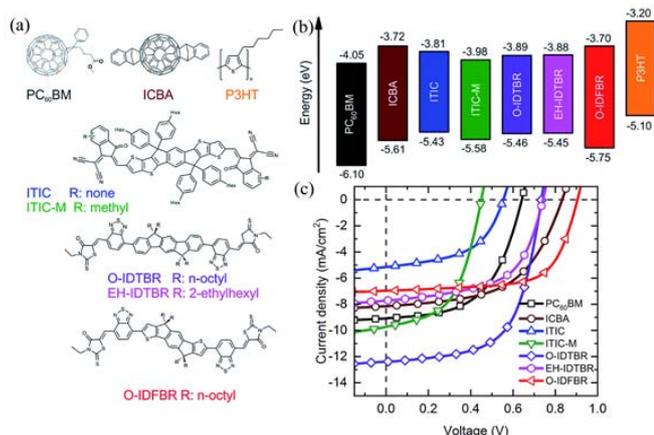


Fig. 4. Propiedades de los materiales estudiados, P3HT, PC60BM, ICBA, ITIC, ITIC-M, O-IDTBR, EH-IDTBR, and O-IDFBR y figura de mérito. (a) Estructuras químicas, (b) niveles energéticos de los materiales, y (c) J-V características, para el P3HT puro y mezclas con siete materiales aceptores como son PC<sub>60</sub>BM, ICBA, ITIC, ITIC-M, O-IDTBR, EH-IDTBR and O-IDFBR [15]<sup>2</sup>

Se tiene claro ya que en la actualidad es necesario buscar fuentes alternativas de energía limpia y renovable, y dentro de ese marco se consideran a las tecnologías fotovoltaicas, en este tenor se encuentra que la empresa Heliatek que con una visión de que para el 2030 dispondrá de la tecnología para que cada edificio pueda ser 100% neutro en términos de energía (energía cero), sino también inteligente con acceso a una fuente independiente de energía eléctrica renovable, la misión muy clara de al combinar un saber-hacer en la síntesis química e ingeniería de procesos para lograr una producción en masa (<https://www.heliatek.com/en/>). La empresa Heliatek se considerará la primera empresa a nivel mundial en producir soluciones de celdas solares orgánicas producidas a escala industrial. Así, en la Fig. 5 se puede visualizar la producción de celdas solares con métodos de fabricación a gran escala, y se muestra en la Fig. 5(a), mientras que la Fig. 5(b) muestra un ejemplo del proceso de control de calidad sobre una celda solar orgánica. Mientras que, la Fig. 5(c) y Fig. 5(d) muestran ejemplos de inclusión de las celdas solares orgánicas a estructuras construidas con anterioridad, lo que mostraría la

<sup>2</sup> Las figuras han sido reproducidas bajo los términos de la Licencia Atribución-NoComercial 3.0 No portada (CC BY-NC 3.0) y corresponden al artículo "Blade coated P3HT: non-fullerene acceptor solar cells: a high-throughput parameter study with a focus on up-scalability" publicado en J. Mater. Chem. A, 2019,7, 20369-20382, <https://doi.org/10.1039/C9TA07361B>, por Enrique Pascual-San-José et al. [15]

posibilidad de que la tecnología sea fácilmente integrada a edificios construidos en las ciudades.

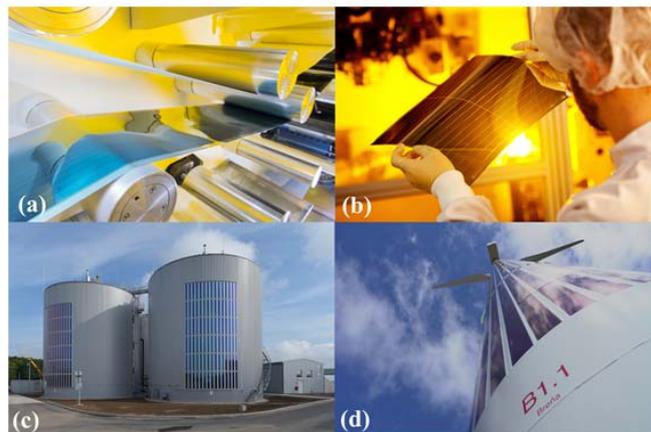


Fig. 5. Producción comercial de celdas solares orgánicas. (a) Producción a escala comercial mediante una producción roll-to-roll, (b) Control de calidad y producción, (c) Inclusión de celdas solares orgánicas en las estructuras de silos de almacenamiento, (d) Inclusión de celdas solares orgánicas en las estructuras de físicas de molinos de viento. Los autores expresan que todas las figuras son reproducidas con el permiso estricto de Heliatek (keliatek.com), y los derechos de autor corresponden (a) y (b) Heliatek, (c) Innogy y (d) Acciona

Para un país en desarrollo como el Ecuador, es imperativa la aplicación de políticas públicas para fortalecer la investigación, que alimente la innovación responsable, para lograr un impacto social significativo que promueva la equidad en la sociedad, con miras siempre a mantener un equilibrio con la naturaleza al disponer tecnologías renovables y amigables con el medio ambiente, como son las tecnologías fotovoltaicas entre ellas las celdas solares orgánicas.

### III. TRANSISTORES ORGÁNICOS DE EFECTO DE CAMPO

Los semiconductores han sido estudiados desde los años 40, pero no ha sido hasta los años recientes en que se han encontrado aplicaciones para dichos materiales, aplicaciones como transistores orgánicos de efecto de campo (OFETs – por sus siglas en inglés) [47].

Como en los semiconductores tradicionales e inorgánicos, los materiales orgánicos pueden funcionar como tipo-p, o tipo-n. En los semiconductores tipo-p la mayoría de los portadores de carga son huecos, mientras que en los de tipo-n la mayoría de los portadores de carga son electrones. El primer semiconductor estudiado y explotado científicamente fue el pentaceno [47]–[49].

OFETs que se han basado en polímeros conjugados, oligómeros, anillos aromáticos fusionados, como mezclas de semiconductores con polímeros aislantes han sido visionados como alternativas a los tradicionales transistores que encontramos en todos los dispositivos electrónicos que son bienes de consumo. Debido a la baja movilidad que muestran los materiales orgánicos, todavía no pueden ser rivales en ese aspecto a los transistores construidos a partir de silicio cristalino u otros materiales inorgánicos cristalinos. Por ende, hasta el momento los OFETs no son candidatos para

aplicaciones que se requieran altas velocidades de conmutación. Sin embargo, las características tan únicas de procesamiento que se visionan sobre los OFETs sugieren que serán excelentes candidatos para aplicaciones innovadoras en el área de la electrónica [22], [50]–[53].

Al realizar una búsqueda en Web of Knowledge con “Organic field-effect transistor” en el campo de título, se detectaron 2875 publicaciones en los últimos 20 años, que se encuentran distribuidas en las categorías que se muestran en la Fig. 6, el 2020 cerró con 163, el 2019 con 204, y el 2018 con 210.



Fig. 6. Análisis de publicaciones con el tema “OFET” fuente Web of knowledge

Es importante notar en la Fig. 6 que física aplicada es la categoría que lidera el estudio de los OFETs, muy de cerca le sigue la Ciencia de los Materiales con un total de 1455 artículos producidos en los últimos 20 años.

El transistor de efecto de campo es un dispositivo de tres terminales, la fuente, el sumidero y la puerta. En un OFET la corriente fluye entre los dos terminales, la fuente y el sumidero, dicho flujo de corriente es controlado al aplicar un voltaje en el tercer terminal conocido como puerta. El principio básico de operación se muestra en la Fig. 7, en la cual en la Fig. 7(a), Fig. 7(c) se muestra sus estados apagado y encendido, respectivamente, mientras que en la Fig. 7(b) se muestra un estado de acumulación de cargas previo a la aplicación de voltaje en la puerta [51], [54], [55].

Desde el punto de vista de los materiales constitutivos de un OFET, este se compone de tres partes, así un conductor metálico o un material orgánico que se encuentre dopado, un material aislante y un semiconductor orgánico conjugado tipo  $\pi$  que puede ser polimérico, de molécula pequeña o un material compuesto.

El nivel de Fermi (EF) de los metales se encuentra localizado en medio de la energía de los orbitales HOMO (orbital molecular ocupado de mayor energía) y LUMO (orbital molecular vacío de menor energía) del semiconductor orgánico. Cuando se aplica un voltaje (o tensión) al electrodo de puerta se modifican los niveles de energía, y se dice que se modula la conductividad del dispositivo.

Entonces, para un semiconductor tipo-p, un voltaje negativo aplicado en la puerta influye en los niveles HOMO y LUMO desestabilizándolos y los desplaza hacia arriba con respecto al nivel de Fermi del material que constituye los electrodos (fuente y sumidero). En el caso de que el HOMO resuene con

el EF, podrá darse el flujo de cargas móviles en este caso huecos, y esto ocurre entre el HOMO y el material del electrodo. Lo contrario ocurrirá para un OFET fabricado con un semiconductor tipo-n, así, un voltaje o tensión positiva se aplica al electrodo puerta para lograr desplazar los orbitales HOMO y LUMO hacia abajo, con la final de que el LUMO entre en resonancia con el nivel de Fermi del material que compone los electrodos, de ocurrir existirá el flujo de electrones desde los electrodos hacia el LUMO del semiconductor tipo-n. Sin embargo, es preciso notar que los materiales capaces de transportar tanto huecos como electrones se denominan semiconductores ambipolares [54], [56], [57].

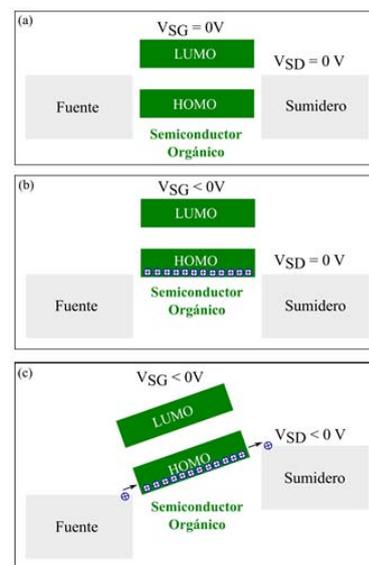


Fig. 7. Esquema de los niveles de energía de los electrodos y el semiconductor (tipo-p) en un dispositivo OFET

En un OFET la movilidad de los portadores de carga,  $\mu$ , se define como la velocidad de los portadores de carga por unidad de campo eléctrico, además de la movilidad, la tensión umbral,  $V_{TH}$ , es un parámetro fundamental a la hora de investigar un OFET, y la tensión umbral se define como el voltaje (tensión) mínimo(a) que hay que aplicar al electrodo de la puerta para formar el canal conductor en el material orgánico semiconductor [54], [55].

La fabricación de OFETs está en continua evolución, y es un campo de investigación muy activo. Los primeros resultados de semiconductores fueron obtenidos por medio de la evaporación del disolvente de una gota de solución del semiconductor, dicha gota fue depositada sobre una superficie plana típicamente un sustrato con óxido de silicio en su superficie, sin embargo técnicas de evaporación en alto vacío permitieron el estudio de semiconductores en capas delgadas, de este modo se creó la necesidad de diseñar técnicas de depósito de semiconductores de la forma más eficiente posible y que tienda a cubrir la necesidad de implementar un recubrimiento en solución en grandes superficies [59]–[64].

De igual manera que en los OLEDs en los OFETs existe la tendencia de investigar sobre la posibilidad de reemplazar los

materiales inorgánicos de la arquitectura del transistor por materiales orgánicos que sumen a la tendencia investigativa de que los OFETs lleguen a mostrar flexibilidad mecánica y transparencia, así reemplazar el material aislante de los transistores como el óxido de silicio  $\text{SiO}_2$  a un material orgánico como por ejemplo el poli(fluoruro de polivinilideno) (PVDF – por sus siglas en inglés) con el objetivo de poder abandonar las plataformas rígidas del silicio y óxido de silicio en las cuales se investigan los materiales orgánicos como candidatos para la fabricación de los OFETs. De igual manera, el reemplazo de los contactos que típicamente son elaborados con oro, por otros materiales que aporten una ventaja adicional a la arquitectura del OFET [52].

De esta manera OFETs impresos en sustratos flexibles de bajo costo, material aislante como PVDF que es fácilmente procesado en solución, juntamente con un semiconductor de tipo molécula pequeña como el dibenzotetrafulvaleno (DB-TTF) en mezcla con un polímero aislante, pudo ser demostrado por Georgakopoulos y colaboradores [52]. Así, se demuestra que tanto el material aislante y el semiconductor pudieron ser depositados al usar una técnica escalable y realizada a condiciones ambiente. Los dispositivos fabricados con ésta técnica fueron caracterizados al ambiente, con una relación encendido/apagado de  $10^4$ , una movilidad límite y medida en el régimen de saturación del transistor de  $0.2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , y una tensión umbral de  $-2 \text{ V}$ .

En la Fig. 8(a) se muestran las estructuras químicas tanto del semiconductor, del material ligante como el poliestireno y el aislante, de esta manera se demuestra que los materiales compuestos lograr brindar la capacidad de procesamiento a moléculas como del dibenzotetrafulvaleno (DB-TTF) que es un semiconductor demostrado ampliamente, pero en forma de cristal, y al combinarlo con un polímero aislante se logra un material compuesto que logra tener la capacidad de ser procesado en aire y en condiciones de humedad del medio ambiente, lo cual en teoría bajará los costos de fabricación al no necesitar ambientes con condiciones especiales de procesamiento. En la Fig. 8(b) se muestra un sustrato terminado de  $6 \times 6 \text{ cm}$  el cual a simple vista se observa que es transparente, esto muestra avances significativos en la fabricación de OFETs en sustratos de bajo costo, y de igual manera brinda una posibilidad para la futura integración con otros dispositivos orgánicos como los OLEDs o las OSCs. La figura de mérito que se muestra en la Fig. 8(c) es la característica de transferencia de medida hacia adelante y hacia atrás para un OFET de  $L = 50 \mu\text{m}$ ,  $W = 4 \text{ mm}$ , con una tensión entre electrodos de  $-40\text{V}$ . Si bien es cierto de manera típica en un laboratorio de caracterización de transistores se mide la característica de transferencia, es la figura de mérito de salida la que proporciona información real si las características de un transistor existen, así en Fig. 8(d) se muestran las características de salida para un barrido de voltajes de puerta desde  $0 \text{ V}$  hasta  $-40\text{V}$  con  $-5 \text{ V}$  como tamaño de paso, en la cual se observa claramente la modulación de la tensión aplicada en el electrodo de puerta, a mayor tensión mayor amplitud en el canal de transporte por ello permite un mayor flujo de huecos en el semiconductor.

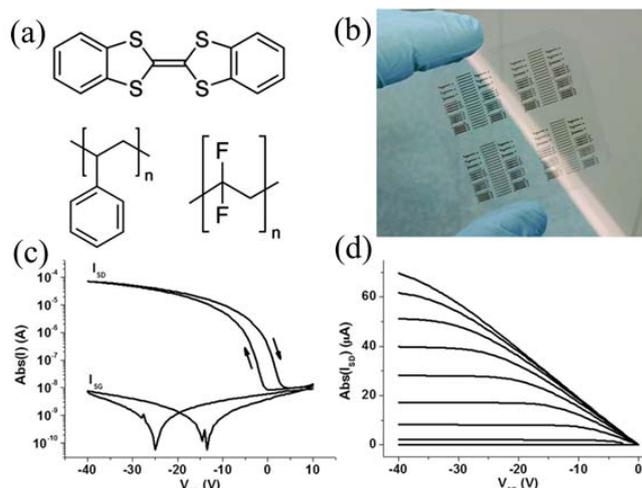


Fig. 8. (a) Estructuras químicas de los materiales usados DB-TTF, PS, PVDF (b) Fotografía de un sustrato terminado de  $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$  (c) Característica de transferencia de medida hacia adelante y hacia atrás para un OFET de  $L = 50 \mu\text{m}$ ,  $W = 4 \text{ mm}$ , con una tensión entre electrodos de  $-40\text{V}$ . (d). Características de salida para un barrido de voltajes de puerta desde  $0 \text{ V}$  hasta  $-40\text{V}$  con  $-5 \text{ V}$  como tamaño de paso [52]<sup>3</sup>

Es importante notar que la investigación sobre la fabricación de OFETs en sustratos flexibles y transparentes, es creciente, así Lai y colaboradores [13] demostraron la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo sobre un sustrato plástico de tereftalato de polietileno (PET), con una capa de Parileno C como aislante. El material compuesto como semiconductor es una mezcla de 6, 13-bis(triisopropilsililetinil) pentaceno (TIPS-PEN) con poliestireno, que da cabida a la investigación de flexibilidad y estrés mecánico sobre OFETs fabricados en sustratos flexibles, con la finalidad a futuro poder integrar con otros dispositivos que requieran la característica de ser fabricados en sustratos flexibles.

En todos los casos se denota la capacidad de innovación conjugada con investigación, y que es muy importante que en países en vías de desarrollo se fomenten prácticas de innovación responsable con miras de lograr obtener el registro de patentes, de este modo es vital el revisar temas de vanguardia como la electrónica orgánica y de entre sus aplicaciones los transistores de efecto de campo orgánicos, ya que la investigación de estos dispositivos al ser novel a nivel mundial pueden fomentar espacios de logros científicos para distintos laboratorios a nivel del Ecuador.

#### IV. DISCUSIÓN

Los dispositivos orgánicos que se detallan en el presente artículo de revisión son fruto de un campo muy activo de investigación con más de 5000 artículos científicos producidos en los últimos 20 años y los que han generado más de 50000 citas en el mismo periodo de tiempo. La electrónica

<sup>3</sup> Las figuras han sido reproducidas bajo los términos de la Licencia Atribución-NoComercial 3.0 No portada (CC BY-NC 3.0) y corresponden al artículo "Flexible organic transistors based on a solution-sheared PVDF insulator" publicado en J. Mater. Chem. C, 2015,3, 12199-12202, <https://doi.org/10.1039/C5TC02488A>, por Georgakopoulos *et al* [53]

orgánica tiene miras a tributar a una innovación responsable, ya que el campo de investigación es amplio y va desde la síntesis química hasta la física de dispositivos y cruza por la ingeniería de procesamiento, así incorpora varias aristas de investigación. Los hallazgos encontrados en los distintos artículos revisados denotan que, en todos los casos como los transistores orgánicos de efecto de campo, y las celdas solares orgánicas, se pretende incorporar tecnologías de producción en masa, las que muestren un bajo costo de producción, al tratar de crear dispositivos 100% orgánicos. La implicación con el presente trabajo a más de sumar a la escasa literatura sobre electrónica orgánica en el lenguaje español, se centra en brindar de una forma cohesiva la información sobre electrónica orgánica para considerar la implementación de nuevas líneas de investigación en las distintas universidades ecuatorianas con la finalidad de propender al desarrollo de la investigación, la aplicación rumbo a la innovación responsable y con el objetivo de conseguir el máximo impacto social posible. Para que se logre sumar al objetivo de avanzar tecnológicamente como instituciones de educación superior ecuatorianas.

#### RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato por el financiamiento, a la Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) de la Universidad Técnica de Ambato por el proyecto “Deposición de capas orgánicas semiconductoras a escala nanométrica para la fabricación de transistores orgánicos de efecto de campo” aprobado con resolución 0911 – CU – P – 2016. De igual manera a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por el financiamiento de becas doctorales. Los autores expresan su agradecimiento a la empresa Heliatek, y su departamento de marketing especialmente a Stephan Kube por la amabilidad de Heliatek en permitirnos usar las fotografías de las celdas solares orgánicas y de sus aplicaciones.

#### REFERENCIAS

[1] W. Reijers, “Responsible innovation between virtue and governance: revisiting Arendt’s notion of work as action,” *Journal of Responsible Innovation*, vol. 7, no. 3, pp. 471–489, Aug. 2020.

[2] S. Forrest, P. Burrows, and M. Thompson, “The dawn of organic electronics,” *IEEE Spectr.*, vol. 37, no. 8, pp. 29–34, Aug. 2000.

[3] X. Liu et al., “Degradable and dissolvable thin-film materials for the applications of new-generation environmental-friendly electronic devices,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, Feb. 2020.

[4] P. W. M. Blom, “Polymer Electronics: To Be or Not to Be?,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 5, no. 6, May. 2020.

[5] A. V. Marquez, N. McEvoy, and A. Pakdel, “Organic Electrochemical Transistors (OECTs) Toward Flexible and Wearable Bioelectronics,” *Molecules*, vol. 25, no. 22, Nov. 2020.

[6] S. Kola, J. Sinha, and H. E. Katz, “Organic transistors in the new decade: Toward n-channel, printed, and stabilized devices,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 50, no. 15, pp. 1090–1120, Feb. 2012.

[7] J. J. Gooding, F. Mearns, W. Yang, and J. Liu, “Self-Assembled Monolayers into the 21st Century: Recent Advances and Applications,” *Electroanalysis*, vol. 15, no. 2, pp. 81–96, Feb. 2003.

[8] A. P. Quist, E. Pavlovic, and S. Oscarsson, “Recent advances in microcontact printing,” *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 381, no. 3, pp. 591–600, Feb. 2005.

[9] K. Fukuda, K. Yu, and T. Someya, “The Future of Flexible Organic Solar Cells,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 25, May. 2020.

[10] A. R. Murad, A. Iraqi, S. B. Aziz, S. N. Abdullah, and M. A. Brza, “Conducting polymers for optoelectronic devices and organic solar cells: A review,” *Polymers*, vol. 12, no. 11, pp. 1–47, Nov. 2020.

[11] T. Sekitani and T. Someya, “Stretchable, large-area organic electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 20, pp. 2228–2246, May. 2010.

[12] F. De-Moya-Anegón, Félix; Herrán-Páez, Estefanía; Bustos-González, Atilio; Corera-Álvarez, Elena; Tibaná-Herrera, Gerardo; Rivadeneyra, “2020 SIR Iber 2020,” Granada, 2020.

[13] S. Lai et al., “Morphology Influence on the Mechanical Stress Response in Bendable Organic Field-Effect Transistors with Solution-Processed Semiconductors,” *Adv. Electron. Mater.*, vol. 4, no. 10, Sep. 2017.

[14] S. Riera-Galindo, F. Leonardi, R. Pfattner, and M. Mas-Torrent, “Organic Semiconductor/Polymer Blend Films for Organic Field-Effect Transistors,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 9, Jun. 2019.

[15] E. Pascual-San-José, X. Rodríguez-Martínez, R. Adel-Abdelaleim, M. Stella, E. Martínez-Ferrero, and M. Campoy-Quiles, “Blade coated P3HT:non-fullerene acceptor solar cells: A high-throughput parameter study with a focus on up-scalability,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 7, no. 35, pp. 20369–20382, Aug. 2019.

[16] S. R. Forrest, “The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic,” *Nature*, vol. 428, no. 6986, pp. 911–918, Apr. 2004.

[17] A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay, and A. Salleo, “Materials and applications for large area electronics: Solution-based approaches,” *Chem. Rev.*, vol. 110, no. 1, pp. 3–24, Jan. 2010.

[18] S. Allard, M. Forster, B. Souharce, H. Thiem, and U. Scherf, “Organic semiconductors for solution-processable field-effect transistors (OFETs),” *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 47, no. 22, pp. 4070–4098, May. 2008.

[19] P. T. Mathew and F. Fang, “Advances in Molecular Electronics: A Brief Review,” *Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 760–771, Dec. 2018.

[20] F. Hermerschmidt, S. A. Choulis, and E. J. W. List-Kratochvil, “Implementing Inkjet-Printed Transparent Conductive Electrodes in Solution-Processed Organic Electronics,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 5, Jan. 2019.

[21] L. Zhou, A. Wang, S. C. Wu, J. Sun, S. Park, and T. N. Jackson, “All-organic active matrix flexible display,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 8, pp. 19–21, Jan. 2006.

[22] C. D. Dimitrakopoulos and P. R. L. Malenfant, “Organic thin film transistors for large area electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 99–117, Jan. 2002.

[23] H. F. Haneef, A. M. Zeidell, and O. D. Jurchescu, “Charge carrier traps in organic semiconductors: A review on the underlying physics and impact on electronic devices,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 8, no. 3, pp. 759–787, Dec. 2019.

[24] A. C. Arias, F. Endicott, and R. A. Street, “Surface-Induced Self-Encapsulation of Polymer Thin-Film Transistors,” *Adv. Mater.*, vol. 18, pp. 2900–2904, Oct. 2006.

[25] L. Ji, J. Shi, J. Wei, T. Yu, and W. Huang, “Air-Stable Organic Radicals: New-Generation Materials for Flexible Electronics?,” *Adv. Mater.*, vol. 32, pp. 1908015, Jun. 2020.

[26] M. Suri et al., “Global Photovoltaic Power Potential by Country,” 2020.

[27] T. A. Amollo, G. T. Mola, and V. O. Nyamori, “Organic solar cells: Materials and prospects of graphene for active and interfacial layers,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 261–288, Jun. 2019.

[28] X. Guan, Z. Xu, and Q. Jia, “Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 243–252, Nov. 2010.

[29] V. V. Brus, J. Lee, B. R. Luginbuhl, S.-J. Ko, G. C. Bazan, and T.-Q. Nguyen, “Solution-Processed Semitransparent Organic Photovoltaics: From Molecular Design to Device Performance,” *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 30, pp. 1900904, May. 2019.

[30] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, “Net zero energy buildings: A consistent definition framework,” *Energy Build.*, vol. 48, pp. 220–232, Feb. 2012.

- [31] W. Cao et al., "'Solar tree': Exploring new form factors of organic solar cells," *Renew. Energy*, vol. 72, pp. 134–139, Jul. 2014.
- [32] J. Du et al., "Extremely efficient flexible organic solar cells with a graphene transparent anode: Dependence on number of layers and doping of graphene," *Carbon N. Y.*, vol. 171, pp. 350–358, Sep. 2020.
- [33] A. S. Gertsen, M. F. Castro, R. R. Søndergaard, and J. W. Andreasen, "Scalable fabrication of organic solar cells based on non-fullerene acceptors," *Flex. Print. Electron.*, vol. 5, no. 1, Jan. 2020.
- [34] T. S. A. Arias, G. Naranjo-Lopez, D. V. H. Molina, and A. H. F. Gomez, "Work in progress: First steps to university metaevaluation: Research, academy, outreach, innovation, and management," in *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, pp. 1854–1857, Apr. 2017.
- [35] N. C. Davy et al., "Pairing of near-ultraviolet solar cells with electrochromic windows for smart management of the solar spectrum," *Nat. Energy*, vol. 2, no. 8, pp. 1–10, Sep. 2017.
- [36] D. J. Milliron, "Ultraviolet photovoltaics: Share the spectrum," *Nat. Energy*, vol. 2, no. 8, pp. 1–2, Jun. 2017.
- [37] S. Duan, X. Ren, X. Zhang, S. Cheng, and W. Hu, "Screen Printing of Flexible Electronic Devices," *Prog. Chem.*, vol. 30, no. 4, pp. 429–438, Apr. 2018.
- [38] G. Wang, M. A. Adil, J. Zhang, and Z. Wei, "Large-Area Organic Solar Cells: Material Requirements, Modular Designs, and Printing Methods," *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 45, pp. 1805089, Nov. 2019.
- [39] S. Yun et al., "New-generation integrated devices based on dye-sensitized and perovskite solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 476–526, Jan. 2018.
- [40] Q. Bao, S. Braun, C. Wang, X. Liu, and M. Fahlman, "Interfaces of (Ultra)thin Polymer Films in Organic Electronics," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 6, no. 1, pp. 1800897, Sep. 2019.
- [41] M. Luo et al., "A new non-fullerene acceptor based on the heptacyclic benzotriazole unit for efficient organic solar cells," *J. Energy Chem.*, vol. 42, pp. 169–173, Jul. 2019.
- [42] Y. Diao et al., "Solution coating of large-area organic semiconductor thin films with aligned single-crystalline domains," *Nat. Mater.*, vol. 12, no. 7, pp. 665–71, Jun. 2013.
- [43] L. Ding, J. Zhao, Y. Huang, W. Tang, S. Chen, and X. Guo, "Flexible-blade Coating of Small Molecule Organic Semiconductor for Low Voltage Organic Field Effect Transistor," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 1, no. c, pp. 1–1, Mar. 2017.
- [44] S. P. Dalawai et al., "A review of spinel-type of ferrite thick film technology: fabrication and application," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 7752–7779, Apr. 2019.
- [45] L. Hong, H. Yao, Y. Cui, Z. Ge, and J. Hou, "Recent advances in high-efficiency organic solar cells fabricated by eco-compatible solvents at relatively large-area scale," *APL Mater.*, vol. 8, no. 12, p. 120901, Nov. 2020.
- [46] G. Horowitz, R. Hajlaoui, R. Bourguiga, and M. Hajlaoui, "Theory of the organic field-effect transistor," *Synthetic Metals*, vol. 101, no. 1-3, pp. 401–404, May 1999.
- [47] G. Horowitz, "Organic field-effect transistors," *Adv. Mater.*, vol. 10, no. 5, pp. 365–377, Jan. 1999.
- [48] D. Braga and G. Horowitz, "High-Performance organic field-effect transistors," *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 14–15, pp. 1473–1486, Apr. 2009.
- [49] M. Mas-Torrent, D. Den Boer, M. Durkut, P. Hadley, and A. P. H. J. Schenning, "Field effect transistors based on poly(3-hexylthiophene) at different length scales," *Nanotechnology*, vol. 15, no. 4, pp. S265–S269, Mar. 2004.
- [50] M. Mas-Torrent and C. Rovira, "Novel small molecules for organic field-effect transistors: towards processability and high performance," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 37, no. 4, pp. 827–838, Feb. 2008.
- [51] F. G. Del Pozo et al., "Single crystal-like performance in solution-coated thin-film organic field-effect transistors," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 26, no. 14, pp. 2379–2386, Sep. 2016.
- [52] S. Georgakopoulos, F. G. del Pozo, and M. Mas-Torrent, "Flexible organic transistors based on a solution-sheared PVDF insulator," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, pp. 12199–12202, Nov. 2015.
- [53] S. Riera-Galindo, A. Tamayo, and M. Mas-Torrent, "Role of Polymorphism and Thin-Film Morphology in Organic Semiconductors Processed by Solution Shearing," *ACS Omega*, vol. 3, no. 2, pp. 2329–2339, Feb. 2018.
- [54] M. Mas-torrent and C. Rovira, "Transistores de efecto de campo basados en moléculas orgánicas (OFETs)," *Investig. Química*, vol. 105, no. 1, pp. 18–24, Dec. 2008.
- [55] M. Mas-Torrent and C. Rovira, "Role of Molecular Order and Solid-State Structure in Organic Field-Effect Transistors," *Chem. Rev.*, vol. 111, no. 8, pp. 4833–4856, Mar. 2011.
- [56] M. Mas-Torrent and C. Rovira, "Tetrathiafulvalene derivatives for organic field effect transistors," *J. Mater. Chem.*, vol. 16, p. 433, Oct. 2005.
- [57] M. Leufgen et al., "High-mobility tetrathiafulvalene organic field-effect transistors from solution processing," *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 9, no. 6, pp. 1101–1106, Dec. 2008.
- [58] R. Parashkov et al., All-organic field effect transistors, *MRS Online Proceedings Library*, vol. 769, no. 31, Dec. 2003.
- [59] E. Becker et al., "All-organic thin-film transistors patterned by means of selective electropolymerization," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 19, pp. 4044–4046, Nov. 2003.
- [60] R. A. L. Silva et al., "α-dithiophene-tetrathiafulvalene-a detailed study of an electronic donor and its derivatives," *Eur. J. Inorg. Chem.*, no. 13, 2013.
- [61] F. G. Del Pozo, S. Galindo, R. Pfattner, C. Rovira, and M. Mas-Torrent, "Deposition of composite materials using a wire-bar coater for achieving processability and air-stability in organic field-effect transistors (OFETs)," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 9568, Aug. 2015.
- [62] C. C. Chang, C. L. Pai, W. C. Chen, and S. A. Jenekhe, "Spin coating of conjugated polymers for electronic and optoelectronic applications," *Thin Solid Films*, vol. 479, no. 1–2, pp. 254–260, May. 2005.
- [63] M. Richard et al., "Large-scale patterning of π-conjugated materials by meniscus guided coating methods," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 275, Jan. 2020.
- [64] S. Riera-Galindo, F. Leonardi, R. Pfattner, and M. Mas-Torrent, "Organic Semiconductor/Polymer Blend Films for Organic Field-Effect Transistors," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 9, pp. 1–20, Jun. 2019.

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

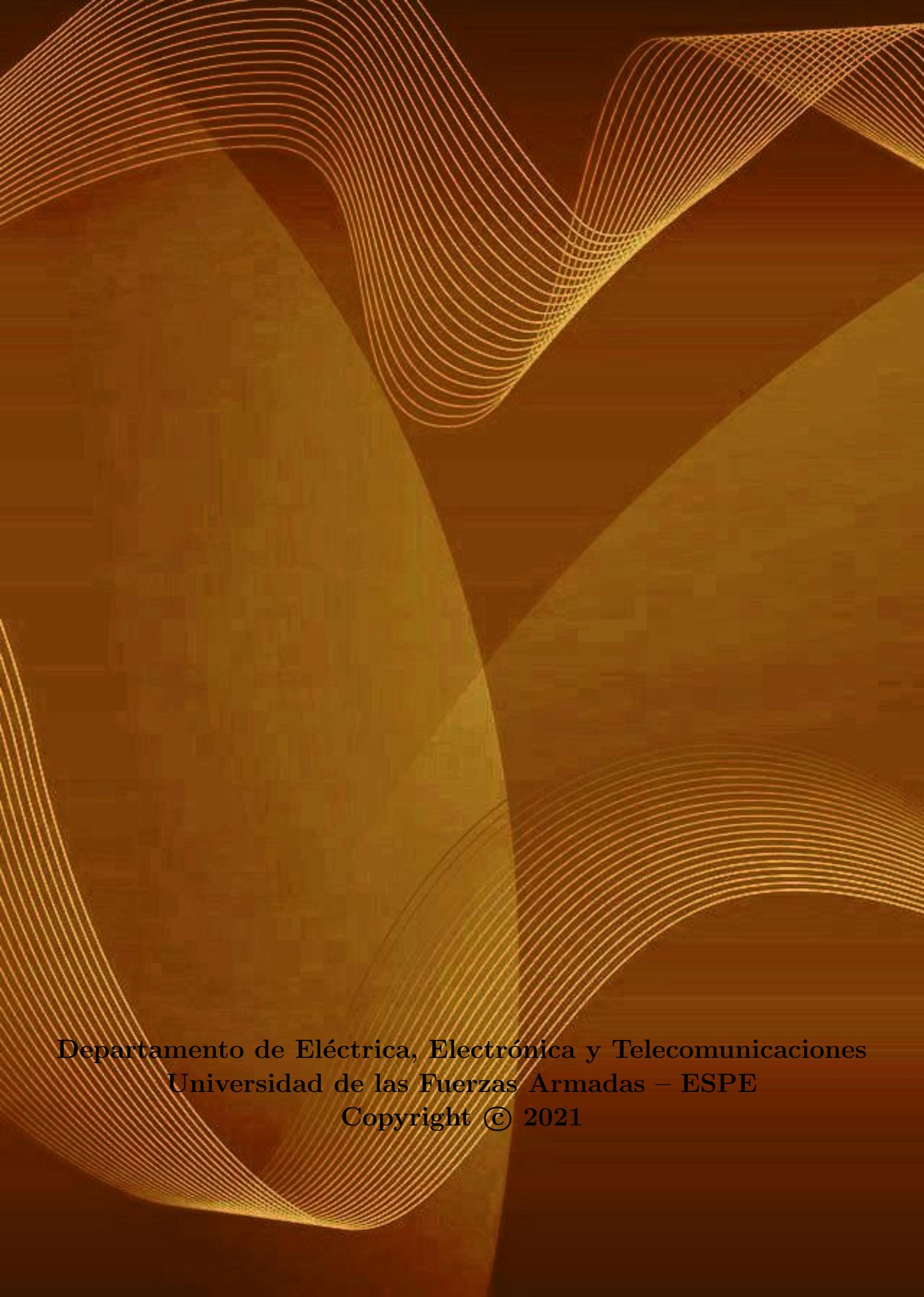
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (antigua Facultad de Ingeniería Electrónica) fue creado el 25 de abril de 1977 e inicia sus labores en octubre del mismo año en la modalidad presencial, con sus planes y programas de estudio encaminados a la formación del Ingeniero Electrónico. A partir de octubre de 1990, ofrece dos carreras con perfiles profesionales definidos: Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones e Ingeniería Electrónica en Computación.

En la propuesta actual del Departamento se ofertan las carreras: Carrera de Telecomunicaciones y Carrera de Electrónica y Automatización

Además oferta los siguientes programas de posgrado: **Maestría de Investigación en Electrónica menciones en Automática y Telecomunicaciones**, Maestría en Redes de Información y Conectividad, y Maestría en Gerencia de Redes y Telecomunicaciones. Más información:

<https://ugp.espe.edu.ec/maestria-en-electronica-2020/>



**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE**  
**Copyright © 2021**