ISSN : 2600-5573

# IDEAS Journal

Volume 2 / Nº2
January 2021

## INNOVATION & DEVELOPMENT IN ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
SCIENTIA ET THECNICUS IN SERVITIUM PUPULI
UTN
AUTÓNOMA DESDE 1986
IBARRA - ECUADOR

FICA
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

# JOURNAL

# Innovation & Development in Engineering and Applied Science

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

IBARRA - ECUADOR

2021

**FICA**

# Editorial committee


Jorge Caraguay, MSc.
***EDITOR IN CHIEF***
e-mail: jacaraguay@utn.edu.ec

Daisy Imbaquingo, PhD.(c)
***GENERAL EDITOR***
e-mail: deimbaquingo@utn.edu.ec

Alexander Guevara, MSc.
***TECHNICAL EDITOR***
e-mail: alexguevara@utn.edu.ec

Marco Ciaccia, PhD.
***SECTION EDITOR***
e-mail: mciaccia@utn.edu.ec

Marcelo Zambrano, PhD.
***SECTION EDITOR***
e-mail: omzambrano@utn.edu.ec

David Ojeda, PhD.
***SECTION EDITOR***
e-mail: daojeda@utn.edu.ec

Fernando Ramírez, PhD.
***SECTION EDITOR***
e-mail: frramirez@utn.edu.ec

Robert Valencia, PhD.(c)
***SECTION EDITOR***
e-mail: rmvalencia@utn.edu.ec

Brizeida Gámez, PhD.
***ACADEMIC EDITOR***
e-mail: bngamez@utn.edu.ec

Miguel Vivert, PhD.
***ACADEMIC EDITOR***
e-mail: mevivert@utn.edu.ec

Vladimir Bonilla Venegas, PhD
***ASSOCIATED EDITOR***
e-mail: fbonilla@ute.edu.ec

Mario Ron, PhD.
***ASSOCIATED EDITOR***
e-mail: nbron@espe.edu.ec

Thalia Daniela San Antonio Serrano, PhD
***ASSOCIATED EDITOR***
e-mail: t.sanantonio@uta.edu.ec

Ana Cabrera, PhD.
***INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE***
e-mail: acabreratobar@unisa.it

Lilibeth Zambrano, PhD.
***INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE***
e-mail: zambranol@itcarlow.ie

Belkys Amador, PhD.
***INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE***
e-mail: bamador@unet.edu.ve

Andrea Basantes, PhD.
***INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE***
e-mail: avbasantes@utn.edu.ec

Roger Mafla, Lic.
***DIAGRAMMER DESIGNER***
e-mail: rfmafla@utn.edu.ec

Silvia Arciniega, Dra.
***SECRETARY AND STYLE CORRECTOR***
e-mail: srarciniega@utn.edu.ec

Leonardo Ibujés
***ASSISTANT***
e-mail: lvibujesc@utn.edu.ec

Jerson Vásquez
***ASSISTANT***
e-mail: jjvasquezp@utn.edu.ec

# Editorial committee


Marcelo Cevallos Vallejos, PhD.
***RECTOR***
e-mail: rectorado@utn.edu.ec

Miguel Naranjo Toro, PhD.
***ACADEMIC VICE-RECTOR***
e-mail: viceacademico@utn.edu.ec

José Revelo Ruiz, Dr.
***ADMINISTRATIVE VICE-RECTOR***
e-mail: viceadministrativo@utn.edu.ec

Jorge Caraguay, MSc.
***DEAN FICA***
e-mail: jacaraguay@utn.edu.ec

Catalina Ramírez, MSc.
***SUBDEAN FICA***
e-mail: mcramirez@utn.edu.ec

Luis Súarez, MSc.
***RESEARCH COORDINATOR***
e-mail: lesuarez@utn.edu.ec

Pedro Granda, MSc.
***COORDINATOR CISIC-CSOFT***
e-mail: pdgranda@utn.edu.ec

Edgar Daniel Jaramillo Vinueza, MSc.
***COORDINATOR CIERCOM-CITEL***
e-mail: edjaramillo@utn.edu.ec

Ing. Karla Paola Negrete, MSc.
***COORDINATOR CINDU***
e-mail: kpnegrete@utn.edu.ec

Diego Ortiz, MSc.
***COORDINATOR CIME***
e-mail: dlortiz@utn.edu.ec

Gerardo Collaguazo, PhD.
***COORDINATOR CIELE***
e-mail: gicollaguazo@utn.edu.ec

Ignacio Benavides, MSc.
***COORDINATOR CIMA-CIAUT***
e-mail: ibbenavides@utn.edu.ec

Ing. Marco Naranjo Toro, MSc.
***COORDINATOR CITEX***
e-mail: mfnaranjo@utn.edu.ec



EDITORIAL UTN
IBARRA - ECUADOR

*UNIVERSITY PRINTING 2021*
*Universidad Técnica del Norte*
*Ibarra-Ecuador*

# Editorial

*With the purpose of disseminating scientific articles in the different areas of research in engineering and applied sciences, IDEAS continues to advance meeting the proposed objectives. In this edition, the ethical and transparency commitment is maintained, selecting the articles based on double blind peer review, as well as the full commitment to the quality of scientific production and highlighting the efforts made by national and international researchers who have placed their trust on this medium to make their results visible.*

*This fourth issue begins with an article presented by Lozada and Bautista, from Universidad Nacional de la Rioja, in which they propose the design of a technological architecture that establishes a model for smart citadels in the city of Esmeraldas, through IoT technologies, Machine Learning and Renewable Energies, environmentally friendly, in order to reduce energy consumption of fossil fuel generation sources.*

*Likewise, Guaraca, Cuascota, Quilismal, and Jácome, researchers from Universidad de las Fuerzas Armadas and Universidad Técnica del Norte, whom present a review article with the purpose of obtaining important information about the different uses or applications of sockets in the IT areas for its later analysis, concluding that sockets are versatile and viable to be applied in the different technological areas; while also generating a series of advantages such as performance improvement and data transmission.*

*Jácome, Saltos, Jaramillo, García, and Guaichico researchers from Universidad Técnica del Norte present a review of the control techniques for the DC motor based on mathematical modeling, software and hardware that are applied in this equipments.*

*Benalcázar and Cuzme, from Universidad Técnica del Norte, contribute, in this edition, with the Optical Polarization Evaluation in the development of images, using an experimental method and MATLAB software to develop an algorithm for binarization, segmentation, transformation and the comparison of the images, which allows to know the difference indexes that exist between the proposed models*

*On the energy field, researchers Taffur, Coco, and Muñoz of Universidad Politécnica de Madrid present a study in which they promote the feasibility of using supercritical CO2 -based mixtures that can lead to higher thermal performances in Brayton cycles than those obtained with the standard fluid (pure s-CO2).*

*On the other hand, the researchers Tipantocta, Tipan, Coral, Herrera, and Pacheco from Instituto Superior Tecnológico Sucre, present the results of a rehabilitation process using a video game. The procedure was carried out on the arm of a patient with hemiparesis. The video game is based on a fantasy environment that encourages the patient's interest, making him want to play with the system, thus obtaining a taste for moving the affected arm and creating new neural pathways for movement and stimulation of fine motor skills.*

*This edition culminates with the contribution of Mora, Blanco, and Ojeda researchers from Universidad de Carabobo (Venezuela) and EAFIT (Colombia), whom present the mechanical design of a rehabilitator to active and passive knee therapy exercises, considering the phases of 3D modeling and numerical validation of the model; obtaining a rehabilitator with the ability to perform flexion and extension movements at natural angles of the member.*

*We thank all the researchers who have contributed on volume 4 for the year 2020, for trusting us as an instrument of dissemination of their research products in the different areas of engineering and applied sciences. We said goodbye by inviting very cordially all those national and international researchers interested in entrusting us with their scientific products, to publish in our Journal.*

*Jorge Caraguay Procel, M.Sc.*
*Editor-in-Chief*

*Daisy Imbaquingo, PhD. (c)*
*General Editor*

# IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

# INDEX


PAGE 11 — PAPER 1
Diseño de arquitectura tecnológica de ciudadela inteligente Tecnipetrol, basado en industria 4.0 en Esmeraldas-Ecuador

PAGE 27 — PAPER 2
Uso de sockets en la informática: Una Revisión Sistemática de la Literatura

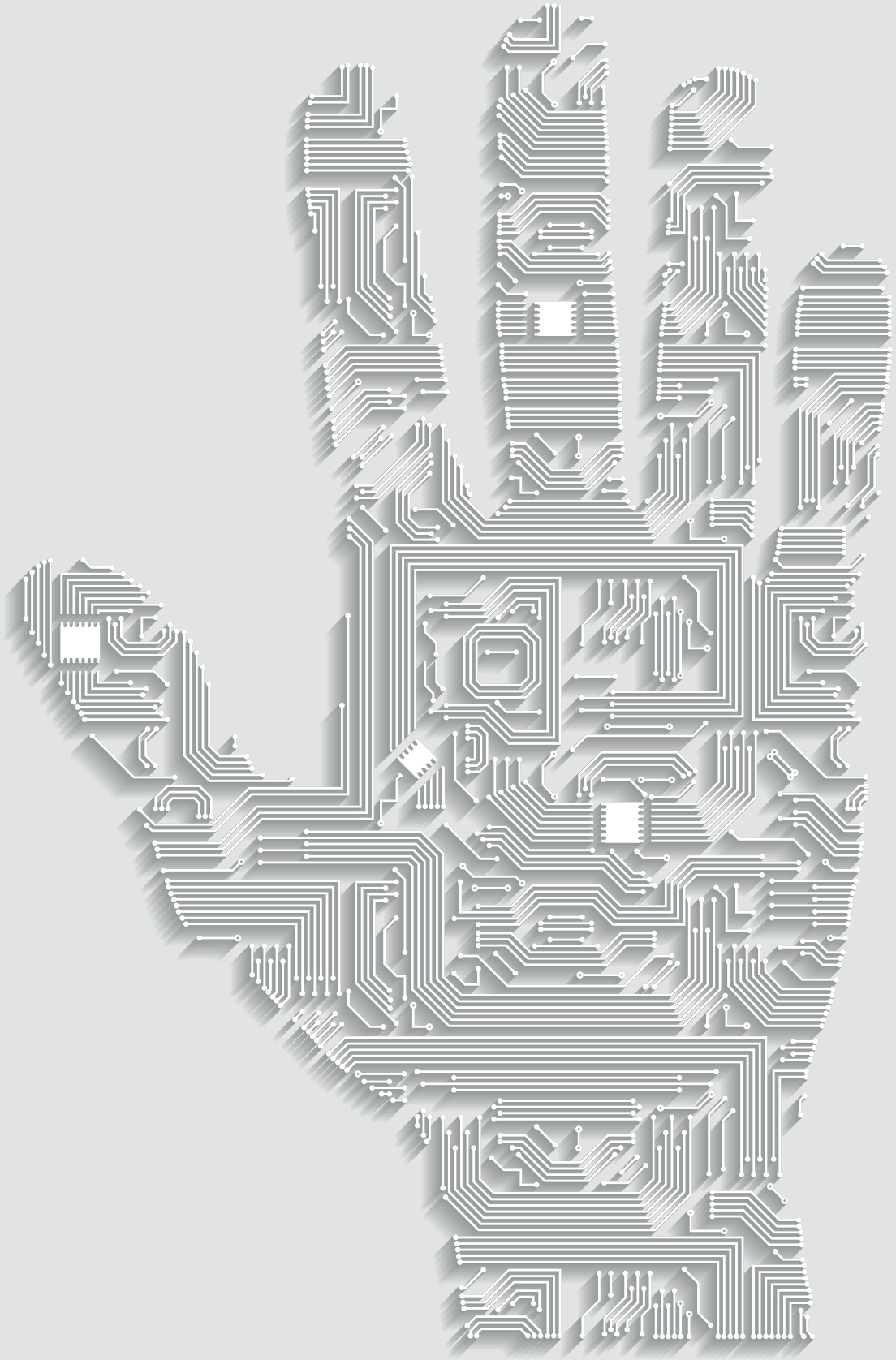
PAGE 41 — PAPER 3
Técnicas de control para el motor de corriente continua: Una Revisión Sistemática de Literatura

PAGE 77 — PAPER 4
Evaluación de la Polarización óptica en imágenes

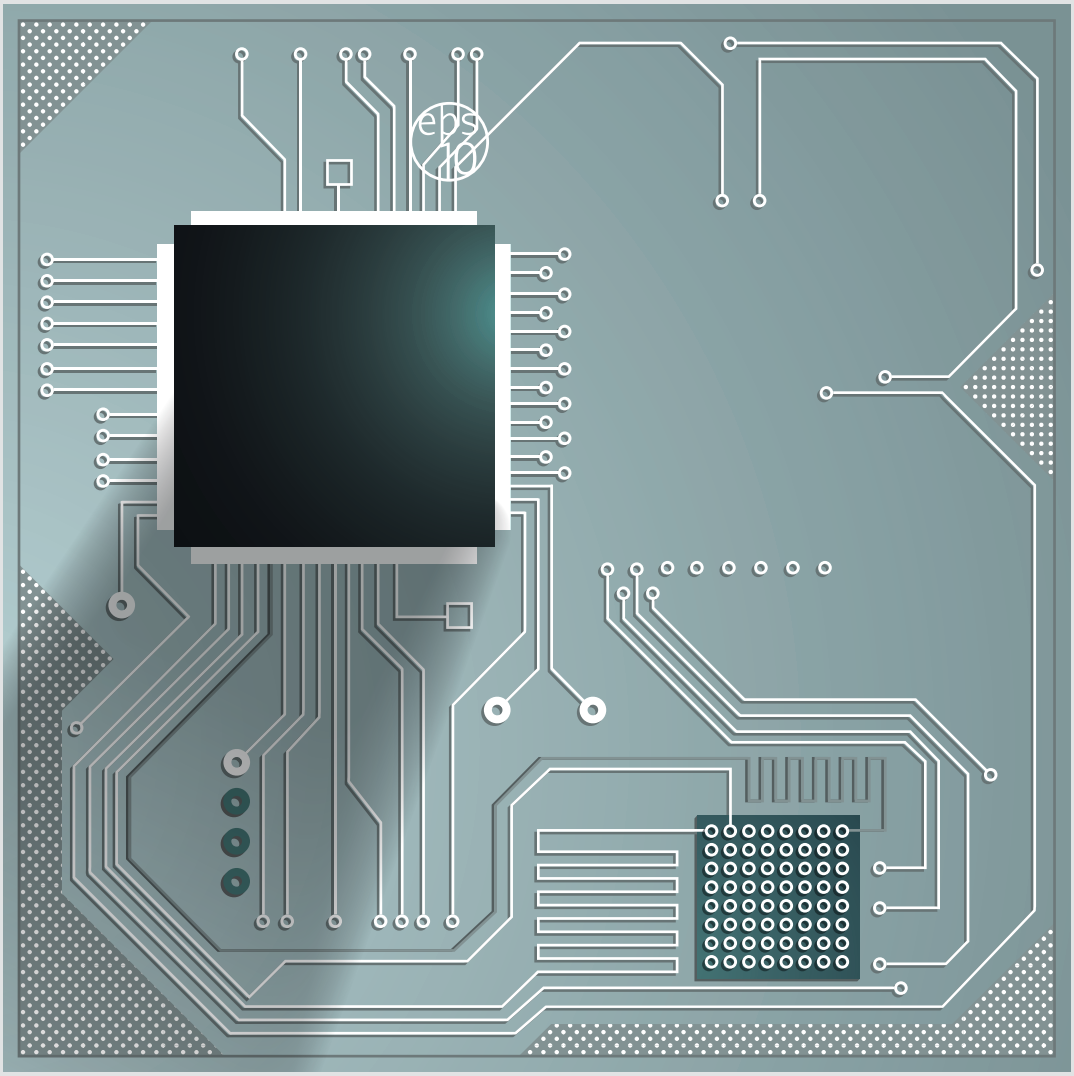
PAGE 99 — PAPER 5
Viabilidad de Mezclas Supercríticas en Ciclos Brayton Acoplados a Plantas de Energía Solar Concentrada

PAGE 119 — PAPER 6
Estimulación de motricidad fina con un videojuego en un paciente con hemiparesia izquierda

PAGE 131 — PAPER 7
Rehabilitador para terapias activas y pasivas de rodilla



# INFORMATION AND ELECTRONIC ENGINEERING



# IDEAS

Innovation & Development in Engineering and Applied Science

# Diseño de arquitectura tecnológica de ciudadela inteligente Tecnipetrol, basado en industria 4.0 en Esmeraldas-Ecuador

**Jefferson D. Lozada[1], Alex D. Bautista[2]**
[1]Maestría en Industria 4.0, Universidad Internacional de la Rioja,
Av. de la Paz, 137, 26006 Logroño, La Rioja, España
[2]Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación, Instituto Superior Tecnológico Luis Tello, Propicia 1, frente a la cancha forestal, Esmeraldas, Ecuador

*[1]jdlozada1@gmail.com, [2]alex.baes1310@gmail.com*

## RESUMEN

La transformación digital en todos los lugares del mundo direcciona a visualizar el futuro de las ciudadelas inteligentes cada vez más cerca, la conexión de lo que actualmente se realiza de forma manual y la automatización de estos procesos, darán como resultado el control, monitoreo y conocimiento de lo que está pasando y podría suceder en el entorno cotidiano. El objetivo del trabajo de investigación es plantear un diseño de arquitectura tecnológica que establezca un modelo para ciudadelas inteligentes en la ciudad de Esmeraldas, a través de las tecnologías del IoT, Machine Learning y Energías Renovables, amigables con el medio ambiente, para disminuir el consumo energético de fuentes de generación de combustibles fósiles, además, el uso de sensores inteligentes, actuadores, paneles solares, que facilitan hoy en día automatizar cualquier actividad diaria del ser humano. Todo esto se respalda en una encuesta realizada en dos ciudadelas.

**Palabras Clave:** Arquitectura tecnológica, industria 4.0, ciudadelas inteligentes, IoT, Machine Learning, energías renovables, sensores, actuadores.

**Abstract:** The digital transformation in all parts of the world directs to visualize the future of smart cities closer and closer, the connection of what is currently done manually and the automation of these processes will result in control, monitoring and knowledge of what is happening and could happen in the everyday environment. The objective of the research work is to propose a technological architecture design that establishes a model for smart citadels in the city of Esmeraldas, through the technologies of the IoT, Machine Learning and Renewable Energies, friendly to the environment, to reduce consumption energy from fossil fuel generation sources, in addition, the use of intelligent sensors, actuators, solar panels, which nowadays facilitate the automation of any daily human activity. All this is supported by a survey carried out in two citadels.

## Introducción

En la investigación se describe el diseño de arquitectura tecnológica de ciudadela inteligente, como un reto por alcanzar en las ciudadelas convencionales dentro del campo de transformación digital, partiendo de la necesidad de tener una sociedad interconectada, que busca optimizar recursos.

Los factores característicos de este tipo de ciudadela inteligente son el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), el Big Data, la Domótica, el Ahorro Energético y el Cloud Computing que permiten establecer un mecanismo de análisis y procesamiento masivo de datos e información para establecer un modelo de ciudadela inteligente adaptado a las realidades de la ciudad de Esmeraldas. (Basco, Beliz, Coatz, & Garnero , 2018)

Para iniciar esta investigación es necesario mencionar las causas que llevaron a realizarlo, una de ellas es afrontar los cambios tecnológicos, que son una realidad del mundo con la cuarta revolución industrial en el campo de las ciudades inteligentes, otra razón es mejorar los procesos manuales, donde todo esté conectado, y además, compuesto de sistemas integrados en funcionamiento donde podemos mencionar el uso del Big Data para el análisis y procesamiento de los datos de los habitantes, y a través de éstos realizar aplicaciones enfocadas a optimizar el consumo energético con la finalidad de automatizar las viviendas mediante el IoT.

En el marco de las ciudadelas inteligentes esta investigación se basó en establecer un diseño de arquitectura tecnológica fundamentado en la industria 4.0, teniendo como base modelos actuales de ciudades inteligentes como por ejemplo el propuesto por la Unión Europea FIWARE y la multinacional de telecomunicaciones Telefónica, de donde se tomaron algunas de sus características y tecnologías para ser plasmados y adecuados a lo que estableció en este proyecto como punto alcanzable y adaptable que es interconectar a los usuarios en una zona habitada y de tamaño menor a una ciudad. Este diseño será el punto de partida para en una posterior etapa y con la experiencia adquirida realizar un diseño de una ciudad inteligente en la ciudad de Esmeraldas, a partir de este modelo

obtenido como una referencia en la parte tecnológica, sistemas, sensores y actuadores.

Esta investigación está compuesta de varias fases, en la sección dos de fundamento teórico se revisará los habilitadores digitales seleccionados de acuerdo con la realidad de las ciudadelas inteligentes que son la base científica fundamental para la realización de la propuesta de diseño que se plantea. En la parte tres, denominada metodología se aborda el método utilizado para el desarrollo del proyecto partiendo del análisis de la encuesta de consumo energético y de conocimiento de tecnologías realizada de acuerdo al contexto de la ciudad, además de los puntos de vista y el esquema de la arquitectura tecnológica de la propuesta. En la cuarta parte, llamada discusión se presenta el análisis de los resultados de consumo energético de las ciudadelas Tecnipetrol y Nueva Concordia y para finalizar las conclusiones de la investigación realizada.

## Fundamento teórico

Antes de comenzar con la propuesta, es necesario indicar cuál es el punto de partida de las tecnologías base y conceptos que se emplearon para realizar la arquitectura del diseño de ciudadela inteligente. Para esto se identificó las soluciones que se emplean en la actualidad que permiten resolver los tipos de casos similares al planteado en la investigación. El objetivo principal de este trabajo no es explicar detalladamente cómo funcionan las ciudadelas inteligentes y cada una de las tecnologías aplicadas o afines al caso sino más bien brindar un breve panorama de los conceptos más importantes y una arquitectura modelo.

### Ciudades inteligentes

Dados los diversos contextos de realidades ciudadanas encaminadas en el cambio de transformación digital, podemos encontrar varias definiciones de ciudad inteligente:

Es aquella que ubica a los habitantes como el eje del desarrollo, concentra tecnologías de la información y comunicación en la gestión urbana y las usa como herramientas para obtener un gobierno eficiente que encierre procesos de planificación colaborativa y participación ciudadana. Al motivar un desarrollo integrado y sostenible permite que las Ciudades Inteligentes se vuelvan más innovadoras, competitivas, atractivas y resilientes, con una mejor calidad de vida para las personas. (Bouskela, Casseb, Bassi, De Luca, & Facchina, 2016)

Son espacios que buscan garantizar una mejora en la relación de los ciudadanos y las administraciones vigentes, respaldada en las tecnologías de la actualidad. El gobierno local confía en la interacción con los ciudadanos para gestionar prestación de servicios bajo los criterios de calidad. (Ontiveros, Vizcaíno, & López, 2016)

Si consideramos los ejes y atributo de las ciudades inteligentes debemos considerar que, los desafíos del actual entorno generan la necesidad de transitar en espacios de convivencia y desarrollo que creen el cumplimiento viable de las crecientes exigencias de la ciudadanía, sin tener que ejecutar mayor presión o restringir el eficiente crecimiento económico y bienestar social. (Alvarado López, 2017a)

Estos componentes o atributos de la figura 1 que participan en las ciudades inteligentes no son aislados a nuestro actual entorno, lo que marca la diferencia es que estos no mantienen un mismo enfoque y la base de la planificación para la implementación de ciudades inteligentes, con el uso de las nuevas tecnologías, radica en el desarrollo integral de todas las dimensiones:

*Fig. 1. Ejes de una ciudad inteligente (Alvarado López, 2017b)*

## Internet de las cosas

Esta frase es una traducción de la expresión en el idioma inglés Internet of Things (IoT), que se refiere a una realidad en la que las cosas más cotidianas están conectadas entre sí y generan información de las actividades realizadas. Esta implementación de herramientas tecnológicas tiene el objetivo de generar una interacción ágil y eficiente que permita día a día transformar nuestra realidad en un mundo completamente digital. (Valois, 2018)

Genera una realidad en el que, la mejora constante de la calidad de vida de las personas es una prioridad, permitiendo una amplia y accesible base de datos en las diferentes áreas de un entorno, desde la educación hasta el transporte público. Adicionalmente será el eje de crecimiento empresarial y productivo que a través de las herramientas tecnológicas permitirá que se puedan ofrecer bienes y servicios de forma personalizada. (Silvestre & Salazar, 2017)

En cuanto a las innovaciones sustentadas en las TICs que en mayor medida contribuyen a dotar de inteligencia a las viviendas de nuestras ciudades, destaca la domótica. (Mateus Cruz, Molina Castañeda, & Jaramillo Benavides, 2018)

## Arquitectura de referencia del Internet Industrial

La Industrial Internet Reference Arquitecture (IIRA) del Consorcio de Internet Industrial documenta el resultado de aplicar el Industrial Internet Architecture Framework (IIAF) a su clase de sistemas de interés: Sistemas industriales de Internet de las cosas. Primero identifica y destaca las más importantes preocupaciones arquitectónicas comúnmente encontradas en los sistemas Industrial Internet of Things (IIoT) en todos los sectores industriales y clasifica en puntos de vista junto con sus respectivos grupos de interés. Luego describe, analiza y, en su caso, proporciona orientación para resolver estas preocupaciones en estos puntos de vista, lo que resulta en una cierta arquitectura abstracta representaciones. (Lin, et al., 2017a)

La IIRA es un modelo que obtiene características, factores y puntos de vistas fundamentales en su marco de arquitectura. Además, presenta su modelo de arquitectura tecnológica el cual se puede observar en la figura 2.

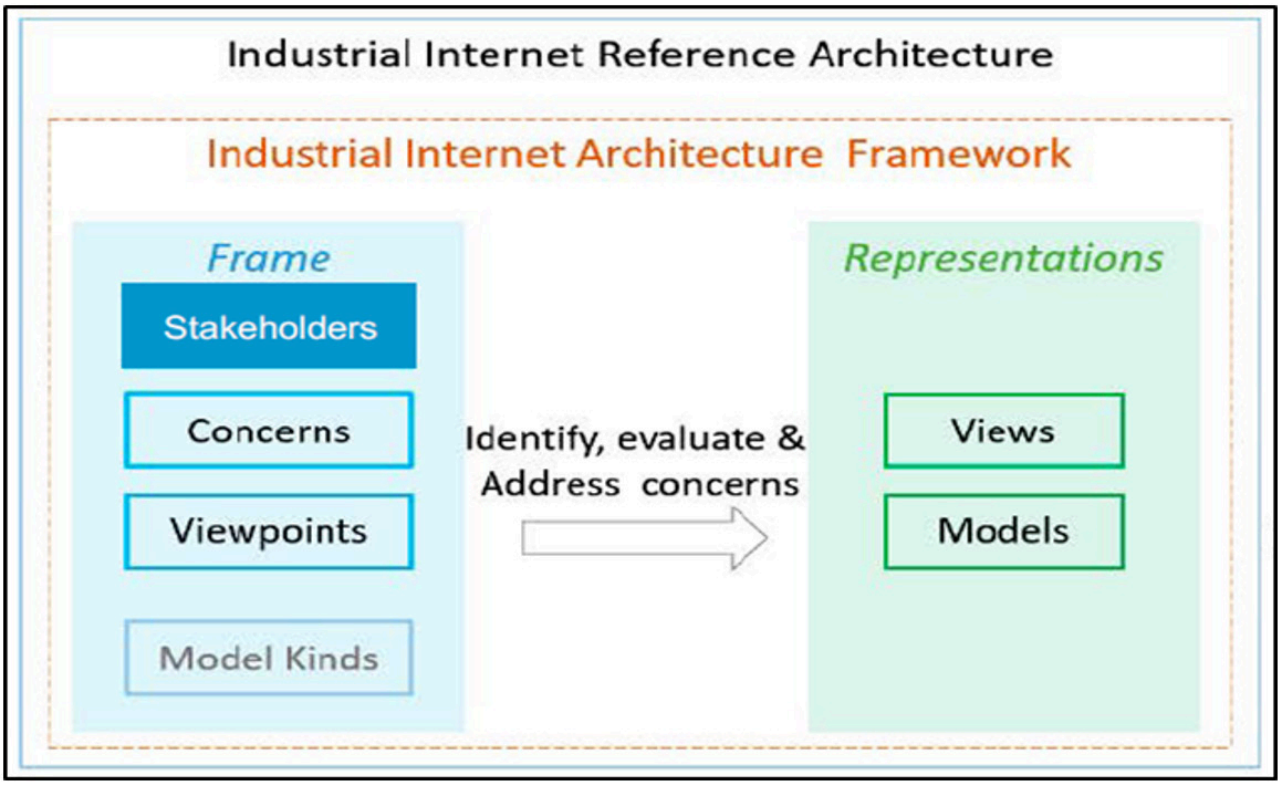



*Fig. 2. Internet Industrial Arquitectura de Referencia. (Lin, et al., 2017b)*

## Big Data

Hace referencia a infinitos datos de los cuales se puede generan valor o definiciones de datos, gracias a esta tecnología, que es totalmente competente, se puede administrar la información de forma ágil y oportuna a partir del análisis de las tendencias de los usuarios, recreando un ambiente totalmente amigable de acuerdo con las preferencias de cada uno. (Benitez, 2017)

### Micro Grid Solar

La Micro Grid solar es una tecnología que genera energía a través de paneles solares y permite alimentar sistemas del hogar para un funcionamiento óptimo y de consumo amigable con el medio ambiente. Es el conjunto de pequeñas herramientas, preparadas para realizar el monitoreo, estudio, proceder y emitir la información correspondiente con los demás aspectos que se encuentran interconectados a una misma red. Se puede considerar un luxómetro como dispositivo primordial para medir la luz de una habitación, y entorno a este un sensor; ambas unidades forman parte de un sistema equivalente, que envía información directamente a la red. (Duque & Romero, 2016)

## Metodología

La investigación se basó en dos componentes, primero se realizó el levantamiento de información de consumo energético real y conocimiento de las tecnologías aplicadas o afines a la arquitectura plateada en las ciudadelas Tecnipetrol y Nueva Concordia de la ciudad de Esmeraldas. Como segunda parte se estudiaron los modelos de ciudades inteligentes, como fueron el de FIWARE de la Unión Europea y el de la Multinacional Telefónica, los cuales se adaptaron y contextualizaron a las ciudadelas antes mencionadas.

Como método de recopilación de información se aplicó la encuesta, con un formulario de la plataforma de Microsoft Forms que constó de 19 preguntas relacionadas al consumo de energía y de conocimiento de tecnologías actuales, que fue aplicado a dos ciudadelas de la zona sur de la ciudad, Tecnipetrol y Nueva Concordia. Considerando que la encuesta fue elaborada por un representante de cada hogar, y nos permitió obtener datos que representen de manera general el comportamiento de la ciudadela en cuanto al consumo de energía y el conocimiento que poseen de las tecnologías de ahorro energético.

### Análisis de encuestas

En el proceso de planificación de esta investigación fue necesario establecer un punto de partida que sustente presentar un diseño de arquitectura tecnológica para la ciudadela inteligente, de tal manera que la mejor opción fue realizar un levantamiento de información sobre el consumo energético a 25 hogares de un total de 45 aproximadamente de cada una de las ciudadelas antes mencionadas, para establecer una comparativa de consumo entre ambas localidades habitacionales e identificar las deficiencias de consumo que se podrían evitar con el uso de las nuevas tecnologías del IOT.

Se obtuvieron los siguientes hallazgos en Tecnipetrol:

- En las 25 viviendas encuestadas la infraestructura es de 2 pisos y en mayor porcentaje habitan de 1 a 3 personas.
- El 71% de las viviendas utilizan los dos tipos de tensión de alimentación de energía 110V y 220V.
- Más del 50% de los hogares utilizan bombillos led, tienen más de 12 puntos de luz y no consideran que exista un consumo inapropiado de energía a través de estos.
- Los electrodomésticos y dispositivos con los que más cuentan las viviendas son televisión, lavadora, microondas, teléfono móvil, computador, teléfono fijo inalámbrico y ducha eléctrica.

- Más del 80% de los hogares utiliza el aire acondicionado como dispositivo de climatización y el uso más frecuente es de 3 a 5 horas diarias.
- Se destaca que los electrodomésticos son considerados por sus dueños como seminuevos en más del 70% y generan un consumo promedio de energía mensual desde UDS 50.
- El 86% de encuestados desconocen sobre las nuevas tecnologías para ahorro energético, sin embargo, la mayoría de los hogares estaría de acuerdo con que la ciudadela implemente estas.
- En todos los hogares consideran importante realizar un consumo de energía amigable con el medio ambiente y no tendrían inconvenientes en ser parte de la adquisición de los dispositivos y tecnologías automatizadas para las viviendas.

*Hallazgos en la ciudadela Nueva Concordia:*

En relación con Tecnipetrol, de acuerdo a los resultados obtenidos, existen las siguientes variaciones:

- El 67% de las familias cuenta con una vivienda de 2 pisos en la que habitan de 3 a 5 personas.
- Una diferencia importante es que en esta ciudadela si consideran que existe consumo innecesario de energía a través de los puntos de luz.
- Respecto al pago por consumo de energía, con referencia a la ciudadela Tecnipetrol, este va desde USD 70.

Existe un desconocimiento de las tecnologías actuales, que pueden facilitar el control de los dispositivos caseros, también se identificó que aún se usan bombillos incandescentes lo que contribuye al consumo de energía; se pudo identificar además que las casas no disponen de tecnología domótica.

**Puntos de vista de arquitectura de referencia para ciudadela inteligente**

La arquitectura de referencia de internet industrial (IIRA) (Lin, et al., 2017c) de la ciudadela inteligente Tecnipetrol está basada en los cuatro puntos de vista del Consorcio de Internet Industrial que es parte de la propuesta en el contexto de ciudadela inteligente:

- **Negocio:** Se estableció cuatro personas que intervienen en el control y monitoreo de los sistemas, además se definieron seis objetivos alcanzables de la ciudadela inteligente.

**Tabla 1. Parámetros del punto de vista del negocio.**

| No | Parámetros | Descripción |
|---|---|---|
| 1 | **Actores relevantes** | Personal operador de la ciudadela, Personal de mantenimiento de ciudadela, operador de la red de energía renovable, Integradores de sistemas, Habitantes. |
| 2 | **Visión** | Obtener una ciudadela conectada e inteligente con control de identificación de los habitantes y que garantice un óptimo consumo energético. |
| 3 | **Valores** | Minimizar el consumo energético, conectar los dispositivos y permitir la autentificación de usuarios.<br>Reducir los pagos promedios de energía invirtiendo en el uso de dispositivos inteligentes.<br>Cumplir las regulaciones de gobierno del uso de energías renovables. |
| 4 | **Objetivos claves** | Disminuir los valores de pagos elevados de energía.<br>Generación y autoabastecimiento de energía renovable.<br>Mejorar la seguridad, así mismo el ingreso y salida de la ciudadela.<br>Disminuir los apagones.<br>Mejorar el uso de los dispositivos y equipos del hogar.<br>Mejorar la iluminación pública de las calles |
| 5 | **Capacidades fundamentales** | Controlar y monitorizar los dispositivos del hogar para optimizar el consumo de energía.<br>Funcionamiento independiente de la red eléctrica renovable.<br>Predicción de recursos de energía para abastecimiento en función de la necesidad de consumo.<br>Funcionamiento inteligente de iluminación pública en ciudadela. |

- Uso: Se establecieron tres actividades y cuatro tareas que se realizarán en este sistema, así como el personal encargado.

**Tabla 2. Parámetros del punto de vista del uso.**

| No | Parámetros | Descripción |
|---|---|---|
| 1 | **Actividad** | Automatización de viviendas con dispositivos IOT.<br>Generación y autoabastecimiento de fuente de energía renovable.<br>Automatización de alumbrado público |
| 2 | **Parte** | Operador de sistema IOT, Controlador<br>Operador de red inteligente de energía, Controlador<br>Operador de sistema de alumbrado público, Controlador |
| 3 | **Rol** | Director de inteligencia<br>Operador de sistema IOT<br>Operador de red inteligente de energía<br>Operador de sistema alumbrado público<br>Controlador |
| 4 | **Tarea** | Director de inteligencia: Prever la disponibilidad del sistema IOT, debe garantizar resiliencia y disponibilidad de dispositivos.<br>Director de inteligencia: Previsión de disponibilidad de la red inteligente.<br>Director de inteligencia: Prever la disponibilidad del sistema de alumbrado.<br>Director de inteligencia: Encargado de crear un plan de operación.<br>Controlador: Validar y ejecutar el plan de operación. |

Una vez realizado el cuadro que identifica cada uno de los parámetros del punto de vista de uso de la arquitectura de referencia de la ciudadela Tecnipetrol, lo contextualizamos con el diagrama de uso del sistema inteligente que nos permite identificar de mejor manera su topología en la figura 3.

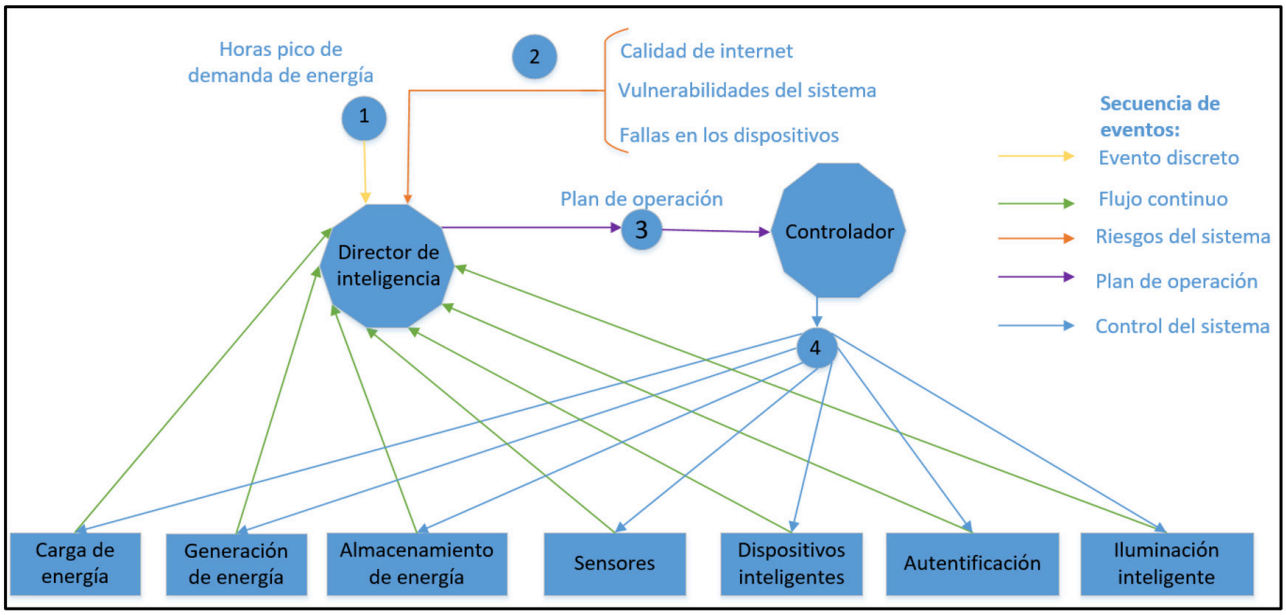



*Fig. 3. Diagrama de punto de vista de uso de la IIRA de ciudadela inteligente.*

- **Funcional:** En cada uno de los dominios funcionales de la figura 4 se expresan los componentes y dispositivos y aplicaciones que integran el sistema de ciudadela inteligente, cada uno de estos componentes son esenciales para el prefecto funcionamiento y procesamiento de datos que permitirán que los diferentes sistemas en conjunto permitan la comunicación fluida de los datos de extremo a extremo desde el negocio hasta los sistemas físicos que son el medio de los habitantes de donde se obtendrán las variables y los datos.

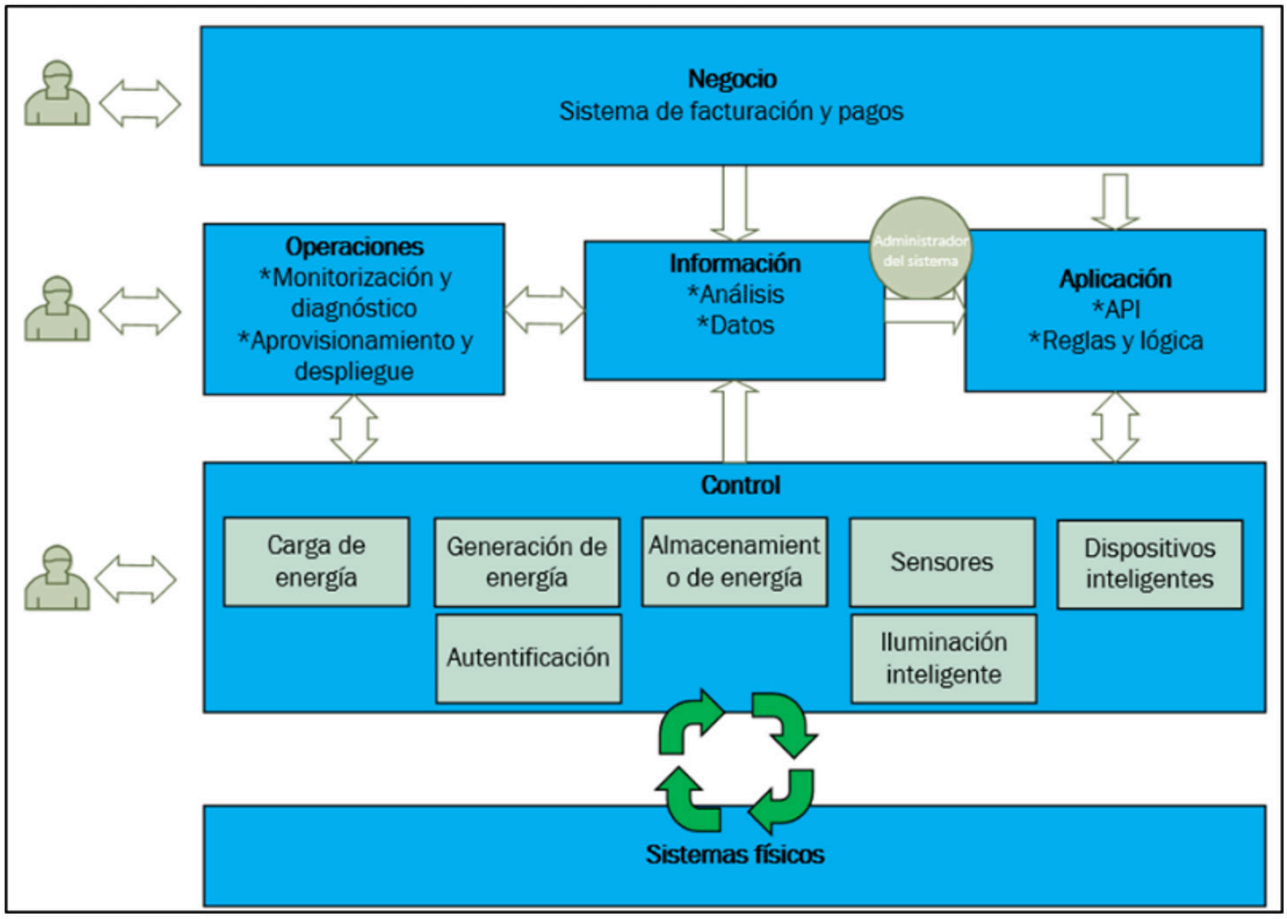



*Fig. 4. Diagrama esquemático de punto de vista funcional de la IIRA de ciudadela inteligente.*

- **Implementación:** En los dispositivos físicos se consideró los sensores y actuadores que son los que receptan y ejecutan las señales, en la plataforma los diferentes componentes que se conectarán con los servicios para ejecutar acciones y tomar decisiones. Por último, en la capa de aplicación la interfaz que se relaciona directamente con el usuario para ejecutar y monitorizar acciones del negocio o el hogar. En la figura 5 se puede observar el diagrama de implementación de una ciudadela inteligente.

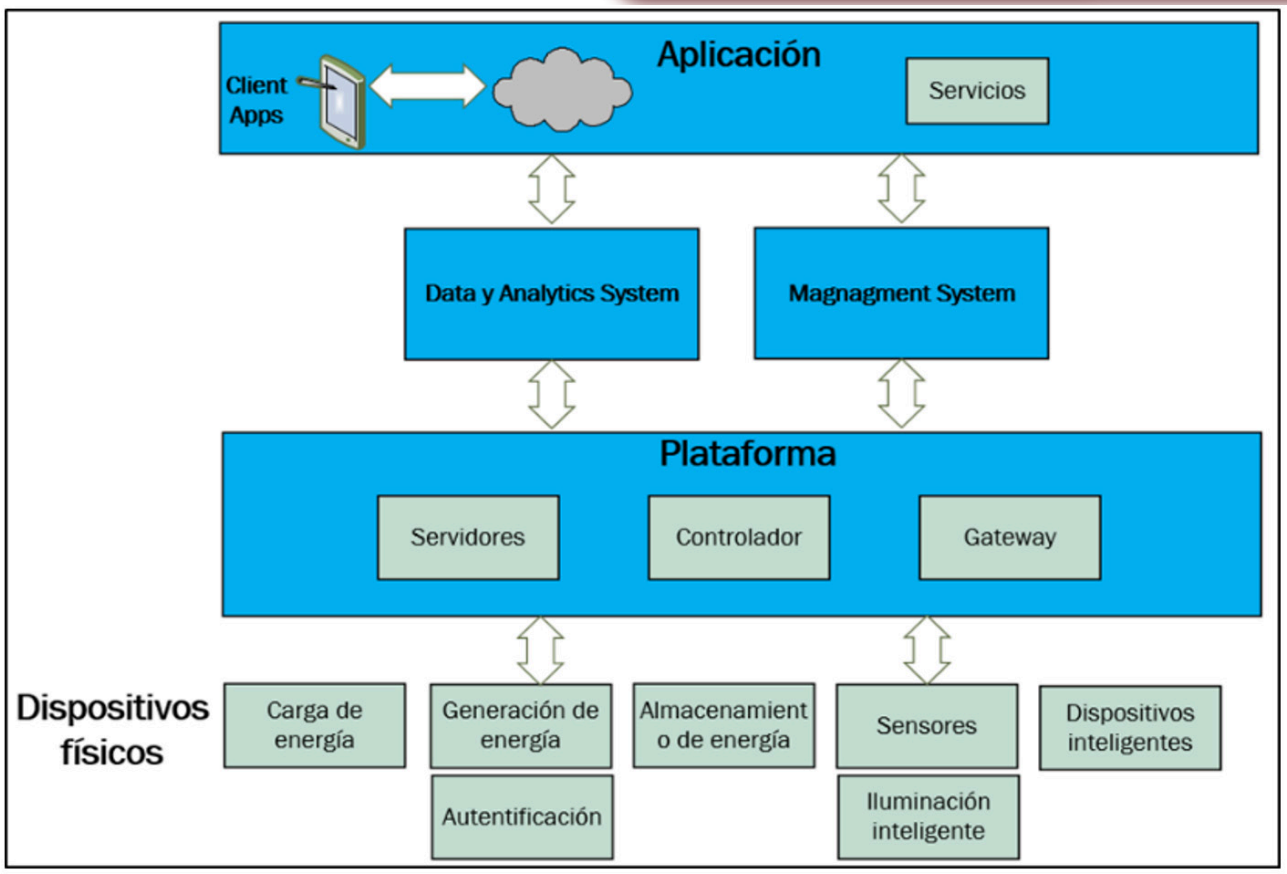



*Fig. 5. Diagrama esquemático de punto de vista de implementación de la IIRA de ciudadela inteligente.*

## 3.3 Esquema de Arquitectura de referencia de ciudadela inteligente Tecnipetrol

Parte fundamental de esta investigación es presentar una arquitectura de referencia propia para la ciudadela inteligente Tecnipetrol, que se desarrolló con los puntos de vista esenciales y necesarios como pilar tecnológico. En este apartado se presenta un esquemático de la arquitectura de referencia que nos indica cada una de las etapas o capas de forma genérica para que puedan ser tomados como referencia en las diversas aplicaciones de las diferentes tecnologías que existen en el ámbito industrial y comercial con las plataformas IoT y los servicios Cloud.

Este esquema de arquitectura se presenta como propuesta de la investigación, donde se ha estudiado los demás esquemas de referencia de diversas soluciones IoT e IIoT para llegar a una propuesta contextualizada a la realidad de las ciudadelas en la ciudad de Esmeraldas, aportando al proceso de transformación digital que deben someterse no solo este sector sino la provincia y el país.

En la figura 6 se puede observar cada una de las capas del esquemático de la arquitectura de referencia.

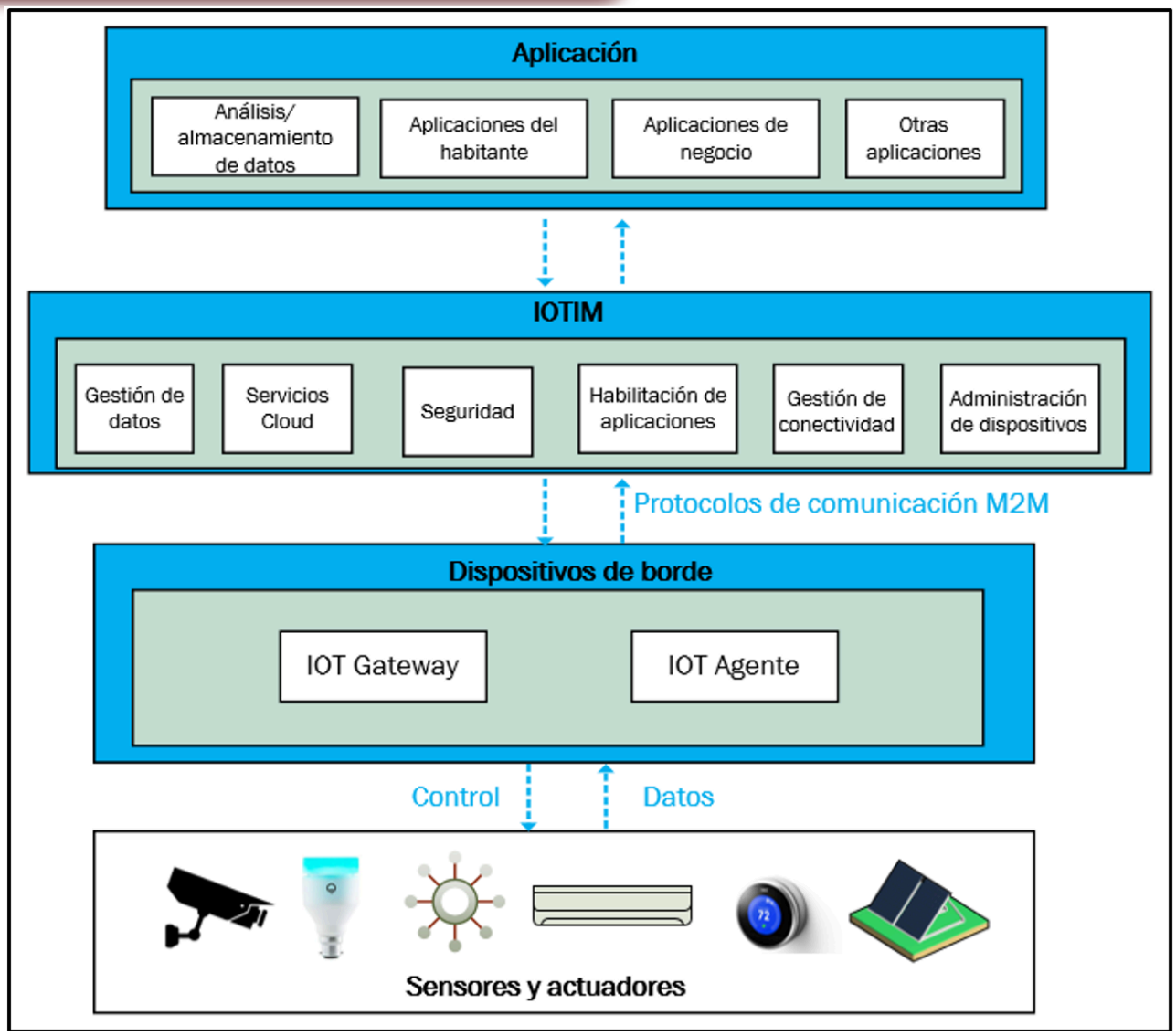



*Fig. 6. Esquemático de arquitectura de referencia de ciudadela inteligente Tecnipetrol.*

## Discusión de resultados

Al ser una propuesta de arquitectura para la aplicación de nuevas tecnologías y en etapa de desarrollo en la actualidad, habiendo tenido como referencia las ciudadelas inteligentes desde el eje de eficiencia energética a través del uso de dispositivos y tecnologías inteligentes, se obtiene un modelo de arquitectura de referencia que cumple con los cuatro puntos de vista del Consorcio de Internet Industrial el cual está basado en la Norma ISO/IEC/IEEE 4010:2011. El esquema consta de cuatro (4) capas, sensores y actuadores, dispositivos de borde, middleware IoT y de aplicación para su posterior ejecución a detalle en proyectos de industria 4.0. Según Amazon Web Services un hogar inteligente debe poseer la siguiente arquitectura que se puede observar en la figura 7.

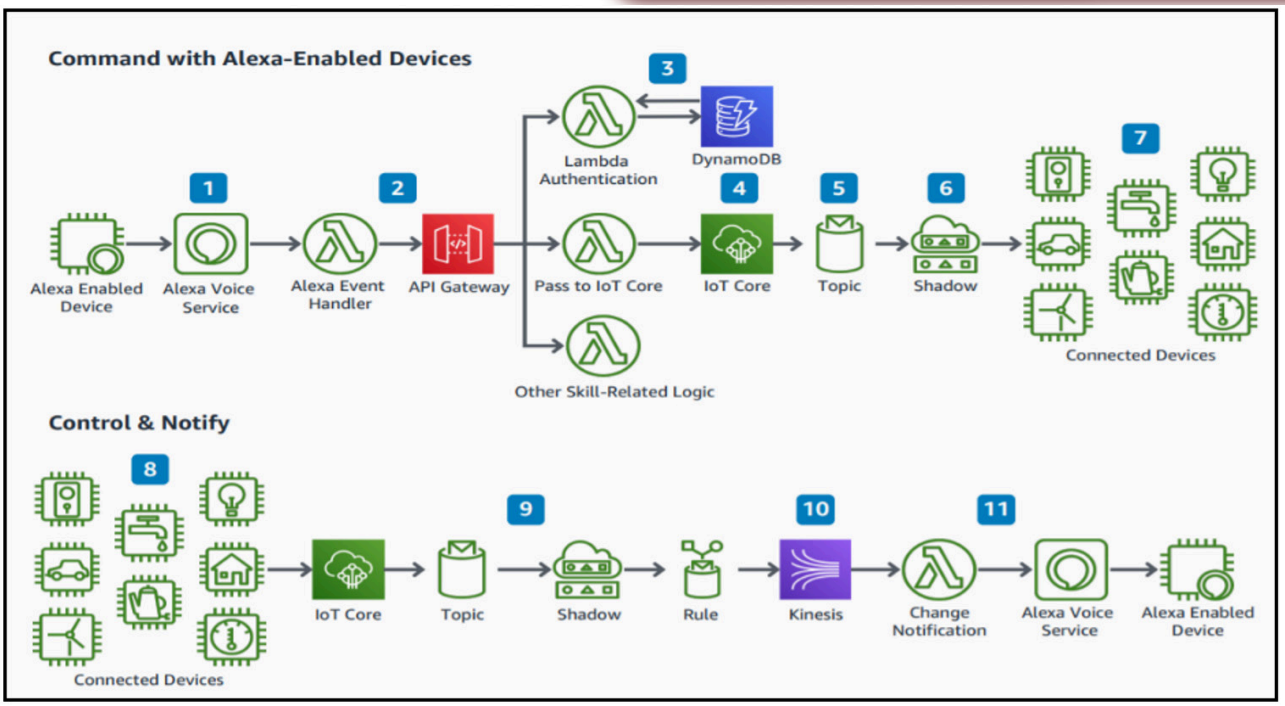



*Fig. 7. Esquema de hogar conectado donde tenemos el comando y control, integrado con Alexa con sus dispositivos domésticos conectados. (Architecture, AWS Reference, 2019)*

Tomando en consideración la arquitectura de Amazon Web Services se puede verificar que el esquema propuesto en su modelo de capas abarca los dispositivos y tecnologías planteadas en esta investigación de ciudadelas convencionales para transformarlas en inteligentes teniendo de esta manera, la capa de los sensores y actuadores, dispositivos de borde, el middleware IoT y la de aplicación que interactúa con el usuario u operador del sistema.

En base al análisis realizado del consumo energético en los hogares de las ciudadelas, se observa en la figura 8 que los datos de consumo energético en los hogares son inadecuados alcanzando valores elevados por parte del 100% de los hogares encuestados, por lo cual se considera necesario la implementación de dispositivos inteligentes para optimizar y mejorar el funcionamiento de los electrodomésticos. De la misma forma se puede identificar que es necesario que en las viviendas se realice un cambio de iluminación convencional a led, para disminuir el consumo energético, que también se ve afectado por el estado y tiempo de vida de los dispositivos eléctricos y electrónicos del hogar que en un 78% son seminuevos.

En el uso del aire acondicionado más del 80% de los encuestados consideran tener un alto consumo de energía, por esto se propone utilizar Microgrid solar para abastecer y mantener en funcionamiento este sistema; estableciendo una inversión a mediano plazo que servirá para disminuir los pagos mensuales de energía.

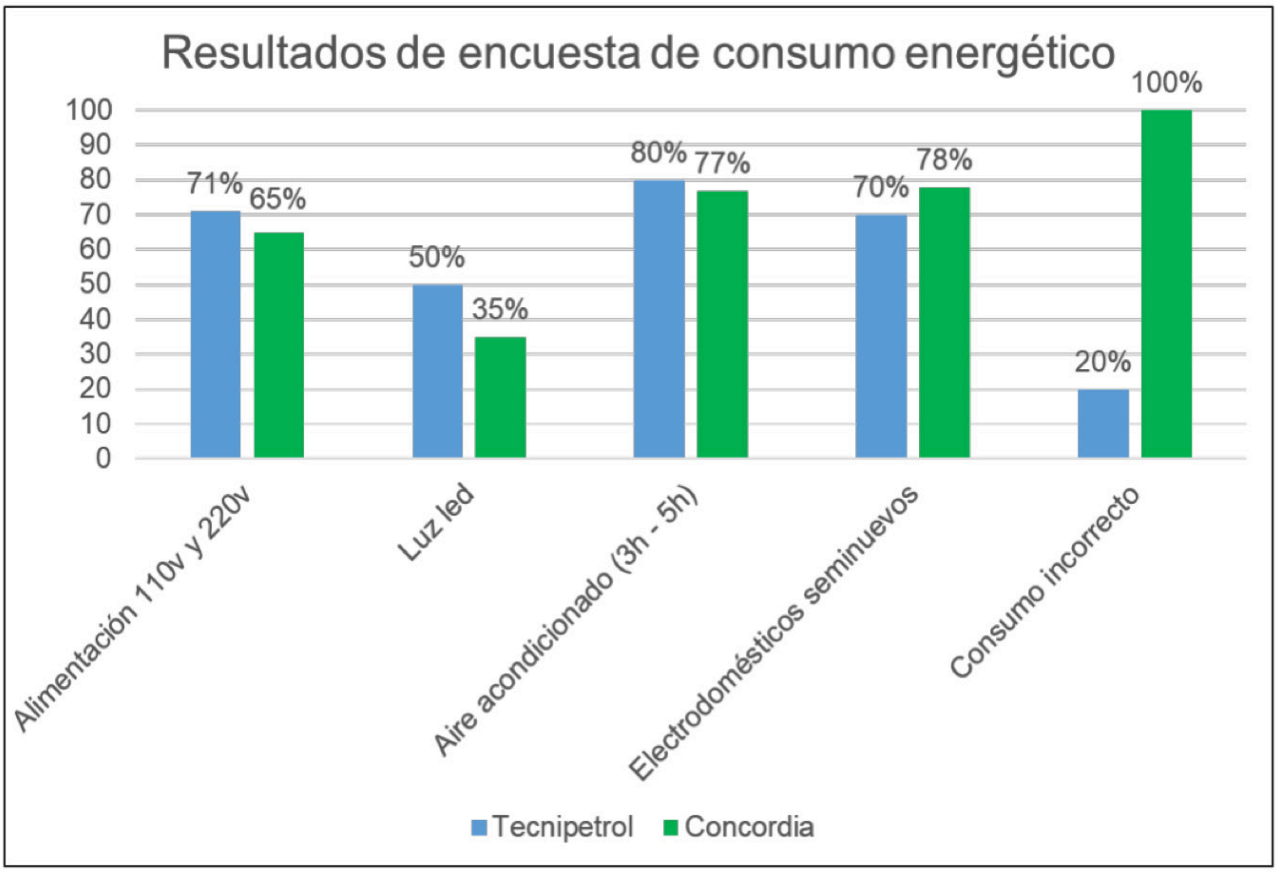



*Fig. 8. Resultados de encuesta de consumo energético realizado a ciudadelas Tecnipetrol y Nueva Concordia.*

No es el propósito de la investigación realizar una prueba experimental en viviendas del modelo de arquitectura planteado, sino más bien establecer la actualidad del consumo energético de los hogares encuestados de las ciudadelas de la zona y proponiendo un diseño acorde al contexto tecnológico de la ciudad de Esmeraldas.

## Conclusiones

En el marco de referencia de la arquitectura tecnológica establecida para Tecnipetrol se tomaron como puntos base los modelos del Internet industrial y el IoT convencional, ya que ambos puntos de vista fueron esenciales para la conformación del esquema modelo de ciudadela inteligente tomando la seguridad del IIoT y los servicios del IoT como conceptos principales en el funcionamiento de los sistemas conectados a las cosas.

La recopilación de información de la ciudadela Tecnipetrol fue el punto de partida del presente trabajo, se identificó que más del 71% de las viviendas utilizan los dos tipos de tensión de alimentación de energía 110V y 220V lo cual se tomó en consideración en las propuestas presentadas. Así como también se identificó que los electrodomésticos y dispositivos que más cuentan en las viviendas son televisión, lavadora, microondas, teléfono fijo inalámbrico y ducha eléctrica con un alto consumo energético. El 70% de éstos son seminuevos generando un consumo promedio de energía mensual desde UDS 50.

Además, que más del 80% de los hogares utiliza el sistema de aire acondicionado como dispositivo de climatización y de manera frecuente de 3 a 5 horas diarias, por esto con una inversión en una Micro Grid solar se energizaría este sistema de alta demanda y se recuperaría la inversión a mediano plazo.

La propuesta de arquitectura de ciudadela inteligente para Tecnipetrol que se presentó en la sección tres, abarcó todos los campos y capas necesarios para cubrir con los servicios, tecnologías y dispositivos. Estas son la capa de sensores y actuadores, de dispositivos de borde, el middleware IoT y la capa de aplicación. Todas estas capas en conjunto permitirán tener un modelo referencial de ciudadelas con tecnologías y plataformas de la industria 4.0.

## Referencias


Alvarado López, R. (2017). Ciudad inteligente y sostenible: hacia un modelo de innovación inclusiva. Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad, 10.

Architecture, AWS Reference. (2019). AWS. Obtenido de https://d1.awsstatic.com/architecture-diagrams/ArchitectureDiagrams/connected-home-command-control-diagram.pdf

Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero , P. (2018). INDUSTRIA 4.0 FABRICANDO EL FUTURO. Buenos Aires. Obtenido de <iframe frameborder="0" scrolling="no" style="border:0px" src="https://books.google.es/books?id=geiGDwAAQBAJ&lpg=PA8&ots=n_IUcqtbRJ&dq=tecnologias%20de%20la%20industria%204.0%20&lr&hl=es&pg=PA2&output=embed" width=500 height=500></iframe>

Benitez, C. (17 de 03 de 2017). Power Data. Obtenido de https://blog.powerdata.es/el-valor-de-la-gestion-de-datos/big-data-vs-tecnicas-de-mineria-de-datos

Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., De Luca, C., & Facchina, M. (2016). La ruta hacia las Smart Cities. Biblioteca Felipe. Obtenido de https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/document/La-ruta-hacia-las-smart-cities-Migrando-de-una-gesti%C3%B3n-tradicional-a-la-ciudad-inteligente.pdf

Duque, M., & Romero, G. (2016). Smart-Grid Control Environment for Ecuador Save Energy Alternative. hLACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 5. Obtenido de http://www.laccei.org/LACCEI2016-SanJose/RefereedPapers/RP252.pdf

ISO/IEC/IEEE42010. (2011). ISO. Obtenido de https://www.iso.org/standard/50508.html

Lin, S.-W., Miller, B., Durand, J., Graham, B., Amine, C., Martin, R., . . . Crawford, M. (2017). The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture. Industrial Internet Consortium. Retrieved from https://www.iiconsortium.org/IIC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf

Mateus Cruz, D. A., Molina Castañeda, J. E., & Jaramillo Benavides, M. C. (2018). Domótica, el hogar digital. Obtenido de Academia.edu: https://www.academia.edu/37259788/Dom%C3%B3tica_el_hogar_digital

Ontiveros, E., Vizcaíno, D., & López, V. (2016). Las ciudades del futuro: inteligentes, digitales y sostenibles. Madrid: Ariel y Fundación Telefónica en colaboración con Editorial Planeta.

Silvestre, S., & Salazar, J. (2017). TECHPEDIA. Obtenido de https://upcommons.upc.edu/

bitstream/handle/2117/100921/LM08_R_ES.pdf

Valois, M. A. (22 de 5 de 2018). HOSTGATOR. Obtenido de https://www.hostgator.mx/blog/internet-de-las-cosas/

# Uso de sockets en la informática: Una Revisión Sistemática de la Literatura

**Margoth Guaraca[1], Guadalupe Cuascota[2], Milton Quilismal[2]**
**José Jácome[2], Fernando Imbaquingo[3]**
[1]Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sede Santo Domingo, Ingeniería en Tecnologías de la Información
[2] Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.
[2] Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas.
[3] Universidad Técnica del Norte. La UEmprende. Ibarra, Ecuador

*[1]meguaraca@espe.edu.ec, [2]{pgcuascotac@utn.edu.ec, maquilismalp1@utn.edu.ec, jgjacome@utn.edu.ec},*
*[3]efimbaquingo@lauemprende.com*

## RESUMEN

Los sockets en el área de la informática son una alternativa tecnológica planteada como mecanismo de comunicación eficiente entre aplicaciones que trabajan bajo la arquitectura cliente-servidor, se pueden aplicar en diferentes áreas relacionadas con la informática. El presente artículo hace referencia a una revisión sistemática de literatura (SLR) con el fin de obtener información importante de los diferentes usos o aplicaciones de sockets en las áreas informáticas para su posterior análisis. Para ello se realiza la selección de fuentes bibliográficas confiables en donde se obtuvo información relevante de artículos en revistas científicas validadas con un factor de impacto de calidad, obteniendo como resultado que el uso de sockets mejora el flujo de información y al ser aplicados en las diferentes áreas tecnológicas como: Inteligencia artificial, seguridad informática, arquitecturas de software, servicios web, sistemas operativos y en las redes de comunicación influyen de manera positiva mejorando su rendimiento, todo esto es descrito en una matriz de aplicaciones de la misma forma se elaboró una matriz de ventajas de uso, la cual permitió concluir que los sockets son versátiles y viables para ser aplicados en las diferentes áreas tecnológicas además de generar una serie de ventajas como mejora del rendimiento, transmisión de datos, eliminación de cuello de botella.

**Keywords:** informática, rendimiento, aplicaciones, protocolo, arquitectura de software, comunicación, sockets, MuniSocket

## Introducción

El avance tecnológico ha llevado a los investigadores a realizar diferentes estudios para mantener a los usuarios siempre conectados de manera rápida y eficiente, para ello se busca continuamente soluciones factibles que ayuden a mejorar el proceso de desarrollo de software y la flexibilidad de los sistemas para que se adapten a las demandas de los usuarios [1],[2], en consecuencia, se emplean diferentes tecnologías tanto para el desarrollo de software, integración de servicios como para el aumento de seguridad y control en las redes sobre las cuales se usa las aplicaciones [3]. El conocimiento de estas tecnologías que se encuentran a la vanguardia conlleva saber cómo aplicarlas y que se pretende solucionar debido a la diversidad de áreas en las cuales se puede lograr mejoras notables para beneficio de los interesados.

En el mundo tecnológico es fundamental tener un nivel de prestación de servicios adecuado en los sistemas informáticos, para llegar a obtener esto, una de las soluciones tecnológicas más nombradas es la implementación de sistemas distribuidos [4] y como componente de comunicación se encuentran los sockets los cuales proporcionan múltiples ventajas tales como: aumento de escalabilidad, mejora de rendimiento, elimina cuellos de botella, comunicación eficiente y seguridad, contribuyendo de manera exponencial al mejoramiento del sistema o software [5],[6].

En cuanto a seguridad en los sistemas informáticos se implementa protocolos o certificados como Secure Socket Layer (SSL) que con técnicas criptográficas contribuyen a mantener datos seguros [7],[8]. En medios electrónicos el paso de información es cotidiano por ello es indispensable que los datos lleguen a su destino, con un alto tráfico en la red los sockets reducen la latencia y hace que el flujo de la información sea constante evitando pérdidas de información [9]. El protocolo de comunicación puede ser Transmission Control Protocol (TCP) o User Datagram Protocol (UDP).

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión sistemática de la literatura para obtener suficiente información de las aplicaciones de sockets en las diferentes disciplinas de la informática, ventajas de uso de esta tecnología y una conceptualización general. Todo ello detallada en el presente artículo en el que también se menciona el proceso utilizado para la obtención de información relevante además el resultado en una matriz de ventajas de uso de sockets considerado por varios autores y finalmente una conclusión formulada en relación con los resultados obtenidos.

## Metodología

Para la presente investigación se ha seleccionado revisión sistemática de la literatura (SLR) con el fin de sintetizar la información existente sobre el área temática [10] "sockets" del cual se obtiene información relevante para su posterior análisis. Todo ello es descrito en un proceso como se muestra en la Figura 1 que consta de 4 fases: (i) preguntas de investigación, (ii) búsqueda de documentos, (iii) selección de artículos, (iv) extracción de datos relevantes. Cada una de estas fases se describen a continuación:

### Preguntas de investigación

Se establecieron 2 preguntas de investigación las cuales permitieron indagar sobre el tema de estudio, en esta investigación se basa en los diferentes usos o aplicaciones que se le da a un socket en los campos o áreas de estudio relacionados con la informática. Para ello se establecieron las siguientes preguntas:

**Tabla 1: Preguntas de investigación (PI)**

| Número | Preguntas de investigación | Motivación |
|---|---|---|
| PI1 | ¿Cuáles son los usos o aplicaciones que se da a los sockets en las diferentes ramas de la informática? | Identificar los usos que se les da a los sockets en las diferentes ramas de la informática |
| PI2 | ¿Cuáles son los beneficios o ventajas que aportan los sockets? | Identificar los beneficios del uso de los sockets. |

### Búsqueda de documentos

Este proceso inicia con la selección de base de datos bibliográficas considerando el tema de interés una de ellas es IEEE Xplore [11], Sciencie Direct[12], SpringerLink [13] Taylor & Francis [14] y Microsoft Academic [15], que son fuentes digitales que contienen información del área de investigación,. Una vez seleccionadas las distintas librerías digitales identificamos las palabras claves (("sockets" OR "sockets programing") AND ("sockets in distributed systems")) como cadenas de búsqueda del cual se obtiene un listado de documentos recuperados, la Tabla 2 muestra la cadena de búsqueda utilizada en cada librería digital.

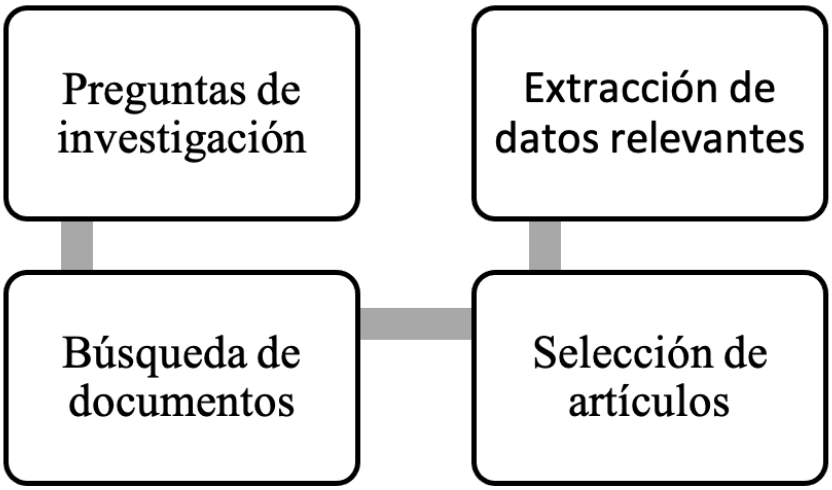



*Figura 1. Diagrama del proceso de investigación SLR*

**Tabla 2: Cadenas de búsqueda utilizadas en las librerías digitales**

| Criterios | IEEE Xplore | SpringerLink | Science Direct | Microsoft Academic | Taylor & Francis |
|---|---|---|---|---|---|
| Cadenas de búsqueda | (Sockets) | (sockets sockets programing) and (sockets) | (sockets in distributed systems) | (sockets in distributed systems) | (sockets sockets programing or sockets) and (sockets in distributed systems) |

## Selección de artículos

Para la selección de artículos se consideró la totalidad de documentos recuperados entre (i) libros, (ii)capítulos de libro, (iii) revistas, (iv) conferencias y (v) patentes de cada una de las librerías a partir del cual se empiezan las 3 fases de selección. En la primera fase se aplicaron criterios de exclusión e inclusión. Los criterios de inclusión que se establecieron fueron la aplicación del filtro considerando únicamente información de (i) libros y (ii) artículos. Todos estos pertenecientes a la disciplina de ciencias de la computación e ingeniería así también el año de publicación validada entre el rango de los últimos 5 años incluido el 2021.

Los criterios de exclusión fueron información tanto de (i) conferencias como (ii) patentes y (iii) capítulos de libros, así también información perteneciente al área de la medicina ya que la mayor parte de resultados de búsqueda se relacionaban a esta área, obteniendo un total de resultados de la selección primaria como se muestra en la Tabla 3.

En la segunda fase se considera las preguntas de investigación planteadas, para ello se revisó inicialmente el título y el resumen

Finalmente, se validó el factor de impacto de las revistas científicas, en el portal Scimago Journal & Country Rank (SJR) [16] que permitió validar revistas con mayor índice de calidad. Para ello se buscó el cuartil al cual pertenece, considerando únicamente los pertenecientes all Q1, Q2, y Q3, ya que estos son indicadores de mayor importancia en todo el rango de revistas del área, obteniendo un total de resultados mostrados en la selección final (Tabla 3), obteniendo un total de 75 documentos al aplicar las fases de selección.

**Tabla 3: Selección de artículos**

| Librería digital | Total de resultados encontrado | Selección primaria | Selección final |
|---|---|---|---|
| IEEE | 4648 | 388 | 24 |
| Microsoft Academic | 1000 | 731 | 14 |
| Springer Link | 47000 | 26282 | 20 |
| Science Direct | 15009 | 30 | 15 |
| Taylor & Francis | 23 | 10 | 2 |
| **Total** | **89782** | **27641** | **75** |

### Extracción de datos relevantes

De los 75 trabajos seleccionados se revisaron tanto el título, resumen, introducción y resultados, para constar que contengan información relacionada a las preguntas de investigación para el posterior análisis e interpretación de resultados obteniendo un total de 40 artículos preseleccionados. De esos se realizó una revisión y selección más detallada obteniendo un total de 25 artículos distribuidos, 16 en la Tabla 7 y 7 en la Tabla 8.

Los datos extraídos constan principalmente la conceptualización de sockets, el funcionamiento y la estructura establecida para la transferencia de datos mediante sockets. Además, considerando las preguntas de investigación se identificaron las áreas en las que se aplica los sockets y los beneficios de este aporte en su aplicación.

## Resultados

Los sockets se definen generalmente como un método de comunicación de dos vías entre dos programas que se ejecutan a través de la red [17] y utiliza una arquitectura cliente-servidor, donde el cliente realiza peticiones de conexión al servidor para luego el servidor aceptar y establecer la conexión [18], para establecer la comunicación es necesario 3 componentes principales que se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Componentes de los sockets (Elaboración propia)**

| Componente | Definición |
|---|---|
| Dirección IP | Dentro de la red los hosts deben estar identificados para establecer conexión |
| Puerto | Punto por el cual los hosts van a establecer la conexión. |
| Protocolo | Modelo de conexión para transmitir la información. |

Los tres componentes mencionados en la Tabla 4 son muy importantes ya que si uno de ellos no se encuentra bien establecido la conexión y el socket no funciona. La dirección IP debe ser la adecuada dentro de una red, el puerto el cual es un número no debe ser de los más utilizados debido a que puede ser fácilmente víctima de ataques, y por último el protocolo que puede ser TCP o UDP (Tabla 5), en la utilización de los sockets es importante determinar cuál de ellos se va a usar debido a que cada protocolo realiza la conexión y el paso de la información de manera diferente.

**Tabla 5. Protocolos de comunicación (Elaboración propia)**

| TCP | UDP |
|---|---|
| Es un modelo para la comunicación utilizada en áreas de redes locales o internet para la transferencia de datos [19], en sockets este protocolo permite la transmisión de flujo de datos que garantiza el envío seguro de información y que el tiempo de respuesta del servidor sea más corto es un modelo de transmisión con conexión [20]. | Es un protocolo de datagramas de usuario que usa un modelo de transmisión sin conexión haciendo que el tráfico de datos sea susceptible a pérdida de la información [21] volviéndose más vulnerable a cualquier tipo de ataques afectando el rendimiento de la red [22] . |

De las diferentes estructuras que se le puede dar a un socket estas cuentan con funciones principales definidas en cualquier tipo [23]. Las funciones descritas en la Tabla 6 se establece como un ciclo de vida del socket descrito por la mayoría de los autores y es representado como un algoritmo el que cada paso cumple una determinada función. En una capa de sockets a nivel de usuario sobre la arquitectura de interfaz virtual SOVIA [24], la gestión empieza estableciendo conexión para el cual se habilita una canal denominado socket el servidor escucha la solicitud de petición y acepta la solicitud se realiza el proceso de transferencia y finalmente se cierra la conexión usando cinco tipos de paquetes para cerrar completamente la sesión.

**Tabla 6. Matriz de funciones(Elaboración propia) basada en [25]**

| Función | Descripción |
|---|---|
| socket(); | Crea una sesión, donde se describe la información para la conexión |
| connect(); | Establece una conexión ejecutando el modo cliente y espera una respuesta |
| accept(); | Acepta la conexión del cliente y ejecuta el servidor dando respuesta |
| send();<br>write(); | Envió de mensajes confiables durante el proceso de sesión del socket |
| recive();<br>read(); | Recepción de mensajes confiables durante el proceso de sesión del socket |
| closeSocket(); | Cierra la conexión y termina una sesión abierta |

**PI 1 ¿Cuáles son los usos o aplicaciones que se da a los sockets en las diferentes ramas de la informática?**

El uso variado de los sockets en las tecnologías promueve una mejora en el flujo de la información[26], al ser aplicable en diferentes áreas tecnológicas contribuye para llegar a obtener tecnologías robustas.

En la Tabla 7 se muestra diferentes áreas y los usos o aplicaciones sobre los que se puede trabajar con sockets, se ha tomado diferentes estudios que han causado impacto en el área sobre el que se han empleado

**Tabla 7. Matriz de aplicaciones (Elaboración propia)**

| Áreas Informática | Uso/Aplicación | Autor/es | Base de datos bibliográfica | Año | País |
|---|---|---|---|---|---|
| **INTELIGENCIA ARTIFICIAL** | Cuando se requiere una gran potencia informática para procesamiento de información en redes neuronales es aplicable socket java logrando una solución informática paralela [27]. | Gursoy Osman<br><br>Sharif Md. Haidar | IEEE Xplore | 2018 | Macedonia |
| **SEGURIDAD** | Los ataques cibernéticos en internet es un hecho notable, mediante una capa segura de conexión SSL que utiliza autenticación del cliente se obtiene un canal cliente- servidor con mayor nivel de integridad[28]. | Bhatt D.V. Schulze S. Hancke G.P. | IEEE Xplore | 2006 | South Africa |
| | Se propone una técnica, llamada tamiz de seguridad, que mejora el rendimiento de la transmisión de documentos basada en SSL[29] | Lim Norman Majumdar Shikharesh Srivastava Vineet | Taylor & Francis | 2015 | Canadá |
| | En el mercado en línea es importante la comunicación entre la empresa y el cliente, una capa segura de sockets contribuye un mayor rendimiento y mejor control en los accesos de los clientes[8] | Weaver A.C. | IEEE Xplore | 2006 | USA |
| **WEB** | Actualizaciones de HTML permite la implementación de sockets web llegando a que las aplicaciones reciban actualizaciones asíncronas. Los sockets Web permiten una baja latencia, aumento en la escalabilidad dando mayor calidad en la Web[30]. | Qveflander, Nikolai | SpringerLink | 2010 | USA |
| | Mediante la implementación de Websockets se mejora el trabajo compartido en donde los usuarios pueden acceder de manera remota desde cualquier navegador que soporte Websockets permitiendo guardar sesiones [31] | Xavier Sotomayo Diego Ordóñez Camacho | Scielo | 2017 | Chile |
| | Sistema iterativo de respuesta estudiantil utilizando iBeacon y websocket en el que una aplicación y la interfaz de un navegador interactúan, con el fin de proporcionar un aprendizaje en las aulas de clase. Para ello se hace uso de la tecnología websocket que permite crear conexiones entre el cliente y el servidor [32]. | Hung-Hsu Tsai1 Chih-Tsan Chang2 Xin-Yu Hou1 You-Ming Yong1 Kuo-Ching Chiou3 Pao-Ta Yu | SpringerLink | 2019 | California |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **SISTEMAS OPERATIVOS** | El método, denominado outsourcing de socket, reemplaza la capa de socket en un sistema operativo invitado (SO), la subcontratación de sockets aumenta el rendimiento al eliminar la duplicidad de mensajes entre cliente y servidor[33]. | Eiraku Hideki Shinjo Yasushi Pu Calton Koh Younggyun Kato Kazuhiko | CiteSeer | 2007 | Japón |
| | La utilización de sockets Netlink en Linux es un sistema de comunicación flexible entre el espacio del usuario y el núcleo siendo un buen método de comunicación de procesos[34] | Neira Pablo Gasca Rafael M. Lefevre Laurent | InterScience | 2010 | Francia |
| **ARQUITECTURA DE APLICACIONES** | Una arquitectura con la estructura diseñada para lograr una mayor estandarización, flexibilidad, integración y agilidad en el proceso de mantenimiento, está implementada por componentes tecnológicos reutilizables como sockets[1]. | Gómez Oiner Machado Alleiny Cabrera Alexis | Google Scholar | 2017 | Venezuela |
| | Implementación de una capa de sockets a nivel de usuario sobre una arquitectura de interfaz virtual, duplicando el ancho de banda de transferencia de archivos en FTP para acelerar el rendimiento de las aplicaciones[35]. | Kim Jin Soo Kim Kangho Jung Sung In Ha Soonhoi | IEEE Xplore | 2018 | India |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Se evalúa el rendimiento del sistema de comunicación socket basado en PCIe mediante la medición del consumo de ancho de banda al enviar y recibir datos utilizando el protocolo TCP/IP[36]. | Shim Cheol Shinde Rupali Choi Min | SpringerLink | 2019 | Correa del Sur |
| | Se presenta la técnica MuniSocket en redes duales para el equilibrio de carga de mensajes grandes para mejorar el tiempo de transferencia, donde los mensajes del usuario son fragmentados para luego ser enviados por canales multihilo concurrentes[5]. | Mohamed Nader Al-Jaroodi Jameela Jiang Hong | Sience Direct | 2005 | USA |
| **REDES DE COMPUTADORAS** | Implementación de un nuevo tipo de socket denominado UDTCP, para la transmisión de archivos de multimedia, no son adecuados para transmisión de datos sensibles, pero es tolerante a errores [37] | S.Y. Wang | IEEE Xplore | 2006 | USA |
| | Generación de un número adecuado de sockets TCP en transferencias de datos de forma paralela con el fin de que la distribución de carga sea equitativa para que se mejore el rendimiento y no se genere el cuello de botella. [38] | Eitan Altman, Dhiman Barman Bruno Tuffin Milan Vojnovic | IEEE Xplore | 2006 | USA |
| | Active Network Socket Programming (ANSP) similar a la programación de sockets para elaborar programas de red, este modelo es fácil de implementar en cualquier aplicación y es útil cuando se requiere la comunicación dentro de una red heterogénea de una aplicación en otra región de la red además con esto se puede monitorear el rendimiento de la red[39]. | Malik Kamran Khan Osama Mobashir Tahir Sarwar Mansoor | Science Direct | 2004 | Taiwan |

Esta lista de trabajos realizados muestra algunas de las aplicaciones que tienen los sockets, varios de los autores mencionan a los sockets como un buen componente para la transferencia de información que se puede implementar.

### ¿Cuáles son los beneficios o ventajas que aporta los sockets?

Entre la búsqueda relacionada a ventajas de uso de sockets en las diferentes áreas se encuentran algunos conceptos como mayor rendimiento(MR), incremento de la escalabilidad(IE), elimina cuellos de botella(ECB), comunicación eficiente(CE), mejora la seguridad(S) y Fiabilidad(F), que destacan varios autores como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8. Ventajas de uso de sockets. (Elaboración propia)**

| ARTÍCULOS | CONCEPTOS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | MR | IE | ECB | CE | S | F |
| Protocolo de sockets directo (SDP) mediante el modelo cero copias, transfieren datos entre los buffers de la aplicación [40]. | X | | X | X | | |
| Los sockets aplicados en laboratorios virtual de red basados en algoritmos de aprendizaje automático bajo el protocolo TCP/IP para la transmisión de mensajes [9] | | | | | X | X |
| La comunicación del procesado mediante un socket sobresaturado degrada el rendimiento, pero este componente permite la escalabilidad mediante la implementación de otros sockets interconectados sobre un mismo puerto disminuyendo el tiempo de ejecución de las tareas.[21] | X | X | X | | | |
| Java Fast Sockets elimina la limitación de los sockets tradicionales de sobrecargas en clústers de alto rendimiento, su interoperabilidad permite su fácil implementación[41] | X | | X | | | X |
| Una variante de los sockets denominados sockets migratorios, su vida útil es la duración del proceso migratorio donde estos sockets mitigan la sobrecarga de migración de procesos en los clústers reduciendo considerablemente este problema de sobrecarga en comparación con otras soluciones[42] | X | | | X | | |
| Un modelo de programación adaptado a servidores web multinúcleo que reduce el tiempo de respuesta de las solicitudes mediante la implementación de multi sockets [43]. | X | | X | | | X |
| Capa de conexión segura con sockets (SSL), para proporcionar un canal seguro en el intercambio de información en conexiones inalámbricas de sensores mediante la criptografía de ADN que cifra la información para que se mantenga oculta [44] | | | | | X | |
| Arquitectura de sistema de procesador de seguridad en el que se implementa una capa de conexión segura SSL y IPSec de Gbps obteniendo una serie de ventajas en la transferencia de datos [45]. | | | | X | X | |
| Implementación Stack 6 Via Linux utilizando la tecnología sockets mediante el modo de datagrama, secuencia y sin formato para la indicación externa [46] | X | | | | | X |

Los sockets son una solución tecnológica ideal para cualquier tipo de uso sin embargo los sockets UDP cuentan con algunas desventajas tales como la pérdida de la información y no asegura la confidencialidad de la información por ello la mayor cantidad de investigaciones son realizadas bajo el protocolo TCP.

## Conclusiones

En el mundo tecnológico actual es indispensable trabajar con sistemas y aplicaciones de las diferentes áreas de la informática(Tabla 8) con un mayor nivel de disponibilidad y rendimiento para esto el uso de sockets contribuye de manera notable debido a que trabaja distribuyendo cargas en el manejo de la información o conexión entre usuarios.

Los sockets son implementados en varias ramas de la informática, especialmente en redes de computadores, son componente de comunicación entre varios equipos o procesos que están dentro de una red, haciendo de esta herramienta más adaptable a esta área con la finalidad de mejorar el rendimiento y la transmisión de datos(Tabla 7).

Con la información encontrada en la revisión de literatura se muestra un cuadro de resultados de ventajas de uso de sockets el cual expone que varios autores coinciden que los sockets implementados en el intercambio de flujo de datos generan una comunicación eficiente(Tabla 8).

Además, se puede observar en los usos/aplicaciones descritos en la  la Tabla 7, indican que en las aplicaciones que utilizan sockets y transferencia de archivos de forma paralela hace que la distribución de carga sea equitativa y se eliminen los cuellos de botella y con ello mejore el tiempo de respuesta ante grandes cantidades de solicitudes sin que afecte su rendimiento (Tabla 8).

## Referencias

O. Gómez, A. Machado, and A. Cabrera, "Arquitectura de integración basada en socket para sistemas distribuidos," Espacios, vol. 38, no. 59, p. 6, 2017.

B. Ciubotaru and G.-M. Muntean, Advanced network programming -- principles and techniques : network application programming with java. 2013.

H. Subramoni, F. Petrini, V. Agarwal, and D. Pasetto, "Intra-socket and inter-socket communication in multi-core systems," IEEE Comput. Archit. Lett., vol. 9, no. 1, pp. 13–16, Jan. 2010, doi: 10.1109/L-CA.2010.4.

J. W. Jang and J. S. Kim, "Design issues and performance comparisons in supporting the sockets interface over user-level communication architecture," J. Supercomput., vol. 39, no. 2, pp. 205–226, Feb. 2007, doi: 10.1007/s11227-007-0109-5.

N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and H. Jiang, "Dependable user-level socket over dual networks," J. Parallel Distrib. Comput., vol. 65, no. 10, pp. 1261–1270, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.jpdc.2005.04.016.

D. K. Y. Yau and S. S. Lam, "Migrating sockets - End system support for networking with quality of service guarantees," IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 6, no. 6, pp. 700–716, 2006, doi: 10.1109/90.748083.

W. Chou, "Inside SSL: The secure sockets layer protocol," IT Prof., vol. 4, no. 4, pp. 47–52, Jul. 2002, doi: 10.1109/MITP.2002.1046644.

A. C. Weaver, "Secure Sockets Layer," Computer (Long. Beach. Calif)., vol. 39, no. 4, pp. 88–90, Apr. 2006, doi: 10.1109/mc.2006.138.

H. Si, C. Sun, B. Chen, L. Shi, and H. Qiao, "Analysis of Socket Communication Technology Based on Machine Learning Algorithms under TCP/IP Protocol in Network Virtual Laboratory System," IEEE Access, vol. 7, pp. 80453–80464, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923052.

J. D. Velásquez, "Una guía corta para escribir revisiones sistemáticas de literatura parte 4," DYNA, vol. 82, no. 190, pp. 9–12, 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n190.49511.

Institute of Electrical and Electronic, "IEEE Xplore Digital Library," 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp. [Accessed: 30-Jan-2020].

Science Direct, "ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.," 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/. [Accessed: 30-Jan-2020].

Springer, "Springer Link," 2020. [Online]. Available: https://link.springer.com. [Accessed: 30-Jan-2020].

Taylor & Francis, "Home | Taylor & Francis Group," 2020. [Online]. Available: https://taylorandfrancis.com/. [Accessed: 30-Jan-2020].

Microsoft Academic, "Home | Microsoft Academic," 2020. [Online]. Available: https://academic.microsoft.com/home. [Accessed: 30-Jan-2020].

Scimago Journal & Country Rank, "Scimago Journal & Country Rank," 2020. [Online]. Available: https://www.scimagojr.com/. [Accessed: 30-Jan-2020].

H. J. Fúquene Ardila, "Implementación Cliente Servidor Mediante Sockets," Rev. Vínculos, vol. 8, no. 2, pp. 48–59, 2011, doi: 10.14483/2322939X.4197.

R. L. R. Maata, R. Cordova, B. Sudramurthy, and A. Halibas, "Design and Implementation of Client-Server Based Application Using Socket Programming in a Distributed Computing Environment," in 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICCIC.2017.8524573.

L. Xu, X. Yu, Y. Feng, F. Han, J. Hu, and Z. Tari, "Comparative studies of router-based observation schemes for anomaly detection in TCP/UDP networks," Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., pp. 1832–1837, 2016, doi: 10.1109/ICIT.2016.7475043.

M. Schläger, B. Rathke, S. Bodenstein, and A. Wolisz, "Advocating a remote socket architecture for internet access using wireless LANs," Mob. Networks Appl., vol. 6, no. 1, pp. 23–42, Jan. 2001, doi: 10.1023/A:1009857619490.

S. Blasco, J. Bustos, and D. Rivera, "Detection and Containment Amortization UDP Sockets for Multithreading on Multicore Machines," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 14, no. 6, pp. 2853–2856, Jun. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7555264.

M. H. Wang, L. W. Chen, P. W. Chi, and C. L. Lei, "SDUDP: A Reliable UDP-Based Transmission Protocol over SDN," IEEE Access, vol. 5, pp. 5904–5916, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2693376.

[P. G. S. Florissi, Y. Yemini, and D. Florissi, "QoSockets: A new extension to the sockets API for end-to-end application QoS management," Comput. Networks, vol. 35, no. 1, pp. 57–76, 2001, doi: 10.1016/S1389-1286(00)00150-X.

Jin-Soo Kim, Kangho Kim, and Sung-In Jung, "SOVIA: a user-level sockets layer over virtual interface architecture," Int. Conf. Clust. Comput., pp. 399–408, 2005, doi: 10.1109/clustr.2001.960006.

B. Y. L. Kimura, H. C. Guardia, and E. dos S. Moreira, "A Session-based Mobile Socket Layer for Disruption Tolerance on the Internet," IEEE Trans. Mob. Comput., vol. 13, no. 8, pp. 1668–1680, Aug. 2014, doi: 10.1109/TMC.2013.76.

S. Y. Wang, "Designing and implementing a new type of transport-layer socket: The UDTCP socket case," Comput. Commun., vol. 27, no. 3, pp. 262–272, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.comcom.2003.07.002.

O. Gursoy and M. H. Sharif, "Parallel Computing for Artificial Neural Network Training," Period. Eng. Nat. Sci., vol. 6, no. 1, p. 1, Jan. 2018, doi: 10.21533/pen.v6i1.143.

D. V. Bhatt, S. Schulze, and G. P. Hancke, "Secure Internet Access to Gateway Using Secure Socket Layer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 55, no. 3, pp. 793–800, Jun. 2006, doi: 10.1109/TIM.2005.862009.

N. Lim, S. Majumdar, and V. Srivastava, "Security sieve: a technique for enhancing the performance of secure sockets layer-based distributed systems," Int. J. Parallel, Emergent Distrib. Syst., vol. 31, no. 5, pp. 481–503, Sep. 2016, doi: 10.1080/17445760.2015.1071367.

N. Qveflander, "Pushing real time data using HTML5 Web Sockets," Umea University, 2010.

X. Sotomayor and D. Ordóñez Camacho, "Pizarra Virtual Compartida Websockets; una solución para trabajo remoto colaborativo," Enfoque UTE, vol. 8, no. 1, p. 374, Feb. 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n1.146.

H. H. Tsai, C. T. Chang, X. Y. Hou, Y. M. Yong, K. C. Chiou, and P. T. Yu, "Interactive student response system with iBeacon and web-socket for flipped classroom learning," J. Comput. High. Educ., vol. 31, no. 2, pp. 340–361, 2019, doi: 10.1007/s12528-019-09226-x.

H. Eiraku, Y. Shinjo, C. Pu, Y. Koh, and K. Kato, "Fast networking with socket-outsourcing in hosted virtual machine environments," in Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing, 2009, pp. 310–317, doi: 10.1145/1529282.1529350.

P. Neira-Ayuso, R. M. Gasca, and L. Lefevre, "Communicating between the kernel and user-space in Linux using Netlink sockets," Softw. Pract. Exp., p. n/a-n/a, 2010, doi: 10.1002/spe.981.

J. S. Kim, K. Kim, S. I. Jung, and S. Ha, "Design and implementation of a user-level sockets layer over virtual interface architecture," Concurr. Comput. Pract. Exp., vol. 15, no. 7–8, pp. 727–749, 2003, doi: 10.1002/cpe.721.

C. Shim, R. Shinde, and M. Choi, "Compatibility enhancement and performance measurement for socket interface with PCIe interconnections," Human-centric Comput. Inf. Sci., vol. 9, no. 1, p. 18, Dec. 2019, doi: 10.1186/s13673-019-0170-0.

S. Y. Wang, "Designing and implementing a new type of transport-layer socket: The UDTCP socket case," Comput. Commun., vol. 27, no. 3, pp. 262–272, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.comcom.2003.07.002.

E. Altman, D. Barman, B. Tuffin, and M. Vojnović, "Parallel TCP sockets: Simple model, throughput and validation," Proc. - IEEE INFOCOM, vol. 00, no. c, 2006, doi: 10.1109/INFOCOM.2006.104.

K. L. Eddie Law and R. Leung, "A design and implementation of active network socket programming," in Microprocessors and Microsystems, 2003, vol. 27, no. 5–6, pp. 277–284, doi: 10.1016/S0141-9331(03)00026-7.

D. Goldenberg, M. Kagan, R. Ravid, and M. S. Tsirkin, "Zero copy sockets direct protocol over InfiniBand - Preliminary implementation and performance analysis," Proc. - Symp. High Perform. Interconnects, Hot Interconnects, vol. 8, pp. 1–10, 2005, doi: 10.1109/CONECT.2005.35.

G. L. Taboada, J. Touriño, and R. Doallo, "Java Fast Sockets: Enabling high-speed Java communications on high performance clusters," Comput. Commun., vol. 31, no. 17, pp. 4049–4059, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.comcom.2008.08.012.

K. Malik, O. Khan, T. Mobashir, and M. Sarwar, "Migratable sockets in cluster computing," J. Syst. Softw., vol. 75, no. 1–2, pp. 171–177, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.jss.2004.03.023.

G. You, X. Wang, and Y. Zhao, "An Adaptive Dynamic Request Scheduling Model for Multi-socket, Multi-core Web Servers," Arab. J. Sci. Eng., vol. 42, no. 2, pp. 751–764, 2017, doi: 10.1007/s13369-016-2350-9.

S. Upadhyaya, "Secure Communication Using DNA Cryptography with Secure Socket Layer (SSL) Protocol in Wireless Sensor Networks," Procedia Comput. Sci., vol. 70, pp. 808–813, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.10.121.

H. Wang, G. Bai, and H. Chen, "A Gbps IPSec SSL security processor design and implementation in an FPGA prototyping platform," J. Signal Process. Syst., vol. 58, no. 3, pp. 311–324, 2010, doi: 10.1007/s11265-009-0371-2.

D. A. Zaitsev and K. M.A., "Implementing Stack E6 via OS Linux Sockets," J. Adv. Comput. Sci. Technol., vol. 1, no. 3, pp. 116–133, 2012, doi: 10.14419/jacst.v1i3.274.

# Técnicas de control para el motor de corriente continua: Una Revisión Sistemática de Literatura

**José Jácome[1], Tatyana Saltos[2], Daniel Jaramillo[2], Mathew García[2], Edison Guaichico[2]**
[1] Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ciencias Aplicadas y Económicas. Ibarra, Ecuador
[2]Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador

*jgjacome@utn.edu.ec, tksaltos@utn.edu.ec, edjaramillo@utn.edu.ec, mfgarciag@utn.edu.ec, egguaichicop@utn.edu.ec*

## RESUMEN

La ingeniería de control se especializa en desarrollar procesos de alta calidad mediante el modelamiento matemático de diversos sistemas y el diseño de control que permite regular el comportamiento de un sistema utilizando condiciones deseadas. Las técnicas de control que se utilizan para el motor de corriente continua son de mucha utilidad al momento de llevar a cabo una estabilización de la velocidad o el par, algunas de ellas pertenecen a técnicas de control inteligente (lógica difusa y redes neuronales), pero la mayoría se centra en las técnicas de control clásicas (PI, PID) logrando resultados satisfactorios. Las técnicas de modelamiento matemático facilitan la representación de las ecuaciones diferenciales, dependiendo del tipo del motor DC se han utilizado diferentes técnicas (transformada de Laplace, espacio de estados). El software y hardware tienen una fuerte relación con lo que se refiere a las simulaciones y experimentaciones que se usan para validar el funcionamiento de un sistema complejo como lo es el motor CC. En este trabajo se presenta una revisión sistemática de literatura sobre técnicas de control, técnicas de modelamiento matemático, software y hardware que se aplican en un motor de corriente continua, para ello se analizaron y 75 artículos científicos de los últimos 4 años provenientes de cinco bases bibliográficas (IEEE Xplore, Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, Preprints). Los documentos responden a tres preguntas de investigación planteadas en este estudio. Por medio de los resultados obtenidos se identificaron grandes ventajas y desventajas de las técnicas de control y modelamiento matemático, con respecto al software y hardware se demostró su gran utilidad para la realización de sistemas automatizados.

**Keywords:** técnicas de control, modelamiento matemático, motor de corriente continua, software, hardware, SLR

## Introducción

En la actualidad, la ingeniería de control se ha destacado por sus grandes avances en las áreas de la informática y matemática, incursionando en sistemas automatizados que aportan grandes beneficios en el estilo de vida del ser humano, uno de aquellos sistemas es el motor de corriente continua que transforma la energía eléctrica en energía mecánica [1]; además, tiene diversas aplicaciones, como por ejemplo se utiliza de una manera muy eficiente en máquinas textiles, ventiladores, grúas [2], producción industrial y agrícola, transporte aeroespacial [3], etc. Es importante recalcar que existen otras variaciones del motor de corriente continua que son mejores en distintos aspectos, tal es el caso del motor de corriente continua sin escobillas (BLDCM) que ofrece una ventaja de alta eficiencia a largo periodo, bajo nivel de ruido, mejor velocidad-torque [4], tiene un control de diseño simple, baja potencia de alcance y requiere un funcionamiento sin mantenimiento [5], también tiene varias aplicaciones en la automatización industrial y en la ingeniería de fabricación [6].

El motor de corriente continua es un sistema complejo que contiene variedad no lineales, como la resistencia de armadura [7], que para controlar los problemas como el mencionado anteriormente, se han llevado a cabo múltiples estudios que demuestran que con la aplicación de controladores clásicos, controladores inteligentes y muchos otros tipos más se puede realizar una estabilización adecuada de lo que se requiera controlar, como por ejemplo la velocidad, que es uno de los factores más importantes al momento del modelado del motor DC.

El principal propósito de esta investigación es llevar a cabo una revisión sistemática de literatura (SLR) para adquirir información reciente de trabajos efectuados sobre técnicas de control para el motor de corriente directa, incluyendo sus técnicas matemáticas y las herramientas utilizadas para la simulación o experimentación que fueron usadas para la comprobación del funcionamiento del controlador. Los trabajos anteriormente mencionados utilizan diversas técnicas que en su mayoría son de tipo clásico e inteligente. Por lo tanto, es preciso identificar nuevos desafíos y tendencias en el desarrollo de sistemas que sean de amplia utilidad y al mismo tiempo, brinden eficiencia y exactitud. Las preguntas de

investigación que se plantearon en este trabajo fueron las siguientes:

- ¿Qué técnicas de control se emplearon para el motor de corriente continua?
- ¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para las ecuaciones diferenciales del motor DC?
- ¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones del motor DC?

En la siguiente sección, se explica la metodología empleada para la elaboración de la revisión sistemática de literatura (SLR).

## Metodología

El proceso de revisión se presenta en la Figura 1, el mismo que consta de cuatro pasos: (i) Preguntas de Investigación, (ii) búsqueda de documentos, (iii) selección de artículos, (iv) extracción de datos relevantes. A continuación, se describe cada una de las fases.

### Preguntas de Investigación

Se plantearon tres preguntas de investigación (PI), Tabla 1, que son referentes en el proceso de revisión sobre el tema de estudio, el cual aborda las técnicas de control para el motor de corriente continua junto con sus técnicas matemáticas y los instrumentos para la demostración del controlador. Se consideraron cinco bases de datos científicas que son: IEEE Xplore, Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate y Preprints.

**Tabla 1: Preguntas de investigación (PI)**

| Número | Preguntas de investigación | Motivación |
|---|---|---|
| PI1 | ¿Qué técnicas de control se emplearon para un motor de corriente continua? | Identificar las técnicas de control empleadas en el motor de corriente continua. |
| PI2 | ¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para obtener las ecuacio-nes diferenciales de un motor de corriente continua? | Conocer las técnicas matemáticas para formu-lar las ecuaciones diferenciales del motor DC. |
| PI3 | ¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC? | Reconocer las herramientas usadas para la experimentación o simulación de cada uno de los estudios referentes al motor de corriente continua. |

### Búsqueda de documentos

Para la búsqueda de los documentos se utilizó como cadena de búsqueda principal: ((“direct current motor controller” OR “DC motor controller”) AND (“DC motor PID controller” OR “direct current motor PID controller”)). Además, se utilizaron otras variantes de las cadenas de búsqueda con el objetivo de obtener mejores resultados. La Tabla 2 presenta las cadenas de búsqueda en cada base de datos y las combinaciones utilizadas, considerando que cada base de datos tiene un criterio de búsqueda diferente. Un total de 80 documentos fueron encontrados, de los cuales 40 pertenecen a IEEE Xplore, 8 a SpringerLink, 9 a ScienceDirect, 22 a ResearchGate y 1 a Preprints.

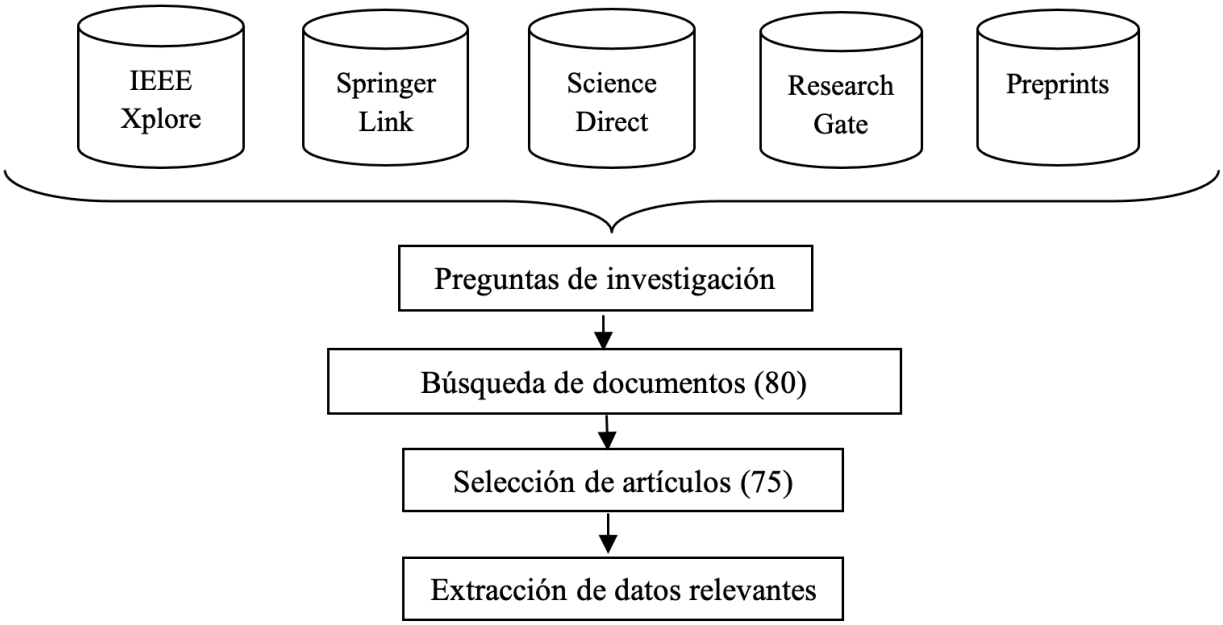



*Figura 1. Diagrama del protocolo utilizado en la SLR*

**Tabla 2: Cadenas de búsqueda utilizadas en las bases de datos científicas**

| Criterio | IEEE Xplore | SpringerLink | ScienceDirect | ResearchGate | Preprints |
|---|---|---|---|---|---|
| Cadena de búsqueda | (("direct current motor controller" OR "DC motor controller") AND ("DC motor speed control")) | (("direct current motor PID controller" OR "DC motor PID controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")) | (("direct current motor PI controller" OR "DC motor PI controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")) | (("direct current motor Fuzzy Logic controller" OR "DC motor fuzzy logic controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")) | DC motor Artificial Neural Network controller |
| Total | 40 | 8 | 9 | 22 | 1 |

## Selección de artículos

Para la selección de artículos se consideraron tres fases. En la primera se llevó a cabo utilizando criterios de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión considerados por los autores fueron: (i) artículos científicos, (ii) conferencias, (iii) estudios centrados en el control de diferentes tipos de motores DC. Todos los trabajos son relacionados con el área de ingeniería de control, publicados durante los últimos 4 años (2015-2019) en idioma inglés. Los criterios de exclusión considerados por los autores fueron: (i) trabajos duplicados, (ii) investigaciones basadas en otros campos de conocimiento, entre otros.

En la segunda fase se tomó en cuenta, que los documentos estén en categoría Q1, Q2 o con un SJR mayor a 0.6. Adicionalmente, en los artículos se puso mayor interés en el título, resumen y palabras clave.

Por último, en una tercera fase se revisó la introducción y las conclusiones de las publicaciones, con el fin de verificar si tienen relación con las preguntas de investigación. El número total de documentos recuperados después de la ejecución de las tres fases se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Selección de artículos para la SLR**

| Base de datos | Fase I | Fase II | Fase III |
|---|---|---|---|
| IEEE Xplore | 40 | 39 | 39 |
| ScienceDirect | 9 | 9 | 7 |
| ResearchGate | 22 | 21 | 20 |
| SpringerLink | 8 | 8 | 8 |
| Preprints | 1 | 1 | 1 |
| **Total** | **80** | **78** | **75** |

El detalle de los 75 artículos científicos finalmente seleccionados se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4: Artículos seleccionados para la SLR**

| Código | Título | Base de datos bibliográfica | Año | País |
|---|---|---|---|---|
| A1 | Peak-to-Peak Filtering for Networked Nonlinear DC Motor Systems with Quantization | IEEE | 2018 | USA |
| A2 | Adaptative Control of DC Motor Servo System with Application to Vehicle Active Steering | IEEE | 2019 | USA |
| A3 | A DC/DC Buck-Boost Converter-Inverter-DC Motor System: Sensorless Passivity-Based Control | IEEE | 2018 | USA |
| A4 | Brushless DC motor-driven gird-interfaced solar water pumping system | IEEE | 2018 | Reino Unido |
| A5 | Maximum Output Torque Control in Improved Flux Path Homopolar Brushless DC Motor With Axillary Field by Using Optimal Control of Turn-ON and Turn-OFF Angles in Variable Speed Applications | IEEE | 2018 | USA |
| A6 | An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms | Springer | 2017 | Alemania |
| A7 | Adaptive Robust Triple-Step Control for Compensating Cogging Torque and Model Uncertainty in a DC Motor | IEEE | 2018 | USA |
| A8 | Anti-oscillation and chaos control of the fractional-order brushless DC motor system via adaptive echo state networks | Springer | 2018 | Reino Unido |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A9 | Adaptively Estimating Rotation Speed From DC Motor Current Ripple for Order Tracking and Fault Diagnosis | IEEE | 2018 | USA |
| A10 | Kriging-Assisted Robust Black-Box Simulation Optimization in Direct Speed Control of DC Motor Under Uncertainty | IEEE | 2018 | USA |
| A11 | UAV Power Component—DC Brushless Motor Design With Merging Adjacent-Disturbances and Integrated-Dispatching Pigeon-Inspired Optimization | IEEE | 2018 | USA |
| A12 | Numerical and Experimental Investigation of an Improved Flux Path Brushless DC Machine for Variable Speed Applications | IEEE | 2018 | USA |
| A13 | Design Optimization and Performance Comparison of Two Linear Motor Topologies With PM-Less Tracks | IEEE | 2018 | USA |
| A14 | Online Stator Resistance Tracking for Reluctance and Interior Permanent Magnet Synchronous Motors | IEEE | 2017 | USA |
| A15 | Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors | IEEE | 2019 | USA |
| A16 | Observer-Based Adaptive SMC for Nonlinear Uncertain Singular Semi-Markov Jump Systems With Applications to DC Motor | IEEE | 2018 | USA |
| A17 | Adaptive dynamical tracking control under uncertainty of shunt DC motors | ScienceDirect | 2018 | Holanda |
| A18 | A Commutation Torque Ripple Suppression Strategy for Brushless DC Motor Based on Diode-Assisted Buck-Boost Inverter | IEEE | 2018 | USA |
| A19 | Modelling and experimental research of fault-tolerant dual-channel brushless DC motor | IEEE | 2018 | Reino Unido |
| A20 | Adaptive Neural Networks Control Using Barrier Lyapunov Functions for DC Motor System with Time-Varying State Constraints | ResearchGate | 2018 | Egipto |
| A21 | A Robust Differential Flatness-Based Tracking Control for the "MIMO DC/DC Boost Converter–Inverter–DC Motor" System: Experimental Results | IEEE | 2019 | USA |
| A22 | Commutator fault detection of brushed DC motor using thermal assessment | ResearchGate | 2019 | Reino Unido |
| A23 | DC motor parameter identification using equation error method | Springer | 2018 | USA |
| A24 | Analytical model for armature reaction of outer rotor brushless permanent magnet DC motor Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller | IEEE | 2018 | Reino Unido |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A25 | Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller | ResearchGate | 2018 | USA |
| A26 | Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: a Technology Status Review | IEEE | 2018 | USA |
| A27 | Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control | ScienceDirect | 2015 | Egipto |
| A28 | Maximum Power Point Tracking for Brushless DC Motor-Driven Photovoltaic Pumping Systems Using a Hybrid ANFIS-FLOWER Pollination Optimization Algorithm | Preprints | 2018 | USA |
| A29 | A Trajectory Tracking Control for a Boost Converter–Inverter–DC Motor Combination | IEEE | 2018 | USA |
| A30 | Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control | ScienceDirect | 2018 | Egipto |
| A31 | A Simple Voltage Modulator Scheme for Torque Ripple Minimization in a Permanent Magnet Brushless DC Motor | IEEE | 2019 | USA |
| A32 | An adaptive sliding mode observer over wide speed range for sensorless control of a brushless DC motor | ScienceDirect | 2018 | USA |
| A33 | Loss model based efficiency optimized control of brushless DC motor drive | ScienceDirect | 2019 | USA |
| A34 | Torque Ripple Minimization Control Technique of High-Speed Single-Phase Brushless DC Motor for Electric Turbocharger | IEEE | 2018 | USA |
| A35 | A Direct Redundancy approach to Fault Tolerant Control of BLDC Motor with a damaged Hall-effect Sensor | IEEE | 2019 | USA |
| A36 | High-Stability Position-Sensorless Control Method for Brushless DC Motors at Low Speeds | IEEE | 2018 | USA |
| A37 | Improved Finite Control-Set Model-Based Direct Power Control of BLDC Motor with Reduced Torque Ripple | IEEE | 2018 | USA |
| A38 | Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller | ScienceDirect | 2018 | Arabia Saudita |
| A39 | Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm | ResearchGate | 2019 | Indonesia |
| A40 | The Use of a Statistical Filter and Metaheuristics to Model and Control the DC Motor of the Mobile Robot Used on NXP Cup | ResearchGate | 2018 | Pakistán |
| A41 | Agent-based consensus on speed in the network-coupled DC motor | Springer | 2018 | Alemania |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A42 | Robust Predictive Speed Regulation of Converter-Driven DC Motors Via A Discrete-Time Reduced-Order GPIO | IEEE | 2018 | USA |
| A43 | A Novel Control Algorithm for DC Motors supplied by PVs Using Fuzzy Cognitive Network | IEEE | 2018 | USA |
| A44 | Direct Active and Reactive Power Control of Three-Phase Inverter for AC Motor Drives With Small DC-Link Capacitors Fed by Single-Phase Diode Rectifier | IEEE | 2019 | USA |
| A45 | Torque Control of a DC Motor With a State Space Estimator and Kalman Filter for Vehicle Traction | IEEE | 2018 | USA |
| A46 | SPEED CONTROL OF DIRECT CURRENT MOTOR USING MECHANICAL CHARACTERISTICS | ResearchGate | 2019 | China |
| A47 | Control of separately excited DC motor with series multi-cells chopper using PI - Petri nets controller | ResearchGate | 2018 | Alemania |
| A48 | Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism | ResearchGate | 2017 | Alemania |
| A49 | Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor | Springer | 2018 | Alemania |
| A50 | Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm | IEEE | 2019 | USA |
| A51 | Demonstrative fractional order – PID controller based DC motor drive on digital platform | Science-Di-rect | 2017 | USA |
| A52 | Robust flat filtering control of a nonlinear manipulator-DC motor system | ResearchGate | 2017 | USA |
| A53 | Design and Dynamic Study of a 6 kW External Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Drivetrains | IEEE | 2015 | USA |
| A54 | A new fuzzy logic estimator for reduction of commutation current pulsation in brushless DC motor drives with three-phase excitation | Springer | 2017 | Alemania |
| A55 | Line Voltage Difference Integral Method of Commutation Error Adjustment for Sensorless Brushless DC Motor | IEEE | 2018 | USA |
| A56 | Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement | IEEE | 2018 | USA |
| A57 | Design and Comparative Study of Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter With DC Motor Speed Control | IEEE | 2018 | USA |
| A58 | Tracking Control for a DC Microgrid Feeding Uncertain Loads in More Electric Aircraft: Adaptive Backstepping Approach | IEEE | 2018 | USA |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| A59 | An Efficient Position Tracking Smoothing Algorithm for Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drives | ResearchGate | 2018 | Egipto |
| A60 | Improved Stabilization of Nonlinear DC Microgrids: Cubature Kalman Filter Approach | IEEE | 2018 | USA |
| A61 | Simulation Study for Controlling Direct Current Motor Position Utilising Fuzzy Logic Controller | ResearchGate | 2018 | Malasia |
| A62 | Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller | ResearchGate | 2018 | Indonesia |
| A63 | Performance Study of Enhanced Non-Linear PID Control Applied on Brushless DC Motor | ResearchGate | 2018 | Indonesia |
| A64 | The Control of Brushless DC Motor for Electric Vehicle by Using Chaotic Synchronization Method | ResearchGate | 2018 | Rumanía |
| A65 | Brushless DC Motor Speed Controller for Electric Motorbike | ResearchGate | 2018 | Indonesia |
| A66 | Speed Control of BLDC Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System Based on Fuzzy-PI Controller | ResearchGate | 2018 | USA |
| A67 | The neural network-based control system of direct current motor driver". | ResearchGate | 2019 | Indonesia |
| A68 | GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor | ResearchGate | 2019 | Indonesia |
| A69 | Quantitative Feedback Theory based Robust Controller Design for Speed Control of DC Moto | | 2018 | Singapur |
| A70 | Adaptive controller with RBF neural network for induction motor drive | ResearchGate | 2018 | USA |
| A71 | Use of Electrooculography (EOG) and Facial Expressions as Part of the Brain-Computer Interface (BCI) for Controlling an Electric DC Motor". | | 2018 | Singapur |
| A72 | PI Controller of Speed Regulation of Brushless DC Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Inertia Weights | ResearchGate | 2019 | Egipto |
| A73 | Torque Control in Brushless DC Motor Using Intelli-gent Linear Quadratic Regulator Controller | | 2018 | Singapur |
| A74 | Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller | | 2019 | Corea del Sur |
| A75 | Optimal Synchronizing Speed Control of Multiple DC Motors | ResearchGate | 2018 | Singapur |

**Extracción de datos relevantes**

Los 75 artículos seleccionados (Tabla 4) se registraron en una matriz, para responder de una manera ordenada las preguntas de investigación y también se realizó un resumen de 150 palabras de cada uno con la información más importante.

En caso de artículos que presentaron técnicas de control o de modelamiento matemático con más de un método se clasifico en un solo grupo, de igual manera se hizo con el software y hardware.

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las tres preguntas de investigación planteadas en este trabajo (Tabla 1):

**PI 1 ¿Qué técnicas de control se emplearon para un motor de corriente continua?**

En total 68 artículos presentaron técnicas de control para el motor de corriente continua (91%). Algunos de los estudios describieron una o más métodos, los cuales se resumen a continuación:

**PID (Proporcional, integral y derivativo):**En [8], se presentó un sistema de bombeo solar de agua que empleó un motor de corriente continua sin escobillas, el controlador utilizado para la compensación del bucle fue un PID.

En el trabajo de [9], se empleó un controlador PID para regular el voltaje del terminal de la bobina de campo CC de un motor de corriente continua sin escobillas homopolar con trayectoria de flujo mejorada (IFP-HBLDC).

En [10], se aplicó un método conocido como seguimiento OT en el cual múltiplos de la frecuencia de rotación en lugar de las frecuencias absolutas son analizadas para diagnóstico de fallas, este mostró aplicaciones potenciales bajo las condiciones de variación de velocidad y la falta de codificador en el locomotor.

El fin de la investigación [11] fue proponer un control de corriente de campo que reguló el voltaje de salida en el valor deseado de un motor CC sin escobillas de imán permanente.

En [12], se implementó un conmutador que detectó fallas, cabe destacar que se utilizó el análisis de firma térmica de cepillado en motores de corriente continua lo cual es inusual.

Adicionalmente, un controlador PID puede ser empleado para llevar a cabo investigaciones sobre la identificación de motores, por ejemplo en [13] se utilizó transitorios medidos experimentalmente para un motor que arrancó mediante un controlador PID. La identificación se basó en utilizar la ecuación de error que fue elegida por su capacidad de trabajar con dos datos ruidosos.

En el trabajo [14] se presentó un modelo analítico para calcular el campo magnético de reacción de la armadura del rotor externo permanente de un motor DC magnético sin escobillas (PMBLDCM) en el sistema de coordenadas estacionarias del estator (SSCS) y el sistema de coordenadas de rotación del rotor (RRCS).

Se diseñó un controlador de velocidad para el motor DC sin escobillas (motor BLDC) basado en el controlador Gray-PID, de esta manera al arrancar el motor o un cambio repentino de la velocidad se puede realizar con tiempos de subida y de reposo cortos, sin sobrepasar y sin error de estado estacionario, el controlador propuesto, también, tiene una gran capacidad de restringir la fluctuación de velocidad causada por la perturbación de carga [15].

En [16] se llevó a cabo una revisión actualizada de los parámetros y métodos de identificación para motores de corriente alterna que fueron controlados a través de un PID.

En el estudio de [17], se utilizó dos tipos de controles que se aplicaron en el motor DC de alto rendimiento que fueron un control PID difuso y un control adaptativo de referencia (MRAC), el objetivo del algoritmo de control fue forzar la velocidad del rotor a seguir la velocidad de referencia deseada con buena precisión todo el tiempo.

Un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en el Firefly algorithm (FA) para motor DC sin escobillas (BLDC) fue propuesto para lograr un control efectivo del par y la velocidad [18].

En [19], se implementó un controlador de diseño óptimo del control de velocidad del motor DC sin escobillas dependiendo en el algoritmo genético (GA), los autores introdujeron una energía renovable como fuente de células fotovoltaicas para alimentar el BLDC, de esta manera les resulto más fácil crear el controlador.

Un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en el algoritmo discreto de luciérnaga (DFA) es propuesto para mejorar el rendimiento de un helicóptero alimentado directamente al accionamiento del motor de corriente continua actual [20].

En [21], se abordó el análisis comparativo y de robustez de un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en la optimización del lobo gris (GWO) para el control de velocidad del motor de CC.

Se incluyó el algoritmo de optimización de búsqueda atómica (ASO) y una nueva versión caótica del mismo (ChASO) para determinar los parámetros óptimos de un controlador PID de orden fraccional [22].

En la investigación de [23], se realizó digitalmente un controlador PID de orden fraccional (FOPID) para control de motor de CC, cabe destacar que se implementó el PSO que es un método para optimizar funciones numéricas difíciles, análogo al comportamiento social de bancos de peces, bandadas de pájaros, etc.

Se estudiaron los parámetros electromagnéticos y paramétricos para el diseño y análisis de rendimiento de un out-runner en la rueda de un motor eléctrico BLDC (corriente continua sin escobillas) diseñado específicamente para aplicaciones automotrices [24].

El propósito de la investigación [25] fue exponer un modelo analítico de flujo de espacio de aire de un motor en buen estado, proponiendo una nueva técnica para detección temprana de fallas en la barra del rotor y excentricidad mixta entre ellos mediante un controlador PID.

En [26], se diseñaron tres métodos de control para buscar los mejores puntos de poder del panel fotovoltaico del motor de CC. El primer método fue perturbar. El segundo método fue un controlador PID, las ganancias del controlador se obtuvieron mediante el uso de prueba y proceso de error. El tercer método fue un controlador PID derivado basado en algoritmo de búsqueda de bacterias.

Un controlador PID no lineal mejorado (NPID) fue propuesto en [27] para seguir un perfil de velocidad preseleccionado del sistema de accionamiento del motor DC sin escobillas (BLDC), este controlador constó de dos partes, la primera fue una ganancia no lineal limitada por sector mientras que la segunda parte fue un controlador PID de ganancia fija lineal.

Se diseñó un controlador PID para mantener la velocidad del motor CC en su estado óptimo, asegurando así una mayor duración de la batería (hasta la próxima carga), además sirvió para rastrear las variaciones de referencias de velocidad [28].

En el estudio [29] se implementó un modelo de control adaptativo de referencia (MRAC) para motores BLDC junto con un controlador PID sintonizado por GA-ANFIS. Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) es una combinación de una red neuronal artificial y un sistema de inferencia difusa y GA se refiere al algoritmo genético que fue el más adecuado para el sistema.

La electroencefalografía (EEG) y electrooculografía (EOG) fueron expuestas en [30] para implementar un controlador PID para el motor DC, el sistema fue construido con el uso del bioactivo, sensores montados en la cabeza que fueron activados por la señal de los ojos en movimiento y expresiones faciales.

En [31], emplearon un controlador PID para que múltiples motores DC pudieran trabajar juntos de manera sincronizada. Uno de los motores de CC se consideró como motor líder y rastreó su trayectoria de velocidad deseada. El otro motor de CC se controló a través de un óptimo líder basado en seguidor. Si el líder se ralentizaba o aceleraba por alguna razón, el seguidor motor DC sincronizaba su velocidad de acuerdo con el líder sin tener algún conocimiento sobre la trayectoria deseada.

**PI (Proporcional e integral):** En [32], plantearon como objetivo controlar el motor mediante el seguimiento de velocidad de la variable que se desea. Un ESO es un tipo de observador que puede estimar la dinámica interna y las perturbaciones extras, se usó esencialmente para estimar la incertidumbre del modelo. Un controlador PI analógico se utilizó para controlar la corriente del inductor.

Un método de inyección para estimación de líneas y seguimiento de la resistencia del estator que se basó en que el patrón convencional fundamentado en la perturbación de voltaje y la medición de corriente se invierte fue utilizado para que desde el inyectado la señal no actúe como perturbación para el controlador actual que se compone de dos controladores PI independientes [33].

En [34], se presentó un enfoque práctico para modelar y analizar los efectos térmicos transitorios en tractos eléctricos refrigerados por aire con motores de iones.

En la investigación de [35], se suprimió efectivamente la ondulación de par de conmutación en el rango de velocidad completa mediante vectores de conmutación unificados durante el periodo de conmutación. Un PI se utilizó para controlar la velocidad y corriente del motor BLDC.

Un estudio para resolver la ondulación de torque fue realizado en [36], el cual fue un esquema donde el controlador aplicó un voltaje apropiado en los terminales del motor DC. Un control PI controló la velocidad y corriente del sistema.

Se empleó un circuito de control de velocidad externo para el motor de corriente continua sin escobillas que utilizó un controlador proporcional integral que produjo la referencia del torque [37].

En [38], se usó un controlador PI para implementar una compensación del circuito cerrado. El método de control sin sensor de posición para BLDC a baja velocidad fue presentado en este trabajo.

En [39], se estableció un motor DC conectado que se maneja mediante el uso de una comprensión difusa y modulación de la señal de controlador central, un compensador difuso usa señal de error como salida y un controlador PI como entrada produciendo así unas señales de modulación que modulan la salida.

En el estudio de [40], se utilizó unos controladores de redes proporcionales-integrales (PI) que sirvieron para controlar la velocidad del motor DC excitado y Petri que aseguraron la regulación de corriente del inducido y mantuvieron el voltaje del condensador del convertidor de celdas múltiples.

En [41], propusieron un controlador PI difuso de entrada única (SIFPIC) en el que una nueva variable llamada distancia fue propuesta como la entrada del controlador y además se empleó para controlar la velocidad del motor DC sin escobillas (BLDC).

En el trabajo de [42], se presentó un sistema de control de velocidad del motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) de cuatro fases para el sistema EHPS basado en un controlador PI que se diseñó de acuerdo con diferentes rangos de velocidad y un controlador difuso de dos dimensiones fue diseñado para ajustar las ganancias de PI.

Los parámetros del controlador PI del motor BLDC se optimizaron por PSO (optimización por enjambre de partículas) algoritmo con cinco estrategias de ajuste de peso de inercia (peso de inercia descendente lineal, inercia diferencial lineal descendente, el peso de inercia decreciente incremental, peso de inercia descendente no lineal con umbral y descendente no lineal peso de inercia con factor de control) [43].

**Control de lógica difusa (FLC):** En [7], se implementó un modelo difuso TS (Takagi Sugeno) que se usó para aproximar el motor CC no lineal, este modelo es cuantificado mediante cuantificadores estáticos.

Unos controladores definidos en la etapa de línea (PID y de lógica difusa) fueron alimentados por el error de retroalimentación debido a la variabilidad del sistema del motor DC por medio de la incertidumbre [44].

En el estudio de [45], se llevó a cabo un controlador de lógica difusa adaptativo para el control preciso de la velocidad de un motor de corriente continua. El controlador se estimó a partir de dos niveles, donde el nivel inferior utilizó un control difuso Mamdani y el nivel superior un modelo inverso basado en un método Takagi, en el que su salida se utilizó para adaptar los parámetros del controlador difuso en el nivel inferior.

La utilización del algoritmo difuso permite ajustar la capa límite de acuerdo con la velocidad variable de un motor DC sin escobillas (BLDCM), se consideró un estado estable de fluctuaciones a alta velocidad y un error estacionario a alta velocidad [46].

En [47], establecieron un motor DC que funcionó con un generador fotovoltaico, mientras este motor se alimentaba con corriente adecuada, se logró controlarlo a través de un convertidor DC controlado por una red cognitiva difusa (FCN), en paralelo con la energía del dispositivo (batería) para que la energía fotovoltaica sea siempre totalmente explotable.

En la investigación de [48], se realizó un estudio sobre un motor DC sin escobillas con excitación trifásica, para ello presentaron un estimador de lógica difusa (FLE) cuya función fue simplemente regular la conmutación del ángulo de acción con precisión para mantener la misma rotación actual.

Un motor de CC sin escobillas (BLDCM) sin sensor sufre la señal de conmutación inexacta. Para lograr una conmutación precisa, en [49] presentaron un nuevo método de compensación de error de conmutación para BLDCM sin sensor que se complementó con un controlador de lógica difusa.

En [50], utilizaron un controlador de lógica difusa (FLC) para llevar a cabo el control de la posición de un motor de corriente continua (CC).

**Control por medio de redes neuronales:** El problema de control de seguimiento de la derivación de motores de corriente continua que funcionan bajo incertidumbre en los parámetros del sistema fue solucionado en [2]. Unas redes neuronales artificiales y un error de seguimiento dinámico se emplearon para la síntesis del control adaptativo.

En [3], se llevó a cabo un método de control de seguimiento adaptativo para sistemas de motor CC con estado variable en el tiempo que se basó en unas redes neuronales y una técnica de retroceso fue estructurada para garantizar que todas las señales del sistema de circuito cerrado estuviesen limitadas.

Se empleó una bomba fotovoltaica dirigida por BLDC con convertidor Luo. Para el trabajo propuesto se consideró un modelo de célula fotovoltaica de dos diodos y un controlador híbrido que mezcló un controlador de red neuronal artificial y de lógica difusa [5].

En [51], se efectúo un sistema para el motor DC que consta de dos redes neuronales: una primera red neuronal se utiliza para estimar la velocidad del motor de corriente continua y una segunda red neuronal de controlador, que se utiliza para generar una señal de control para controlar la planta (el convertidor).

En el trabajo de [52], se utilizó una red neuronal de la función de base radial que se empleó para compensar la no linealidad que proviene de las ecuaciones de estado no lineales del motor de inducción.

El objetivo principal de la investigación [53] fue controlar la velocidad de un motor CC excitado por separado (SEDM) con un nuevo controlador neuronal difuso (FN). El diagrama de control propuesto resolvió el problema de la configuración de parámetros del controlador (FN), más efectivamente con el uso de un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO).

**Filtro de Kalman:** En [54], estimaron los parámetros de un motor de corriente continua a través de un filtro de Kalman mediante el uso de un algoritmo genético.

En [55], se usó un filtro de Kalman que actúo estimando el estado del sistema diseñado con un paso de predicción en el motor CC, también filtró la medida ruidosa de la salida, se consideró que el ruido es ortogonal a la señal.

En la investigación de [56], emplearon un filtro Kalman de cubicación de grado (CKF) que estuvo desarrollado para un motor DC MG. El propósito del control fue encontrar el valor de la función de posición del interruptor que estabilizó la salida en la tensión del convertidor hacia su valor deseado.

La posición y la velocidad del rotor de un motor BLDC sin sensores se estimaron a partir del voltaje y la corriente de entrada utilizando un filtro Kalman extendido [57].

En [58], utilizaron un filtro de Kalman de cubicación (CFK) que es robusto contra la incertidumbre del sistema ruidoso y tiene un tiempo de cálculo bajo para el orden superior DC MG, con una gran cantidad de fuentes, de esta manera se logró la estabilización de micro redes DC no lineales (MG).

**Control backstepping:** Una técnica de retroceso o de backstepping se utilizó para generar la ley de control y la ley adaptativa de un servosistema de un motor de corriente continua [59].

En [6], abordaron un esquema anti-oscilación y control del caos para un sistema de motor CC sin escobillas de orden fraccional caracterizado por una dinámica desconocida, variación de parámetros, estados inconmensurables y oscilación caótica. Se introdujo un filtro de orden fraccional para abordar el problema de backstepping.

**Metaheurística:** En el estudio de [60], se mostraron seis técnicas metaheurísticas diferentes que se utilizaron para encontrar una solución a la optimización de los parámetros de un motor DC y fueron las siguientes: algoritmo Evolución Diferencia, optimización de enjambre de partículas, de murciélago, de luciérnaga, búsqueda de lobo, genético.

Para maximizar la eficiencia del sistema de energía de un motor BLDC, el algoritmo de optimización inspirado en las palomas (PIO) fue utilizado al convertir el problema del diseño de parámetros en un problema de optimización [4].

**Control de modo deslizante (SMC):** En [61], propusieron una ley basada en el control de modo deslizante (OBASMC) para el motor DC de tal manera que se pudo garantizar las respuestas estatales que convergen hacia la superficie de conmutación deslizante en tiempo finito (SWSIFT).

En la investigación de [62], se proporcionó un enfoque novedoso de los problemas relacionados con el control de modelos caóticos de los motores BLDC. Un controlador de modo deslizante (SMC) se realizó en dos pasos, como superficie deslizante y como conmutación de ley de control. Un sistema PI se prefirió porque realiza bien el control del sistema caótico no lineal. Un control adaptativo puede ajustarse a los cambios del sistema dependiendo en el parámetro estimado.

**Control LQR (Regulador Lineal Cuadrático):** En [63], se llevó a cabo un control basado en la teoría de retroalimentación cuantitativa utilizando LQR que proporcionó conformación automática de bucle para los parámetros de ajuste del controlador, especialmente para la ganancia del motor DC.

En el estudio de [64], implementaron un controlador (LQR) usando un algoritmo cultural modificado artificial de enjambre de peces con cruce que se implementó para obtener los valores óptimos de las matrices del controlador LQR para una mejor salida del torque del motor DC.

**Modelo de control predictivo (MPC):** El mayor problema de regulación de velocidad predictiva de un motor CC genérico de imán permanente accionado por convertidor reductor es solucionado usando un modelo de tiempo discreto de retroalimentación de salida con algoritmos de control predictivo, además se usó el controlador GPIO (Entrada/ Salida de Propósito General) para resolver una optimización del horizonte restringido [65].

**Control basado en pasividad:** En [66], se propuso un control DC Buck-Boost convertidor inversor DC que usó la dinámica de error de seguimiento exacto de retroalimentación de salida pasiva (ETEDPOF) para cambiar la dirección del flujo de corriente que ingresó al motor.

Se diseñó un control basado en pasividad para el sistema convertidor de CD/CD Boost-inversor-motor de DC que logró el manejo de velocidades angulares bidireccionales [67].

**Control tolerante a fallas (FTC):** Después de una falla de un canal en un motor DC de dos canales, se puede continuar una operación adicional de la máquina en el llamado modo de operaciónde canal único (SCO) [68].

La finalidad de la investigación [69] fue detectar fallas por medio de un método basado en redundancia directa utilizando seis sensores de efecto Hall en un motor BLDC que generan transiciones adicionales.

En la Tabla 5 se resume las técnicas de control aplicadas para un motor de corriente continua.

**Tabla 5: Técnicas de control para un motor de corriente continua**

| Técnica de control | Artículos seleccionados | Nro. Artículos |
|---|---|---|
| PID | A4, A5, A9, A12, A22, A23, A24, A25, A26, A30, A38, A39, A48, A49, A50, A51, A53, A56, A57, A63, A65, A68, A71, A75 | 24 |
| PI | A7, A14, A15, A18, A31, A36, A37, A41, A47, A62, A66, A72 | 12 |
| Control de lógica difusa | A1, A10, A27, A32, A43, A54, A55, A61 | 8 |
| Control por redes neuronales | A17, A20, A28, A67, A70, A74 | 6 |
| Filtro de Kalman | A40, A45, A58, A59, A60 | 5 |
| Control backstepping | A2, A8 | 2 |
| Metaheurística | A6, A11 | 2 |
| Control de modo deslizante | A16, A64 | 2 |
| Control LQR | A69, A73 | 2 |
| Modelo de control predictivo | A42 | 1 |
| Control basado en pasividad | A3, A29 | 2 |
| Control tolerante a fallas | A19, A35 | 2 |
| Total | | 68 |

**PI2 ¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua?**

En total 22 artículos llevaron a cabo el modelamiento matemático de las ecuaciones de estado de un motor de corriente continua (29%). Algunos de los artículos implementaron uno o más métodos, los cuales se resumen a continuación:

**Espacio de estados:** En [59], se utilizó la técnica de espacio de estados para desarrollar un modelo matemático adecuado que genere un pequeño torque.

La convergencia del tiempo de los algoritmos que se presentó en los controladores basados en metaheurística fue solucionada utilizando espacio de estados [60].

Un método de control de seguimiento dinámico propuesto en [2] se pudo extender a una amplia clase de sistemas dinámicos controlables en los que se admitieron la descripción de entradas y salidas.

Un motor trifásico BLDC fue controlado por la conducción de puente completo de dos fases, de esta manera el método de modelamiento que se ha propuesto para resolver el proyecto fue espacio de estados [17].

En [54], usaron espacio de estados en el motor DC debido a que es un dispositivo electromecánico, donde su modelo matemático depende de constantes de la naturaleza mecánica.

En el estudio de [65], se favoreció la regulación de velocidad de mayor precisión en la presencia de incertidumbres paramétricas y exógenas con la aplicación de espacio de estados.

Se presentó un enfoque para estimar las ecuaciones del modelo de espacio de estados de tal manera que benefició a la retroalimentación controlada que utilizó como estimador un filtro de Kalman [55].

El objetivo de la investigación [23] fue estabilizar el estudio de control digital de orden fraccional mediante espacio de estados, definición de Riemann-Liouville (RL), transformada de Laplace y función gama de Euler.

En [58] se presentó un controlador que logró resolverse numéricamente por técnicas lineales de desigualdad matricial (LMI) y pudo ser representado a través de espacio de estados.

Un motor de corriente continua se caracteriza por ondas de torsión que afectan el par producido del motor, para solucionar este problema se implementó la técnica de espacio de estados [64].

**Análisis por elementos finitos (FEM):** El torque máximo se determinó calculando los ángulos óptimos y corriente de bobina CC mediante un análisis por elementos finitos (FEM) [9].

En [68], calcularon el par de torsión por medio del análisis por elementos finitos (FEM), además, se pudo expandir a las series de Fourier.

Se investigaron los parámetros paramétricos y electromagnéticos que fueron obtenidos con el análisis por elementos finitos (FEM) [24].

**Función de Lyapunov:** Mediante el uso de la funcional Lyapunov - Krasovski, se dieron condiciones suficientes, de modo que la dinámica del modo deslizante fue estocásticamente admisible [61].

En [3], se empleó una función de barrera de Lyapunov (BLF) asimétrica variable en el tiempo para garantizar que los estados siempre pertenezcan al límite.

El resultado del SMO propuesto proporciona una estimación de la fase FEM hacia atrás que se implementa junto con una función de Lyapunov, a su vez ayudó a calcular la posición y velocidad del rotor [46].

El principal propósito de la investigación [39] fue lograr el control de sincronización de velocidad de la red conectada a múltiples motores de corriente continua que siguieron al líder usando una función de Lyapuov y el circuito chopper de CC.

Para probar la estabilidad del sistema caótico se utilizó una función cuadrática de Lyapunov [62].

**Expansión de Fourier:** El torque de engranaje es una función periódica dependiente de la posición, y se puede modelar como una expansión de Fourier [32].

En [25], demostraron que, con la ayuda de una transformación de Fourier de tiempo y una transformación de Hilbert, la gravedad de cada falla y su ubicación relativa al rotor o estator pudo establecerse con precisión.

**Transformada de Laplace:** En [20] se implementó un controlador PID de orden fraccional para la regulación de velocidad de un motor de corriente continua alimentado por chopper cuyas ecuaciones fueron modeladas por la transformada de Laplace.

En [63], tomaron una transformada de Laplace para modelar las ecuaciones y posteriormente representarlas en espacio de estados simbolizando la velocidad y el voltaje de la armadura del motor DC.

En la tabla 6 se resume las técnicas de modelado matemático para ecuaciones diferenciales del motor de corriente continua.

**Tabla 6: Técnicas de modelado matemático para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua**

| Técnica de modelado matemático | Artículos seleccionados | Nro. Artículos |
|---|---|---|
| Espacio de estados | A2, A6, A17, A30, A40, A42, A45, A51, A60, A73. | 10 |
| Análisis por elementos finitos | A5, A19, A53 | 3 |
| Función de Lyapunov | A16, A20, A32, A41, A64 | 5 |
| Expansión de Fourier | A7, A56 | 2 |
| Transformada de Laplace | A48, A69 | 2 |
| Total | | 22 |

**PI3 ¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC?**

Los 75 artículos anteriormente seleccionados (Tabla 4) utilizaron software y hardware para realizar las experimentaciones que comprobaron sus estudios (es decir el 100%). Algunos de ellos aplicaron una o más herramientas que se resumen a continuación:

**Matlab:** En [7], se realizó una simulación en Matlab que poseyó una aproximación universal que ayudó a resolver las no linealidades que se presentaron, además mostraron el resultado en la matriz múltiple de Lyapunov que proporcionó una respuesta más innovadora.

Los resultados obtenidos mediante la simulación en Matlab y en un Hardware-in-the-Loop (HIL) bench verificaron la efectividad del método de control de retroceso adaptable para servosistemas de motores CC de parámetros y perturbaciones [59].

Un control de pasividad empleado en [66] fue implementado experimentalmente usando Matlab y la placa DS1104 en un prototipo construido, logrando resultados satisfactorios del seguimiento de voltaje y velocidad angular.

Se demostró en [8] una red de bombeo de agua solar interactuada con motor BLDC a través de un análisis profundo utilizando la simulación en Matlab y un prototipo de hardware conformado por un simulador fotovoltaico (marca AMETEK), rejilla monofásica, convertidor de refuerzo CC-CC, PFC convertidor de impulso, VSI trifásico (marca SEMIKRON), motor BLDC (marca Motor Power Company) y un controlador (dSPACE-1104).

En la investigación de [6], simularon en Matlab y dSpace, concluyendo que una red de estado de eco con un determinado peso pudo compensar las incertidumbres que existieron en el sistema dinámico con precisión arbitraria en un motor BLDC.

Se llevó a cabo una simulación para llegar a la conclusión de que un controlador PID estuvo directamente relacionado con la rotación y velocidad de un motor, y luego la onda de rotación pudo ser extraída para la estimación de velocidad de rotación [10].

Para la demostración de un método Kriging con un enfoque Taguchi en diseño de matriz cuadrada, se usó Matlab en [44] como programa de simulación y como hardware el Pareto Frontier.

En [4], se mejoró la eficiencia del sistema de energía UAV y por lo tanto también el rendimiento de su componente crítico en un motor BLDC.

Mediante una simulación en Matlab en conjunto con un motor sincrónico SynR e IPM se ha demostrado que el diseño no requiere ningún conocimiento de los parámetros del motor y las actuaciones son prácticamente independientes [33].

En el estudio de [61], se verificó que los sistemas singulares de salto semi-Markov (S-MJSs) tienen una relación importante en el análisis y la síntesis del modelo de un motor DC.

Por medio de una simulación en Matlab/Simulink y un convertidor back-to-back se estableció que las redes neuronales B-spline (BSSN) tuvieron características deseables importantes para sistemas físicos controlados [2].

En [68], realizaron pruebas en Matlab/Simulink y un motor sin escobillas de doble canal diseñado con imanes permanentes, indicador digital, transductor de par integrado y se basaron en el modelo matemático presentado de una máquina DCBLDC e incluyeron cálculos de características de par estático y el análisis de formas de ondas de tensiones, corrientes y par a velocidad constante.

En Matlab se pudo garantizar que las técnicas de backstepping se utilizaron para construir una adaptación de leyes de control y garantizar que la adaptación de señales de circuito esté limitada [3].

En la investigación de [15] se ejecutó una simulación en Matlab/Simulink de un control que estimó la velocidad del motor, calculó errores de velocidad estimados y actualizó los parámetros de un PID adaptativo.

Se demostró, gracias a Matlab y una placa DS1104, que el control basado en metodología de retroalimentación (ETEDPOF) resolvió la tarea de seguimiento de trayectoria bidireccional de velocidad angular en el sistema convertidor de CD/CD Boost-motor de CD [67].

Las pruebas que se aplicaron en [17] a los controles incluyeron repentinas perturbaciones y variaciones de parámetros, de esta manera se controló la velocidad de un motor BLDC.

Como resultado de las experimentaciones realizadas físicamente con puente rectificador de diodos (DBR), circuito de modulación de voltaje de enlace de CC, inversor, PMBLDCM con disposición de carga mecánica, unidad de señal de sensor Hall, controlador, autotransformador y una simulación en Matlab/Simulink se demostró que el esquema DVM disminuye la ondulación del torque [36].

En [46], realizaron simulaciones con Matlab y experimentaciones en el sistema BLDCM con otro motor de CC que sirvió como carga, un circuito de accionamiento, un inversor de fuente de voltaje, un circuito de muestreo, algunos circuitos de filtro y un microcontrolador TM320F28035. Se pudo concluir que la efectividad del esquema de control sin sensores con el novedoso SMO es superior en comparación a los convencionales con función sigmoidea.

En el estudio de [69], se empleó una simulación en Matlab, dSPACE y una estructura de hardware compuesta por MicroLabBox DS-1202 y sensores PCB, de esta forma se pudo establecer que este método, en comparación con otros que usan coeficientes de Fourier y cálculos FFT, ofreció menos complejidad, tiempo de compensación mejorado, y redujo el cálculo de costos.

La simulación y experimentaciones efectuadas en [38] dieron como resultado que el error de conmutación es inferior al 1,5% de la velocidad nominal, por lo tanto, se verificó la estabilidad y también la fiabilidad, las herramientas utilizadas fueron Matlab, Code Composer Studio y los siguientes elementos hardware: Procesador de señal digital de punto fijo (DSP), TMS320F2405 y un chip de unidad DRV8312.

En el trabajo de [37] ejecutaron una simulación en Matlab/Simulink dando como producto que la ondulación de par de un motor BLDC síncrono de imán permanente con respaldo no sinusoidal EMF no requirió orientación del rotor o armónico de EMF.

Se comparó un controlador FOPID basado en el algoritmo de la luciérnaga (FA) propuesto para el motor BLDC con un controlador FOPID basado en el algoritmo genético (GA) y se comprobó que el primero es mejor [18].

El propósito de la investigación [19] fue demostrar que un controlador GA-PID proporcionó menos tiempo de establecimiento y tiempo de subida en comparación con un controlador PID clásico.

Los datos obtenidos de la simulación tanto del modelo matemático de un motor DC así como el controlador PID mostraron que la metodología propuesta cumplió sus objetivos, de este modo se utilizó Matlab y un motor de CC utilizado en el robot móvil del NXP [54].

En [39], comprobaron que la trayectoria del líder fue una referencia para el resto de los agentes (velocidad sincronizada) y se logró maniobrando al líder.

Se utilizaron los programas Matlab/Simulink y dSPACE para verificar que el método MPC +GPIO propuesto superó a un controlador PID y otros dos enfoques de modelo de control predictivo en presencia de varios disturbios e incertidumbres [65].

En [47], se monitoreó el máximo espacio de campo y al mismo tiempo se determinó el valor correcto para la velocidad del motor DC que funcionó con un generador fotovoltaico.

El estudio llevado a cabo en [55] comparó el control de torque de un motor DC contra controladores de velocidad clásicos, también presentó un enfoque para estimar los parámetros de un motor genérico utilizando Matlab/Simulink y un motor de identificación de parámetros.

En la investigación de [40], aplicaron una simulación en Matlab/Simpower para verificar que usar la chopper multicelular en el esquema de control da como resultado el esquema de control de circuito cerrado.

En [20], se realizó un control de velocidad del motor CC, de esta manera para cada función objetivo, el algoritmo FDA superó en términos generales.

Los resultados de la simulación en Matlab revelan que GWO / FOPID con un enfoque con ITAE como una función objetivo dio menos asentamiento, tiempos de subida y sobrepaso comparable a diferencia de los enfoques existentes [21].

En la investigación de [22], se interactúo con el software Matlab en una computadora personal con un procesador Intel i7 2.50 GHz y 16 GB de RAM y los resultados del análisis mostraron que el CHASO-FOPID propuesto del sistema agregado del controlador tuvo la mejor respuesta transitoria.

Matlab y un conjunto de hardware: procesador de señal (DSP) TMS320F28377S, CPU de coma flotante de núcleo único de 32 MHz a 200 MHz, 7 analógicas de 16 bits y convertidores digitales (ADC), memoria de acceso aleatorio (RAM) de 164 Kb, 1 MB de flashgrunt y 15 canales PWM (ePWM) mejorados, fueron las herramientas utilizadas para obtener los resultados que interpretaron precisión mejorada en la respuesta de velocidad del motor de CC a través de la implementación de un controlador FO-PID [23].

El método presentado en [48] fue probado en una simulación precisa en Matlab, y se demostró que la propuesta del método es bastante capaz de reducir la conmutación de corriente y mejora de la potencia de salida del motor BLDC.

El experimento y los resultados de la simulación en Matlab/Simulink verificaron la viabilidad y efectividad del método propuesto de compensación de error de conmutación para BLDCM sin sensor [49].

En [25], presentaron resultados que han sido respaldados por simulaciones en Matlab y validadas por experimentos a escala de laboratorio mediante dispositivos de efecto Hall.

Los resultados de comparación en Matlab y experimentaciones con paneles fotovoltaico indicaron que un controlador PID con algoritmo de alimentación bacteriana produjo resultados óptimos de rendimiento [26].

En [56], se efectuaron simulaciones en Matlab/Simulink que tuvieron como objetivo encontrar una estimación de potencia espontánea de las cargas inciertas que varían con el tiempo.

El sistema de sensores sin posición completo estuvo modelado y simulado en Matlab para comprobar el mérito del algoritmo de suavizado propuesto [57].

La simulación en tiempo real realizada en Matlab verificó la simplicidad del controlador, rendimiento mejorado para el caso de información limitada y mejor robustez frente a las mediciones ruidosas en comparación con los métodos más modernos [58].

En [50], confirmaron con Matlab/Simulink que para las tres funciones de transferencia de un motor DC, los valores del tiempo de subida y el tiempo de asentamiento para el sistema usando el controlador de lógica difusa fueron menos en comparación con el sistema que no utilizó un controlador.

Se demostró a través de Matlab/Simulink que un controlador difuso de entrada única mostró un rendimiento idéntico con el FLC convencional, pero con un cálculo más rápido y un ciclo de diseño menos agitado [41].

Las simulaciones en Matlab ilustraron que el contralor NPID pudo acomodar los diferentes tipos de perturbaciones rápidamente y tuvo una respuesta más rápida en comparación con otras técnicas de control como PID o FOPID [27].

Un controlador de modo deslizante implementado en Matlab/Simulink mostró un rendimiento eficiente comparado con unos métodos PI y adaptativos en vehículos eléctricos [62].

En [28], realizaron experimentaciones con una Honda CBR 250cc, baterías de fosfato de hierro y litio, motor BLDC 48v de 5kWel y Matlab/Simulink para demostrar que el controlador fue capaz de mantener la velocidad deseada (277 rad/s) en respuesta transitoria rápida (7.8x10-2 milisegundos).

En la investigación de [51], se utilizó Matlab para comprobar que la calidad de control del sistema fue muy buena, la velocidad de respuesta siempre sigue la velocidad deseada y el tiempo de transición fue pequeño.

Los resultados de PID GA-ANFIS en Matlab/Simulink mostraron un rendimiento mejorado en términos de sobre impulsos reducidos, cambios reducidos de la carga y tiempo de asentamientos, también se ha demostrado que un controlador ha entregado mejor rendimiento para el cambio repentino de velocidad [29].

En [63], obtuvieron como resultado de la simulación de Matlab que la retroalimentación cuantitativa del controlador proporcionó el punto de ajuste ideal cuando se comparó con un controlador ordinario para la reacción en círculo abierto en espacio de tiempo y manejo de perturbaciones.

Se demostró por medio de Matlab/Simulink que el beneficio de la propuesta y el enfoque del control mediante la comparación del algoritmo con unos controladores PI convencionales fue garantizar una buena robustez y estabilidad [52].

La efectividad de un controlador PI junto con el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) fue probada en Matlab Simulink logrando regular la velocidad del motor BLDC [43].

En [64], llevaron a cabo una simulación en Matlab para obtener mejor tiempo de subida, un asentamiento más rápido y sobre impulso reducido en un controlador basado en LQR. Por lo tanto, resultó mejor par producido en la salida del sistema.

En una simulación con MATLAB 2017b, se utilizaron 250 series de datos: 175 series de datos, equivalentes al 70% para entrenar la red neuronal diseñada, y aproximadamente 75 series, equivalentes al 30% [53].

En [31], se verificó por medio de Matlab/Simulink que el diseño del sistema de control fue en realidad el proceso de elección en la retroalimentación que ganó a aquellas que cumplen con las especificaciones de diseño en un proceso cerrado en sistema de control de bucle.

Las pruebas experimentales del sistema de motor de circuito cerrado MIMO DC/DC Boost convertidor-inversor-DC fueron ejecutadas en Matlab/Simulink y una placa DS1104 de dSPACE, además, cabe destacar que se realizaron con una variación abrupta de iones en algunos parámetros del sistema [1].

En el trabajo de [70] se verificó que la aplicación de los algoritmos de minimización de pérdidas (LMA) mejoró la eficiencia del motor DC sin escobillas sin influencia considerable sobre el rendimiento del sistema de control. Las herramientas para llevar a cabo la simulación fueron las siguientes: Code Composer Studio, Matlab/Simulink, Rotor externo de 200 W con trapezoidal EMF posterior, máquina de 250 W DC, placa de control digital basada en DSP, placa TMS320F28335, HCPL 316J y placa de inversor basada en IGBT.

**Software R:** Mediante software R y Microsoft Visual C++ en una PC con 3.2 GHz Procesador i5-6500 se ha realizado una simulación que mostró que AC-PSO y AC-DE son las estrategias adaptativas más prometedoras [60].

En [12], se demostró que todos los componentes de un motor CC con fallas de conmutador fueron más altos que el motor CC en buen estado.

**Simulink a C:** Para realizar el control de movimiento de velocidad variable de alta precisión de motores CC, en [32] presentaron un modelo simplificado para el torque de fricción, para ello se llevó a cabo una simulación con Simulink a C y un sistema de control dSPACE 1401.

**MagNet Paquete CAD:** En [11], utilizaron el programa MagNet Paquete CAD y un motor sin escobillas CC de imán permanente para simular una bobina de campo CC con el fin de proporcionar un voltaje terminal regular.

**STAR-CCM+:** En [34], se comprobó un controlador PI usando experimentos en un motor de tracción eléctrica equipado con temperatura en los sensores en las partes críticas del motor y un programa llamado STAR-CCM+.

**GNU Octave**: En el estudio de [13], aplicaron una simulación con GNU Octave y un transistor SW MOSFET IRFZ44N, así, concluyeron que el error relativo del promedio total fue el más bajo para esa serie de motores y fue de dos a seis veces más alto para los otros.

**SCS y RRCS:** Se utilizó SSCS, RRCS y una armadura de rotor exterior PMBLDCM para verificar el patrón de efecto ranurado en la reacción de la armadura tanto del rotor externo como del estator interno fueron analizados respectivamente [14].

**HF "Wedm program and control system":** En [16] se destacaron los esquemas de identificación fuera de línea que satisfizo el requisito de autocuestionamiento por medio de HF "Wedm program and control system".

**AutoDesk FLIC:** Se empleó una plataforma de código abierto libre llamado AutoDesk FLIC junto con un Arduino DUE para controlar la velocidad de un motor de corriente continua dando a conocer que la eficiencia de un motor eléctrico aumentó 77,54%, que es 24,49% más alto que la técnica de control convencional [45].

**ANSYS Ansoft EM-Simplorer:** A través del software ANSYS Ansoft EM-Simplorer y un motor BLDC de corredera se implementan los parámetros obtenidos como resultado del proceso de diseño del estimador de lógica difusa [24].

**Visual Studio:** En [30], intentaron ingresar un punto rojo virtual en el cuadrado verde usando solo movimiento de los ojos y parpadeando para probar el control de un motor de corriente continua eléctrica basado en electooculografía (EOG) en Visual Studio con auriculares Emotiv EPOC.

**LTspice:** Las experimentaciones y simulaciones presentadas en [71] y realizadas con un BLDC monofásico de alta velocidad, un motor de puente complejo, DSP C2000 F28335 y un acelerómetro dieron a conocer que la eficiencia de un motor aumentó 77,54%, que es 24,49% más alto que la técnica de control convencional.

**Experimentaciones físicas:** Se presentaron los principios de funcionamiento electromagnético, análisis de comportamiento y una técnica de búsqueda usando análisis FEM para evaluar los parámetros de control óptimos del motor IFP-HBLDC gracias a una experimentación con Texas Instrumentos TMS320F2812 procesador de señal digital (DSP) [9].

En el estudio [35] se implementó una experimentación con un inversor, sensor, unidad de control, freno de histéresis y magtrol DSP6001A, agilent N5767A mostrando que un voltaje de suministro más bajo que la tensión nominal del motor se pudo utilizar para conducir el BLDCM en el método propuesto.

Se demostró que el ANFIS-FPA tiene un seguimiento de potencia superior, velocidad de convergencia rápida y respuesta precisa del sistema mediante el uso de un controlador dSPACE, sensores de corriente y hardware de bombeo FV empleado por convertidor Luo impulsado por BLDC [5].

Fuente de alimentación, bomba, motor BLCD, depurador, sistema de adquisición CAN fueron las herramientas utilizadas en [42] para verificar que un controlador difuso propuesto pudo sintonizar las ganancias del controlador PI, y por lo tanto, se obtuvo un buen rendimiento dinámico.

En [72], los autores presentaron una simulación en un motor de inducción lineal con el fin de maximizar la fuerza de empuje.

Se establecieron dos pruebas en un rectificador de diodo monofásico para examinar la propuesta, un control de potencia activa afectó la eficiencia del sistema y el control de potencia reactiva se controló al lado de la red [73].

Un control de voltaje de la armadura demostró en [74] que fue el mejor método de control de velocidad de motores de corriente continua.

En [75] se presentó una trayectoria de referencia de salida robusta lineal con un controlador de seguimiento, tratado aquí como un controlador de filtro plano (FFC), para sistemas no lineales diferencialmente planos, el modelo fue demostrado por Pololu DC Gear motor 37Dx73L mm, con codificador de cuadratura integrado y microcontrolador STM32.

En la tabla 7 se presenta el software y hardware para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC.

**Tabla 7: Software y hardware para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC**

| **Software** | **Artículos seleccionados** | **Nro. Artículos** |
|---|---|---|
| Matlab | A1, A2, A3, A4, A8, A9, A10, A11, A14, A16, A17, A19, A20, A21, A25, A29, A30, A31, A32, A33, A35, A36, A37, A38, A39, A40, A41, A42, A43, A45, A47, A48, A49, A50, A51, A54, A55, A56, A57, A58, A59, A60, A61, A62, A63, A64, A65, A67, A68, A69, A70, A72, A73, A74, A75 | 55 |
| Software R | A6, A22 | 1 |
| Simulink a C | A7 | 1 |
| Magnet paquete CAD | A12 | 1 |
| STAR-CCM+ | A15 | 1 |
| GNU Octave | A23 | 1 |
| SCS y RRCS | A24 | 1 |
| HF "Wedm program and control system" | A26 | 1 |
| AutoDesk FLIC | A27 | 1 |
| ANSYS Ansoft EM-Simplorer | A53 | 1 |
| Visual Studio | A71 | 1 |
| LTspice | A34 | 1 |
| Experimentaciones físicas | A5, A13, A18, A28, A44, A46, A52, A66 | 8 |
| Total | | 75 |

## Discusión

Los estudios analizados en la revisión sistemática de literatura tienen relación con la ingeniería de control y mejoran el nivel de funcionamiento de los motores de corriente continua que se utilizan en diferentes situaciones de la vida cotidiana, como por ejemplo, en medios de transporte. En cada artículo, dependiendo de la problemática, se requiere de la elección de las técnicas de control más eficientes.

La técnica de control PID es una de las más utilizadas en la actualidad, mientras que la de Modelo de control predictivo ha sido la menos usada, tal como se muestra en la Figura 2, la cual ejemplifica la Tabla 5.

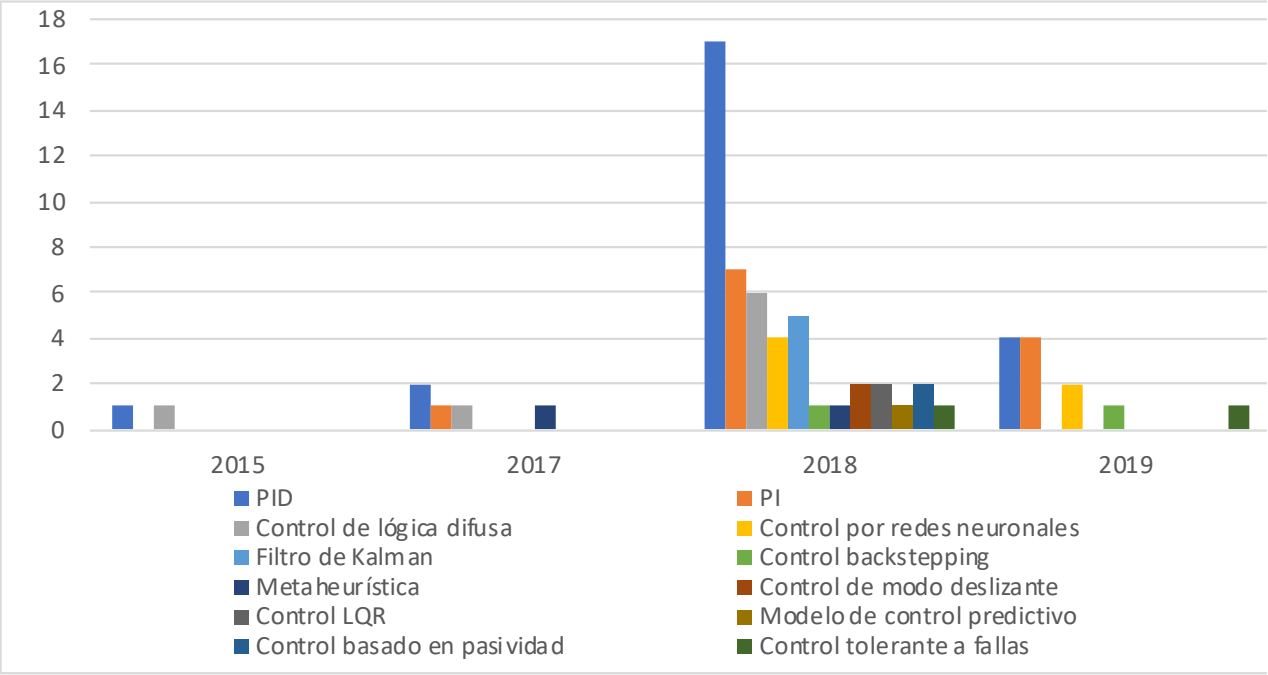



*Figura 2. Técnicas de control para un motor de corriente continua*

Respecto a las técnicas de modelamiento matemático como la función de Lyapunov y el espacio de estados, han sido de mucha utilidad para formar las ecuaciones diferenciales y crear respuestas ante las no linealidades que se presentan en sistemas complejos que son muy difíciles de controlar.

La técnica de Espacio de estados es la que ha tenido mayor tendencia en los artículos revisados, la misma que posee un grupo de entradas y salidas, además facilita la representación de las ecuaciones diferenciales por medio de matrices. En la Figura 3 se observa un resumen de las técnicas de modelado matemático.

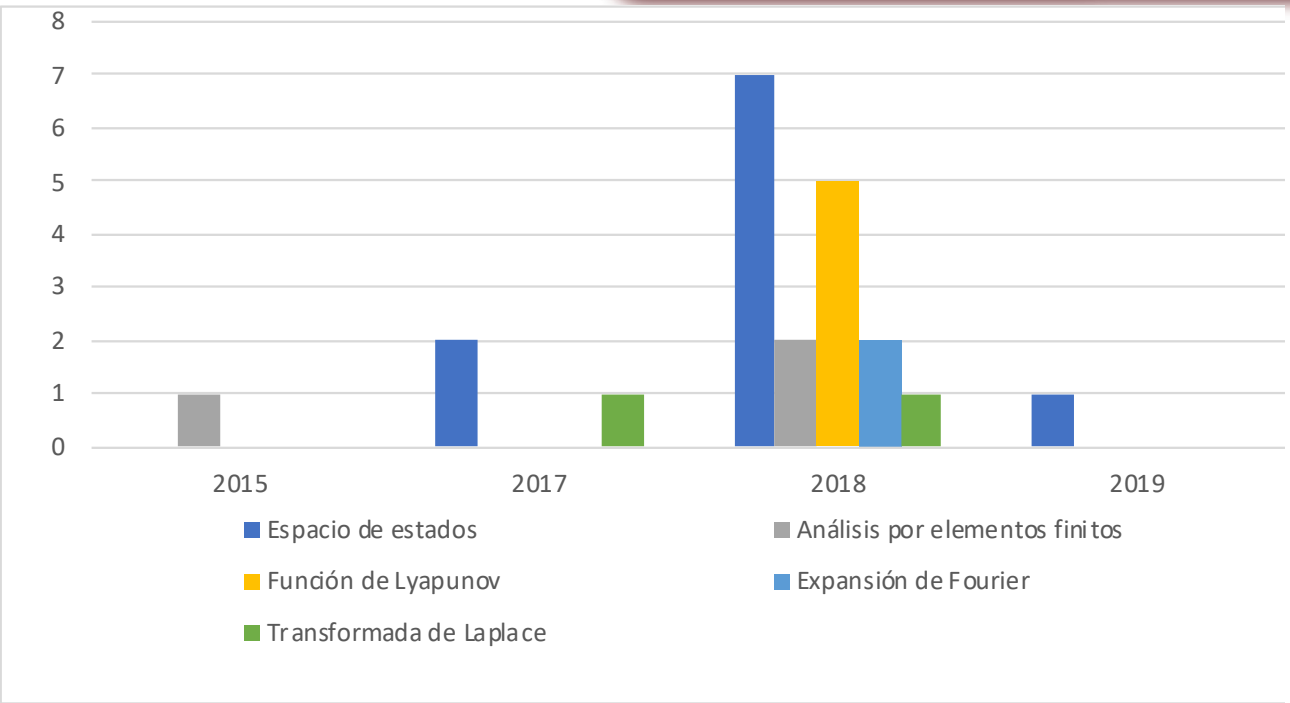
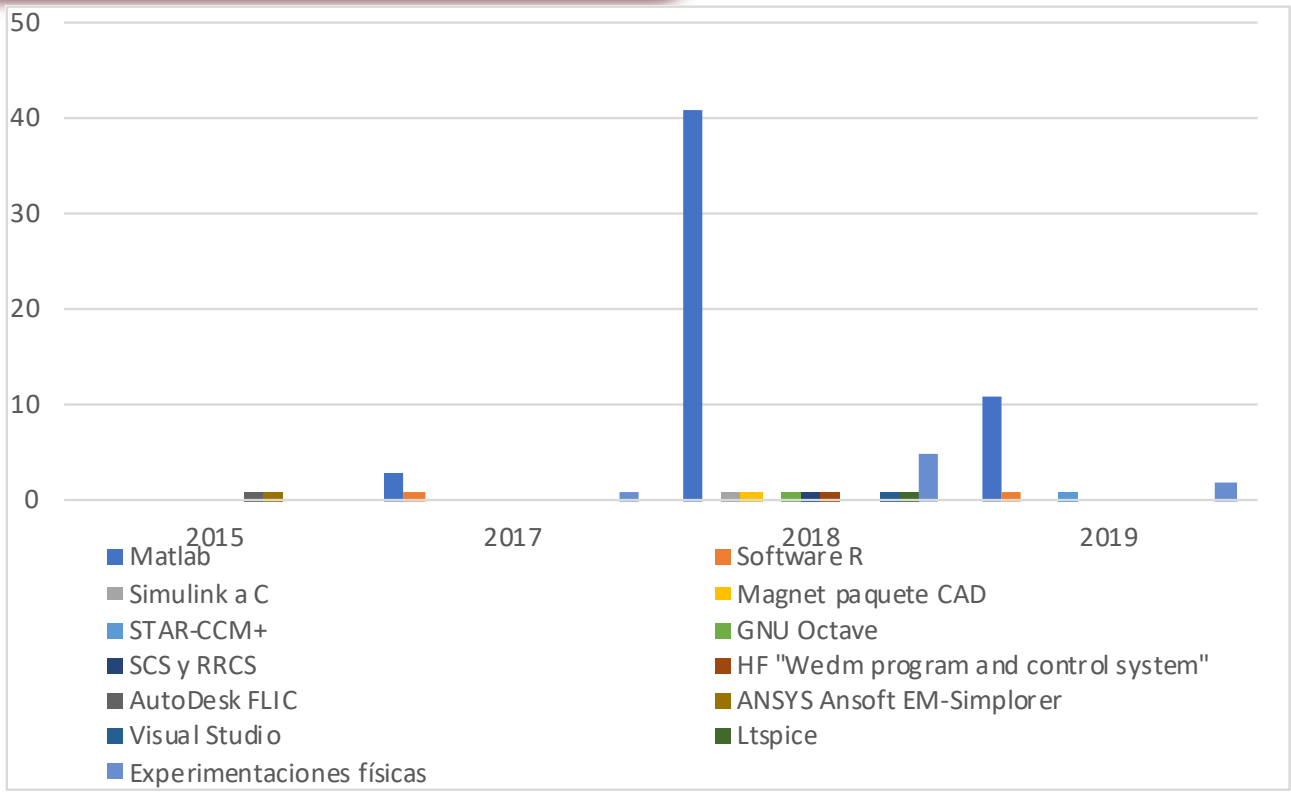



*Figura 3. Técnicas de modelado matemático para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua*

El software y hardware son las herramientas imprescindibles para llevar a cabo experimentaciones o simulaciones que demuestren lo que se ha presentado en cada artículo.

El software más utilizado es Matlab, como se muestra en la Figura 4 (Tabla 7), esto se debe a sus múltiples funcionalidades y beneficios que ayudan al experimentador a obtener mejores resultados. Cabe destacar que el hardware como el Arduino y la placa DS1104 hacen posible la realización de un sistema que tenga la habilidad de presentar el software en la vida real, es decir de una manera física.




## Conclusiones

Los artículos revisados utilizan diferentes técnicas de control (PI, PID, backstepping, lógica difusa, filtro de Kalman, metaheurística, LQR, basado en pasividad, redes neuronales, modo deslizante, tolerante a fallas, modelo de control predictivo) (Tabla 5 y Figura 2) principalmente para la velocidad y el torque de un motor de corriente continua. La técnica de control PID demostró que en el año 2018 jugó un papel importante debido a las múltiples ventajas que presentó, como por ejemplo precisión en tiempos de respuesta.

El modelamiento matemático de las ecuaciones diferenciales puede complicarse dependiendo del tipo de motor de corriente continua con el cual se esté trabajando, para ello se recurre a técnicas matemáticas (Tabla 6 y Figura 3) que facilitan y simplifican algunos procesos.

El uso de software y hardware (Tabla 7 y Figura 4) es muy común en el ámbito de la ingeniería de control, debido a que estos pueden ayudar a comprobar que el motor de corriente continua ejecuta sus funciones de una manera adecuada y sin inconvenientes, de esta forma las experimentaciones y simulaciones tienen que realizarse de una manera continua hasta el momento en que el investigador encuentre un resultado que ejemplifique las condiciones planteadas inicialmente. Matlab es la plataforma que destacó sobre los otros tipos de software debido a que su entorno es sencillo y ofrece herramientas con múltiples funcionalidades. Sin embargo, las experimentaciones físicas han tenido una gran utilidad en el 2019 con microprocesadores y otros instrumentos más, así se abren las puertas a un futuro crecimiento de sistemas complejos implementados en la vida real.

## Referencias

J. R. Garcia-Sanchez et al., "A Robust Differential Flatness-Based Tracking Control for the 'MIMO DC/DC Boost Converter-Inverter-DC Motor' System: Experimental Results," IEEE Access, vol. 7, pp. 84497–84505, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923701.

F. Beltran-Carbajal, R. Tapia-Olvera, I. Lopez-Garcia, and D. Guillen, "Adaptive dynamical tracking control under uncertainty of shunt DC motors," Electr. Power Syst. Res., vol. 164, pp. 70–78, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.07.033.

L. Ma and D. Li, "Adaptive Neural Networks Control Using Barrier Lyapunov Functions for DC Motor System with Time-Varying State Constraints," Complexity, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5082401.

X. Xu and Y. Deng, "UAV Power Component - DC Brushless Motor Design with Merging Adjacent-Disturbances and Integrated-Dispatching Pigeon-Inspired Optimization," IEEE Trans. Magn., vol. 54, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2839663.

N. Priyadarshi, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, F. Blaabjerg, and F. Azam, "Maximum Power Point Tracking for Brushless DC Motor Driven Photovoltaic Pumping System Using Hybrid ANFIS-FLOWER Pollination Optimization Algorithm," Preprints, Mar. 2018, doi: 10.20944/PREPRINTS201803.0158.V1.

S. Luo, S. Li, F. Tajaddodianfar, and J. Hu, "Anti-oscillation and chaos control of the fractional-order brushless DC motor system via adaptive echo state networks," J. Franklin Inst., vol. 355, no. 14, pp. 6435–6453, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.07.004.

X. H. Chang and Y. M. Wang, "Peak-to-peak filtering for networked nonlinear DC motor systems with quantization," IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 14, no. 12, pp. 5378–5388, Dec. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2805707.

R. Kumar and B. Singh, "Brushless DC motor-driven grid-interfaced solar water pumping system," IET Power Electron., vol. 11, no. 12, Oct. 2018, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0812.

H. Moradi Cheshmehbeigi and E. Karami, "Maximum output torque control in improved flux path homopolar brushless DC motor with axillary field by using optimal control of Turn-ON and Turn-OFF angles in variable speed applications," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 6, no. 4, pp. 1722–1731, Dec. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2850349.

S. Lu, Y. Qin, J. Hang, B. Zhang, and Q. Wang, "Adaptively Estimating Rotation Speed from DC Motor Current Ripple for Order Tracking and Fault Diagnosis," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 68, no. 3, pp. 741–753, Mar. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2852978.

H. Moradi CheshmehBeigi, E. Karami, E. Afjei, and K. Rouzbehi, "Numerical and Experimental Investigation of an Improved Flux Path Brushless-DC Machine for Variable Speed Applications," IEEE Trans. Transp. Electrif., vol. 4, no. 4, pp. 877–887, Dec. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2859038.

A. A. Wahab, N. F. Abdullah, and M. A. H. Rasid, "Commutator fault detection of brushed DC motor using thermal assessment," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 469, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012057.

A. Petrovas, A. Pitrėnas, and Z. Savickienė, "DC motor parameter identification using equation error method," Electr. Eng., vol. 100, no. 2, pp. 415–423, Jun. 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0514-6.

C. Ma, Q. Li, H. Lu, Y. Liu, and H. Gao, "Analytical model for armature reaction of outer rotor brushless permanent magnet DC motor," IET Electr. Power Appl., vol. 12, no. 5, pp. 651–657, May 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0751.

M. Ezzaldean, "Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller," Eng. Technol. J., vol. 36, no. 8A, Aug. 2018, doi: 10.30684/etj.36.8a.9.

S. A. Odhano, P. Pescetto, H. A. A. Awan, M. Hinkkanen, G. Pellegrino, and R. Bojoi, "Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: A Technology Status Review," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 3603–3614, 01-Apr-2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2856589.

A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," Ain Shams Eng. J., vol. 9, no. 3, pp. 341–352, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.02.004.

B. N. Kommula and V. R. Kota, "Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller," Journal of King Saud University - Engineering Sciences, King Saud University, 2018.

M. A. Ibrahim, A. K. Mahmood, and N. S. Sultan, "Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm," Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 10, no. 2, pp. 822–830, Jun. 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.822-830.

V. Haji Haji and C. A. Monje, "Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism," Soft Comput., vol. 22, no. 18, pp. 6135–6146, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00500-017-2677-5.

J. Agarwal, G. Parmar, R. Gupta, and A. Sikander, "Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor," Microsyst. Technol., vol. 24, no. 12, pp. 4997–5006, Dec. 2018, doi: 10.1007/s00542-018-3920-4.

B. Hekimoglu, "Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm," IEEE Access, vol. 7, pp. 38100–38114, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905961.

S. W. Khubalkar, A. S. Junghare, M. V. Aware, A. S. Chopade, and S. Das, "Demonstrative fractional order – PID controller based DC motor drive on digital platform," ISA Trans., vol. 82, pp. 79–93, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.isatra.2017.08.019.

D. Uygun and S. Solmaz, "Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains," in International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2015, vol. 2015-September, pp. 87–92, doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266300.

G. Mirzaeva and K. I. Saad, "Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement," in IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 2981–2991, doi: 10.1109/TIA.2018.2805730.

N. S. Sultan, "Design and comparative study of photovoltaic maximum power point tracking converter with DC motor speed control," in 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science, ISCES 2018 - Proceedings, 2018, vol. 2018-January, pp. 74–79, doi: 10.1109/ISCES.2018.8340531.

M. Shamseldin, M. Abdel Ghany, and A. G. Mohamed, "Performance Study of Enhanced Non-Linear PID Control Applied on Brushless DC Motor," Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 9, no. 2, p. 536, Jun. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i2.pp536-545.

[M. Syakir Adli, N. H. H. Mohamad Hanif, and S. F. Toha Tohara, "Brushless DC Motor Speed Controller for Electric Motorbike," Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 9, no. 2, p. 859, Jun. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i2.pp859-864.

[M. Dasari, A. S. Reddy, and M. Vijaya Kumar, "GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor," Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 10, no. 1, pp. 265–276, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp265-276.

A. Kubacki, P. Owczarek, and T. Lindner, "Use of electrooculography (EOG) and facial expressions as part of the brain-computer interface (BCI) for controlling an electric DC motor," in Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, vol. 743, pp. 82–92, doi: 10.1007/978-3-319-77179-3_8.

H. M. Guzey, A. Dumlu, N. Guzey, and A. Alpay, "Optimal synchronizing speed control of multiple DC motors," in Proceedings of the 2018 International Conference on Optimization and Applications, ICOA 2018, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICOA.2018.8370508.

Y. Hu, W. Gu, H. Zhang, and H. Chen, "Adaptive Robust Triple-Step Control for Compensating Cogging Torque and Model Uncertainty in a DC Motor," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 01-Dec-2018.

R. Antonello, L. Ortombina, F. Tinazzi, and M. Zigliotto, "Online stator resistance tracking for reluctance and interior permanent magnet synchronous motors," in 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017, 2017, vol. 2017-January, pp. 5861–5868, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096970.

S. Nategh, H. Zhang, O. Wallmark, A. Boglietti, T. Nassen, and M. Bazant, "Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 1, pp. 79–89, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2821619.

Y. Cao, T. Shi, X. Li, W. Chen, and C. Xia, "A Commutation Torque Ripple Suppression Strategy for Brushless DC Motor Based on Diode-Assisted Buck-Boost Inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 6, pp. 5594–5605, Jun. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2866001.

R. Kuttappan, S. Durgaprasanth, N. Chilakapati, and S. I. Ganesan, "A Simple Voltage Modulator Scheme for Torque Ripple Minimization in a Permanent Magnet Brushless DC Motor," IEEE Trans. Power Electron., pp. 1–1, Jul. 2019, doi: 10.1109/tpel.2019.2926122.

A. G. De Castro, W. C. A. Pereira, T. E. P. De Almeida, C. M. R. De Oliveira, J. Roberto Boffino De Almeida Monteiro, and A. A. De Oliveira, "Improved Finite Control-Set Model-Based Direct Power Control of BLDC Motor with Reduced Torque Ripple," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 5, pp. 4476–4484, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2835394.

T. Li and J. Zhou, "High-Stability Position-Sensorless Control Method for Brushless DC Motors at Low Speed," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 5, pp. 4895–4903, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2863735.

S. Masroor and C. Peng, "Agent-based consensus on speed in the network-coupled DC motors," Neural Comput. Appl., vol. 30, no. 5, pp. 1647–1656, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00521-016-2773-y.

M. L. Hamida, H. Denoun, A. Fekik, and S. Vaidyanathan, "Control of separately excited DC motor with series multi-cells chopper using PI - Petri nets controller," Nonlinear Eng., vol. 8, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2019, doi: 10.1515/nleng-2017-0174.

N. N. Baharudin and S. M. Ayob, "Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller," Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 9, no. 4, p. 1952, Dec. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1952-1966.

W. Dong, J. Song, S. Cheng, L. Yu, and Z. Lu, "Speed Control of BLDC Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System Based on Fuzzy-PI Controller," in SAE Technical Papers, 2018, vol. 2018-April, doi: 10.4271/2018-01-0698.

W. Xie, J. S. Wang, and H. B. Wang, "PI Controller of Speed Regulation of Brushless DC Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Inertia Weights," Math. Probl. Eng., vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2671792.

A. Parnianifard, A. S. Azfanizam, M. K. A. Ariffin, and M. I. S. Ismail, "Kriging-Assisted Robust Black-Box Simulation Optimization in Direct Speed Control of DC Motor under Uncertainty," IEEE Trans. Magn., vol. 54, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2829767.

A. M. Zaki, M. El-Bardini, F. A. S. Soliman, and M. M. Sharaf, "Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control," Ain Shams Eng. J., vol. 9, no. 1, pp. 65–75, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2015.10.003.

M. G. Gan, M. Zhang, C. Y. Zheng, and J. Chen, "An adaptive sliding mode observer over wide speed range for sensorless control of a brushless DC motor," Control Eng. Pract., vol. 77, pp. 52–62, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.05.004.

T. L. Kottas, A. D. Karlis, and Y. S. Boutalis, "A Novel Control Algorithm for DC Motors Supplied by PVs Using Fuzzy Cognitive Networks," IEEE Access, vol. 6, pp. 24866–24876, May 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2822051.

E. Çelik and N. Öztürk, "A new fuzzy logic estimator for reduction of commutation current pulsation in brushless DC motor drives with three-phase excitation," Neural Comput. Appl., vol. 31, pp. 1125–1134, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00521-017-3083-8.

X. Yao, H. Lin, and J. Zhao, "Line voltage difference integral method of commutation error adjustment for sensorless brushless DC motor," in Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2018, vol. 2018-March, pp. 843–847, doi: 10.1109/APEC.2018.8341111.

N. Elias and N. M. Yahya, "Simulation Study for Controlling Direct Current Motor Position Utilising Fuzzy Logic Controller," Int. J. Automot. Mech. Eng., vol. 15, no. 4, pp. 5989–6000, Dec. 2018, doi: 10.15282/IJAME.15.4.2018.19.0456.

T.-T. Nguyen, "The neural network-based control system of direct current motor driver," Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 9, no. 2, p. 1445, Apr. 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i2.pp1445-1452.

E. Kılıç, H. R. Özçalık, and S. Şit, "Adaptive controller with RBF neural network for induction motor drive," Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields, vol. 31, no. 3, p. e2280, May 2018, doi: 10.1002/jnm.2280.

G. Farahani and K. Rahmani, "Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller," J. Control. Autom. Electr. Syst., vol. 30, no. 5, pp. 728–740, Oct. 2019, doi: 10.1007/s40313-019-00485-8.

A. F. Moreira, A. S. Fernandes, J. A. B. Silva, A. V. de A. Batista, and P. H. A. Miranda, "The Use of a Statistical Filter and Metaheuristics to Model and Control The DC Motor of the Mobile Robot Used on NXP Cup," J. Mechatronics Eng., vol. 1, no. 1, p. 11, Apr. 2018, doi: 10.21439/jme.v1i1.16.

A. Archela, D. G. Toginho, and L. F. De Melo, "Torque control of a DC motor with a state space estimator and kalman filter for vehicle traction," in 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings, 2019, pp. 763–769, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627285.

S. Yousefizadeh, J. D. Bendtsen, N. Vafamand, M. H. Khooban, F. Blaabjerg, and T. Dragicevic, "Tracking control for a dc microgrid feeding uncertain loads in more electric aircraft: Adaptive backstepping approach," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 7, pp. 5644–5652, Jul. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880666.

S. S. Alex and A. E. Daniel, "An efficient position tracking smoothing algorithm for sensorless operation of brushless DC motor drives," Model. Simul. Eng., vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4523416.

M. A. Kardan et al., "Improved Stabilization of Nonlinear DC Microgrids: Cubature Kalman Filter Approach," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 5, pp. 5104–5112, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2848959.

X. Wang, W. Wang, L. Li, J. Shi, and B. Xie, "Adaptive Control of DC Motor Servo System with Application to Vehicle Active Steering," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 24, no. 3, pp. 1054–1063, Jun. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2906250.

A. Rodríguez-Molina, M. G. Villarreal-Cervantes, and M. Aldape-Pérez, "An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms," Soft Comput., vol. 23, no. 3, pp. 889–906, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00500-017-2797-y.

W. Qi, G. Zong, and H. R. Karim, "Observer-based adaptive smc for nonlinear uncertain singular semi-markov jump systems with applications to DC motor," IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., vol. 65, no. 9, pp. 2951–2960, Sep. 2018, doi: 10.1109/TCSI.2018.2797257.

E. Köse and A. Mühürcü, "The control of Brushless DC motor for electric vehicle by using chaotic synchronization method," Stud. Informatics Control, vol. 27, no. 4, pp. 403–412, 2018, doi: 10.24846/v27i4y201804.

T. Rajesh, A. Jagadeesan, R. Dhanasekar, and G. M. Tamilselvan, "Quantitative Feedback Theory based Robust Controller Design for Speed Control of DC Motor," in Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2018, 2018, pp. 492–496, doi: 10.1109/CESYS.2018.8723905.

T. A. Zarma, B. M. Mustapha, H. U. Suleiman, A. A. Galadima, E. C. Ashigweke, and S. Thomas, "Torque control in brushless DC motor using intelligent linear quadratic regulator controller," in IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology, ICAST, 2018, vol. 2018-August, doi: 10.1109/ICASTECH.2018.8507030.

J. Yang, H. Wu, L. Hu, and S. Li, "Robust predictive speed regulation of converter-driven DC motors via a discrete-time reduced-order GPIO," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 10, pp. 7893–7903, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2878119.

E. Hernández-Márquez, R. Silva-Ortigoza, J. R. García-Sánchez, M. Marcelino-Aranda, and G. Saldaña-González, "A DC/DC Buck-Boost Converter-Inverter-DC Motor System: Sensorless Passivity-Based Control," IEEE Access, vol. 6, pp. 31486–31492, Jun. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2846614.

R. Silva Ortigoza et al., "A Trajectory Tracking Control for a Boost Converter-Inverter-DC Motor Combination," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 16, no. 4, pp. 1008–1014, Apr. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8362130.

M. Korkosz, P. Bogusz, and J. Prokop, "Modelling and experimental research of faulttolerant dual-channel brushless DC motor," IET Electr. Power Appl., vol. 12, no. 6, pp. 787–796, Jul. 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0752.

M. Aqil and J. Hur, "A Direct Redundancy approach to Fault Tolerant Control of BLDC Motor with a damaged Hall-Effect Sensor," IEEE Trans. Power Electron., pp. 1–1, May 2019, doi: 10.1109/tpel.2019.2917559.

A. Khazaee, H. Abootorabi Zarchi, and G. Arab Markadeh, "Loss model based efficiency optimized control of brushless DC motor drive," ISA Trans., vol. 86, pp. 238–248, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.isatra.2018.10.046.

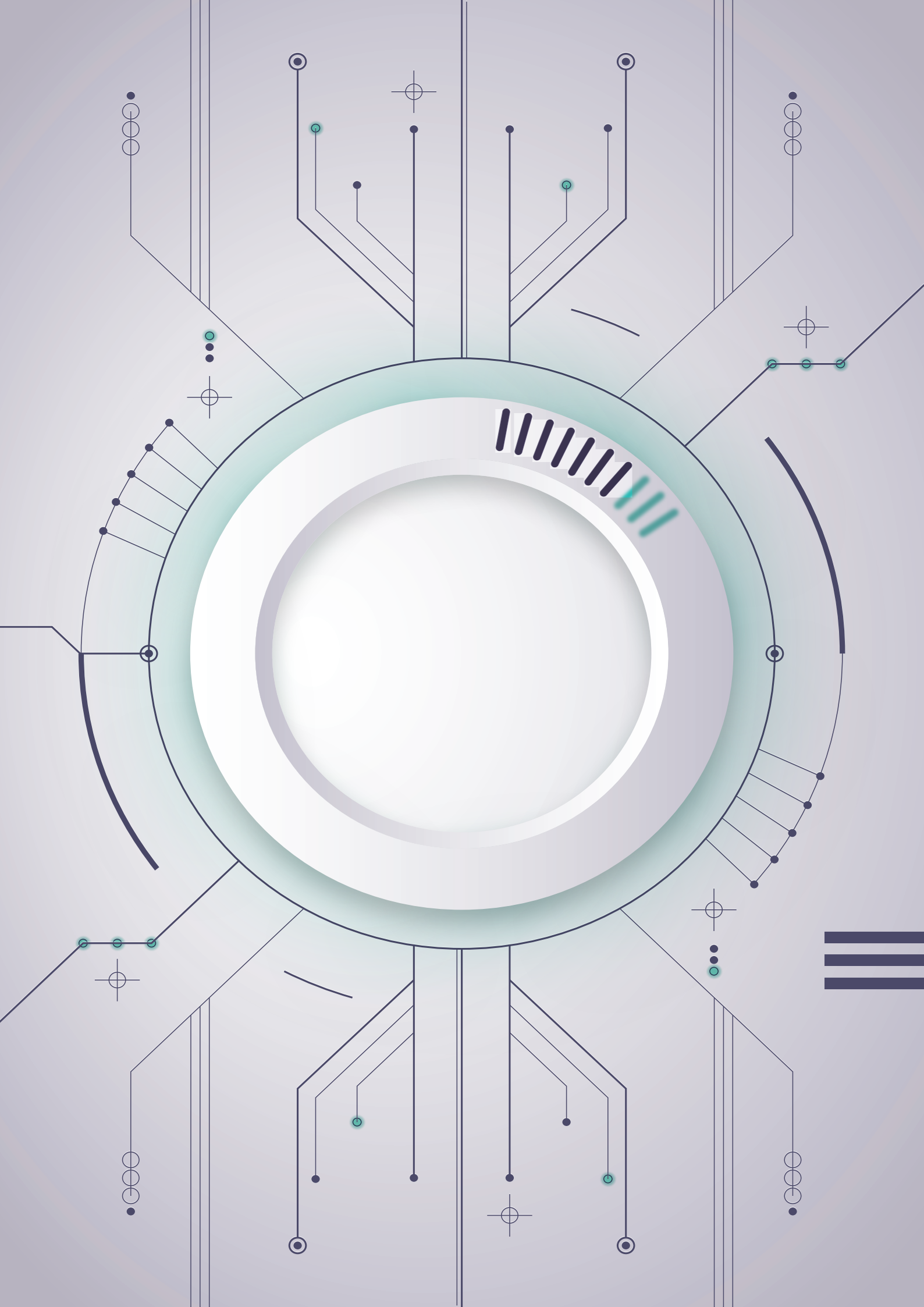
W. Lee, J. H. Kim, W. Choi, and B. Sarlioglu, "Torque ripple minimization control technique of high-speed single-phase brushless DC motor for electric turbocharger," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 11, pp. 10357–10365, Nov. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2866779.

S. Aleksandrov, T. Overboom, and E. Lomonova, "Design optimization and performance comparison of two linear motor topologies with PM-less tracks," in 2018 IEEE International Magnetic Conference, INTERMAG 2018, 2018, doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508565.

B. Kwak, J. H. Um, and J. K. Seok, "Direct Active and Reactive Power Control of Three-Phase Inverter for AC Motor Drives with Small DC-Link Capacitors Fed by Single-Phase Diode Rectifier," in IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 3842–3850, doi: 10.1109/TIA.2019.2915061.

H. Frayyeh, M. Mukhlif, A. Abbood, and S. Kerean, "SPEED CONTROL OF DIRECT CURRENT MOTOR USING MECHANICAL CHARACTERISTICS 机械特性对直流电动机的速度控制," J. SOUTHWEST JIAOTONG Univ., vol. 54, no. 4, pp. 1–9, 2019, doi: https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.4.25.

H. Sira-Ramirez, E. W. Zurita-Bustamante, and A. Luviano-Juarez, "Robust Flat Filtering Control of a Nonlinear Manipulator-Direct Current Motor System," J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME, vol. 140, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.1115/1.4037386.



# Evaluación de la Polarización óptica en imágenes

**Jorge Benalcázar[1], Fabián Cuzme[1]**

[1]Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Carrera en Telecomunicaciones, Av. 17 de Julio y General José María Córdova, Ibarra, Ecuador

*[1]jrbenalcazar@utn.edu.ec, [1]fgcuzme@utn.edu.ec*

RESUMEN

Para entender mejor la incidencia que tiene la óptica ondulatoria al momento de captar electrónicamente la imagen formada detrás de una lente, es necesario establecer una base científica en lo referente a polarización óptica, este fundamento científico-técnico también nos sugiere la metodología a seguir. Optamos por el método experimental, se procede a diseñar y construir el montaje óptico para generar la imagen de un objeto planar cercano, se refleja en una superficie dieléctrica, es filtrada con un polaroide analizador para ser fotografiada y almacenada, la aparición de patrones de cambio en dichas imágenes es explicable con la evaluación del grado de polarización de sus partes, mediante algoritmos y programas. Se establecen criterios de comparación que permiten tener versatilidad al momento de procesar las imágenes obtenidas, MATLAB es una de ellas y ayudó a desarrollar un algoritmo propio para binarización, segmentación, transformación y comparación de las imágenes, esto permite conocer los índices de diferencias que existen entre ellas, este resultado se expresa mediante subfotogramas de cambio, mismos que demuestran una pérdida de nitidez por efecto de la polarización.

**Palabras Claves**: Grado de polarización, segmentación de imagen, algoritmos de comparación, imágenes binarias.

ABSTRACT

A scientific base is established on the topics of: linear, circular and elliptical polarization, Poincaré sphere, Jones and Stokes vectors and Moeller matrices. This scientific foundation helps in understanding the phenomenon and also indicates the size of the task, as well as the optical assembly to design and build. The image of a nearby planar object lights up and reflected from a dielectric surface, filtered with an analyzer polaroid to be captured by a CCD, and stored. The evaluation of the changes in said image is subject to the analysis of the degree of polarization of its parts through algorithms and constitutes the objective of this work. The importance of knowing adequate tools for the acquisition and analysis of images is fundamental, so it was necessary to establish comparison criteria that allow greater versatility when processing the images obtained, MATLAB is one of them, it helps to develop its own algorithm for binarization, segmentation, transformation and comparison of the images, this allows to know the indices of differences that exist between them, this result is expressed as a change matrix.

**Keywords:** Degree of polarization, image segmentation, comparison algorithms, binary images.

## Introducción

La detección de reflejos en las microfibras de telas es testigo de la presencia de algún porcentaje de material sintético en las mismas y constituye el apoyo de la imagenología polarimétrica a los métodos de evaluación de calidad de los tejidos (las fibras y telas), en la medicina se puede identificar patrones de cambio del estado de polarización de la piel asociados a razones clínicas. En cualquier caso, se hace necesaria la utilización de un sistema de cámara fotográfica o de TV con lentes acromáticos y un sistema de almacenamiento.

La polarización de la luz brinda patrones específicos para la reflexión de imágenes desde diversas superficies dieléctricas, el entendimiento de dichos patrones y su procesamiento digital permitirán analizar las imágenes provenientes de superficies como: parabrisas de autos o ventanas de edificaciones, se abre la posibilidad de detección del vidrio templado o polarizado con el posible análisis de su calidad, aplicación en actividades agrícolas, industriales y/o medicinales. En el presente trabajo se logra demostrar una relación entre los patrones de las imágenes reflejadas en dieléctricos y la polarización óptica.

Recordemos la conocida expresión algebraica de óptica geométrica para la posición de la imagen de un punto detrás de un lente: $\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$ (1)

o.- es la distancia desde el objeto luminoso hasta el vértice del lente, i.- es la distancia medida desde el lente hasta el plano donde se forma la imagen y f es la distancia focal del lente [1], figura No. 1

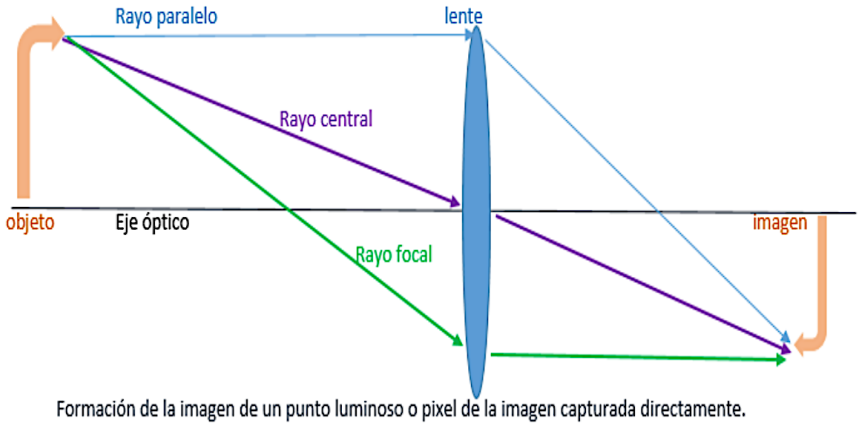



***Fig. 1.*** *Formación de la imagen de un punto luminoso detrás de una lente convergente.*

La fórmula (1) en óptica geométrica, determina la posición del punto luminoso imagen, pero no considera el factor ondulatorio de polarización de los rayos en el trayecto hacia el censor, cuando se graba el reflejo cercano de un objeto luminoso, y se utiliza un esquema configurado como lo indica la figura 2, cada punto del objeto constituye una mini fuente de iluminación y posee su propia función de distribución angular al igual que su propia polarización. Se conoce poco acerca de la composición polarimétrica de cada rayo.

La luz viajará hasta el CCD de la cámara, donde p es la distancia desde el objeto luminoso hasta el lente, q es la distancia imagen medida desde el lente hasta el CCD y f es la distancia focal del lente, en su camino se polarizará por reflexión [2], al final es captada por alguno de los censores fotosensibles del CCD y caracterizado por las coordenadas x e y en el microchip, entonces se convierte en señal eléctrica, de ésta forma se constituye como un pixel, a partir de éste momento la información estará condicionada al formato del de imagen de la cámara [3], [4].

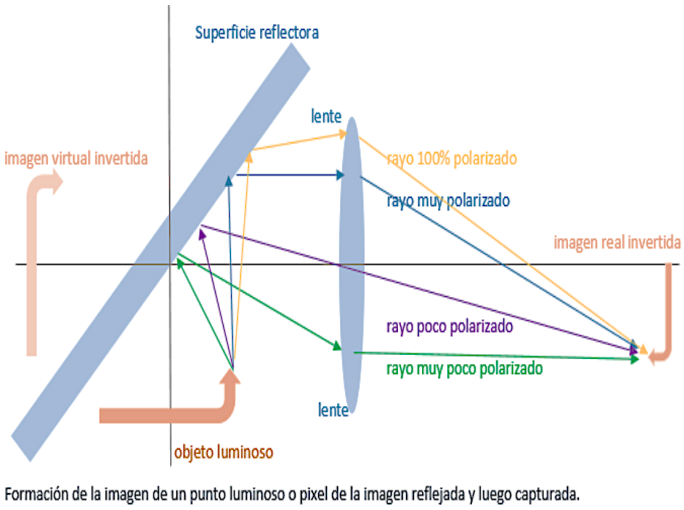



***Fig. 2.*** *Polarización de los rayos reflejados que convergen para formar la imagen.*

El análisis experimental de dicho punto luminoso considerando la polarización, requeriría de varios pasos:

- Que cada rayo no se refleje, no se esparza ni se filtre, es decir que captaremos la imagen original de un punto luminoso del objeto, el mismo razonamiento y análisis podemos aplicar a todos y cada uno de los puntos luminosos, obtenemos entonces la imagen virgen de un grupo de puntos luminosos (antes).
- Si cada rayo se refleja antes de ser detectado, entonces tendremos la imagen del mismo punto luminoso, pero con alteración inducida en su polarización [5], cada uno de los rayos aporta a la formación de un pixel, en consecuencia, capturamos pixel por pixel la imagen completa del objeto luminoso (después).

- Solo es posible separar la acción de luz polarizada del efecto del resto de rayos con la presencia de un polaroid analizador, éste filtra por lo menos parcialmente la luz polarizada, de manera que se puede tener $I_{max}$ $e$ $I_{min}$ para cada pixel y luego evaluar la polarización de la imagen con la utilización de la fórmula:

$$p = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \qquad (2)$$

[6], [7], válida para rayos paraxiales [8].

- Existe la posibilidad de asignar un valor p específico a todos rayos polarizados y un valor p diferente a los no polarizados, de ésta manera quedaría catalogado cada rayo y su respectivo pixel, con los valores de p se puede construir la matriz de polarización. Sin embargo éste análisis no se ejecuta ni se incluye en el presente trabajo.
- En el caso de objetos reflejados desde muy lejos la llegada al lente de la cámara se da con rayos paraxiales, tendríamos poca fluctuación en lo referente a ángulos, también menos rayos y pixeles para cada sector de la imagen, ante la rotación acimutal del analizador, la intensidad de éstas imágenes cambia de acuerdo a las leyes de Fresnel y en ciertos casos prácticamente desaparecerían.

- Está presente la opción de fragmentar la imagen en grupos de píxeles de tamaños definidos y analizar la luminancia de cada grupo por separado considerando el cambio por umbralización en tonos de gris [9], es decir utilizando una matriz m x n que en lo futuro llamaremos matriz de fragmentación.

Considerando todos estos factores, el documento se concatena como sigue:

Con el propósito de analizar la influencia ondulatoria de la polarización en imágenes reflejadas desde cerca, se plantea la base científica en el campo de polarización óptica, vectores de Jones y de Stokes, Matrices de Moeller y esfera de Poincaré, se presenta algunos conceptos específicos necesarios para entender y describir el fenómeno, definir el camino experimental y estimar el tamaño de la tarea.

En la sección de materiales y métodos, se diseña, construye y prueba el montaje óptico acorde a la arquitectura descrita en la figura 8, su funcionamiento exitoso constituye el primer resultado experimental, el cual permite la generación de imágenes parcialmente polarizadas durante la reflexión y su posterior captura fotográfica ya con diversos índices de polarización inducida por un polaroide analizador de rotador graduado.

En la Sección de resultados, se complementa con los algoritmos y programas que constituyen el segundo resultado, se juntan para ser mostrados al final con el patrón de transformación de imagen, el cual se expresa mediante subfotogramas (se los llama figuras 11, 12, 13 y 14). Además, los datos cuantitativos y cualitativos se comentan en la sección de resultados.

## Base Científica

Aquí se revisan las definiciones de polarización lineal, circular y elíptica; se lo hace de cuatro formas: forma gráfica, algebraica como función de onda, a cada una se le asigna una posición específica sobre la superficie de la esfera de Poincaré y finalmente se explica brevemente el comportamiento de la luz. El lector debe prestar atención a los colores de la letra con que se escribe algunas expresiones y funciones, con los mismos tonos aparecen los planos de polarización en la figura 7.

Para una mejor comprensión del tema, se explicará los vectores de Jones y se adjunta fotos de maquetas de las ondas, la ecuación de la cónica característica, y finalmente se asigna un gráfico y un vector posición sobre la esfera de Poincaré y la respectiva elipse.

### Polarización lineal

Las ondas electromagnéticas se caracteriza por la perpendicularidad entre los vectores $\vec{E}$, $\vec{H}$ y $\overrightarrow{\pi_r}$, siendo la polarización un efecto característico de las ondas transversales, una onda se denomina polarizada linealmente o también "onda planarmente polarizada" o linealmente polarizada, aquella para la cual, el campo electrostático todo el tiempo está en el mismo plano como se ilustra a continuación:

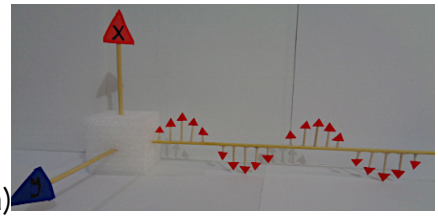
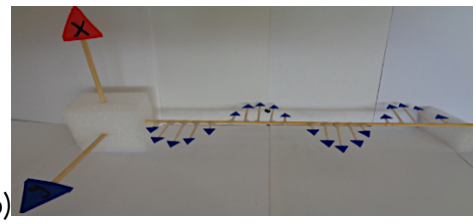
a)  b) 

***Fig.3.*** *Foto de "ondas esquemáticas" polarizadas linealmente; a) En el plano rx (vectores rojos), b) En el plano ry(vectores azules)*

En la figura 3a), al plano xr se lo denomina "plano de oscilación" debido a que en dicho plano oscila el campo electrostático de la onda representada con rojo. Diremos entonces que la onda está polarizada en el plano horizontal xr, para esta onda tenemos la expresión algebraica:

$E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\}$ (3), simbolizada por el vector; $(+1, \quad 0, \quad 0)$ sobre la esfera de Poincaré (figura 6) [10].

En las figuras 3b), se visualiza el "plano de oscilación" debido a que en dichos planos oscila el campo eléctrico de las ondas. Diremos entonces que la onda está polarizada en el plano vertical yr, para esta onda tenemos la expresión:

$E_y(r,t) = E_{oy}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\}$ (4) se representa la onda con el vector; $(-1, \quad 0, \quad 0)$ sobre la misma esfera (figura 6).

A $90^o$ en lo que sería el eje y, está la polarización diagonal en el plano inclinado $+45^o$ sobre el ecuador de la esfera, es decir cuando $E_{ox} = E_{oy}$ : $\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_{oy}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix}$ (5) aquí se usa el vector $(0, \quad 1, \quad 0)$ en el ecuador.

A $270^o$ en lo que sería el eje -y, está la polarización diagonal en el plano inclinado $-45^o$ bajo el ecuador, esto es cuando $E_{ox} = -E_{oy}$ : $\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = -E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix}$, (6) tenemos como referencia el vector; $(0, \quad -1, \quad 0)$ sobre la línea ecuatorial.

Los otros estados de polarización lineal diagonal se representa en la figura 7b.

Los rayos con campo paralelo al eje óptico pasan casi sin ser absorbidos, de esta forma la mitad de los rayos absorbidos tienen su campo eléctrico perpendicular a los rayos que atraviesan, es decir que los que atraviesan tienen el mismo grado de polarización, entre ellos se obtiene luz linealmente polarizada en el plano paralelo al eje óptico [11].

Otra forma de obtener luz polarizada en forma experimental es hacer reflejar luz natural en un cristal común bajo el Ángulo de Brewster, cuando el rayo reflejado es perpendicular al rayo refractado se obtiene luz 100% polarizada en el plano perpendicular al plano de reflexión, en este caso la intensidad luminosa reflejada es muy pequeña [12].

**Polarización circular**

Si se superpone dos campos eléctricos perpendiculares de la misma magnitud y periodicidad pero desfasados un ángulo $\delta \equiv -\pi/2$ como los que se ilustra en los gráficos a) y b) tendremos el caso:

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_{oy}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} + \delta\right\} \end{bmatrix}$$ (7), una breve transformación nos conduce a la expresión:

$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_o\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_o\,\mathrm{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix}$(8), tenemos la ecuación de una circunferencia de radio

constante $E_o$ , de ahí el nombre. Dicho radio gira alrededor del eje r a medida que la onda avanza a lo largo de r de acuerdo a la ley de la mano derecha en sentido horario como se visualiza en las figuras 4, 6b y 7a:

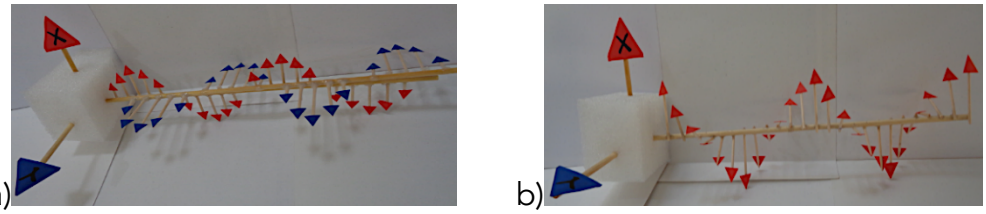


***Fig. 4.*** *a) Formación de una onda circular derecha b) Onda circular derecha formada.*

A esta circunferencia se le asigna el vector $(0, \quad 0, \quad 1)$ que no es sino el eje +z, es decir el polo norte de las figuras No. 6 y 7a.

De manera similar si $\delta \equiv + {}^{\pi}/_{2}$ , el radio será $E_o$ y gira alrededor de r en sentido antihorario a medida que la onda avanza;

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_o \cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = -E_o \operatorname{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix}$$

(9), a esta circunferencia le asignaremos el vector $(\mathbf{0}, \quad \mathbf{0}, \quad -\mathbf{1})$ en el equivalente al eje –z, tal como se visualiza en el polo sur de las figuras 6 y 7a.

Cuando un rayo polarizado circular derecho atraviesa un polaroid, éste absorberá en mayor grado el campo en una dirección y en mucho menor en la dirección perpendicular, es decir que obtendremos luz linealmente polarizada. Lo mismo sucederá con un haz de rayos polarizados circulares izquierdas atraviese una placa de turmalina o un polaroid. [13].

**Polarización elíptica**

Si se superpone dos campos eléctricos perpendiculares de diferente magnitud y la misma periodicidad pero desfasados un ángulo $\delta$ como los que se ilustra en los gráficos 7a y 7b

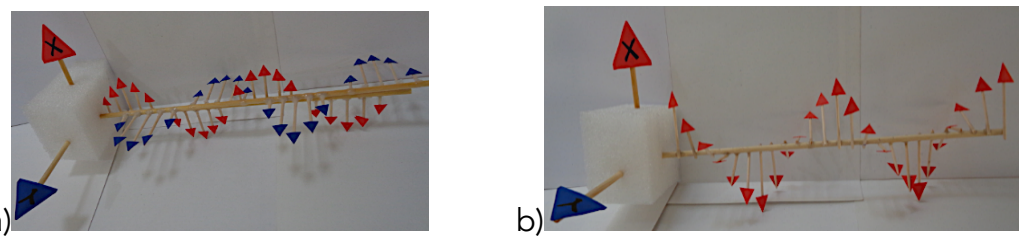


***Fig.5.*** *a) Formación de una onda elíptica derecha, b) Onda elíptica derecha formada.*

Con el mismo desarrollo algebraico se llega a una elipse, el vector de campo E rota a la izquierda mientras avanza en r describiendo dicha cónica. Para los casos en que $\delta \neq \pm {}^{\pi}/_{2}$ se tendrán elipses inclinadas con diferentes excentricidades, cada una de ellas encontrará un punto en la esfera de Poincaré que la describa adecuadamente. Tendremos el caso:

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_{oy}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} - \delta\right\} \end{bmatrix} \qquad (10),$$

si $\delta \equiv -{}^{\pi}/_{2}$, entonces con un breve desarrollo algebraico llegamos a la ecuación de la elipse de donde toma su nombre.

A $0^o$ sobre el meridiano que pasa por el eje x, está representada la polarización elíptica horizontal, es decir cuando $E_{ox} = \epsilon\, E_{oy} = E_o$ , algebraicamente tenemos:

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = \epsilon E_o\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_o\,\mathrm{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix} \qquad (11)$$

usaríamos el vector unitario; $\left(\cos\frac{90^o}{\epsilon},\ 0,\ sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses horarias o levógiras en el hemisferio Norte, mientras que $\left(\cos\frac{90^o}{\epsilon},\ 0,\ -sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses dextrógiras u antihorarias en el hemisferio Sur.

A los $180^o$ sobre el meridiano que pasa por el eje –x, está representada la polarización elíptica vertical, esto es cuando $E_{oy} = \vartheta\, E_{ox} = E_o$ y tenemos:

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_o\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = \vartheta E_o\,\mathrm{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix} \qquad (12)$$

tomamos entonces el vector; $\left(-\cos\frac{90^o}{\vartheta},\ 0,\ sen\ \frac{90^o}{\vartheta}\right)$ para elipses horarias o levógiras en el hemisferio Norte, mientras que $\left(\cos\frac{90^o}{\vartheta},\ 0,\ -sen\ \frac{90^o}{\vartheta}\right)$ para elipses dextrógiras u antihorarias en el hemisferio Sur.

A $90^o$ sobre el meridiano que pasa por el eje y, está la polarización elíptica diagonal levógira u horaria con el eje mayor inclinado $45^o$ respecto a la línea ecuatorial, es decir cuando $E_{ox} = \epsilon\, E_{oy} = E_o$

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_{oy}\,\mathrm{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix} \qquad (13)$$

entonces usamos el vector; $\left(0, \quad \cos\frac{90^o}{\epsilon}, \quad sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses horarias o levógiras en el hemisferio Norte, mientras que $\left(0, \quad \cos\frac{90^o}{\epsilon}, \quad -sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses dextrógiras u antihorarias en el hemisferio Sur.

A $270^o$ sobre el meridiano que pasa por el eje -y, está la polarización elíptica diagonal levógira u horaria con el eje mayor inclinado $135^o$ respecto a la línea ecuatorial, es decir cuando $E_{ox} = \epsilon\, E_{oy} = E_o$

$$\begin{bmatrix} E_x(r,t) = E_{ox}\cos\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \\ E_y(r,t) = E_{oy}\,\mathrm{sen}\left\{\frac{2\pi r}{\lambda} \mp \frac{2\pi t}{T}\right\} \end{bmatrix} \qquad (14)$$

entonces usamos el vector; $\left(0, \quad -\cos\frac{90^o}{\epsilon}, \quad sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses antihorarias o dextrógiras en el hemisferio Norte, mientras que $\left(0, \quad -\cos\frac{90^o}{\epsilon}, \quad -sen\ \frac{90^o}{\epsilon}\right)$ para elipses dextrógiras o antihorarias en el hemisferio Sur, se ilustra en la figura 6 a y b.

**Esfera de Poincaré**

La Esfera de Poincaré constituye un mapa esférico donde se pueden describir todos los estados de polarización posibles, desde la polarización circular en los polos hasta la lineal en el ecuador como se representa en las siguientes figuras:

a) b)

***Fig.6.*** *a) Esfera esquemática de Poincaré, b)Esfera de Poincaré con las respectivas ondas.*

Sobre la superficie de una esfera de espumaflex fueron dibujadas algunas elipses, en ellas se representa el tipo de polarización, no se conservó circulación de mano derecha (la ley de la mano derecha). En los sitios correspondientes, se incrustaron "ondas esquemáticas" construidas en madera y cartón, así visualizaremos el tipo de onda en cuestión.

- N.- El hemisferio norte de la esfera representa la polarización levógira (de mano izquierda u horaria), El polo norte N en si será: *Right Circular Polarization (RCP).*
- S.- El hemisferio sur de la esfera representa la polarización circular dextrógira (de mano derecha o antihoraria), El polo Sur en si será: *Left Circular Polarization (LCP)* [14]. Los dos casos pueden visualizarse en el siguiente gráfico:

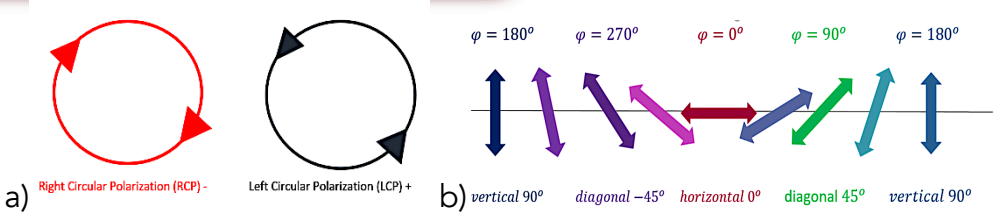



***Fig.7.*** *Estados de polarización; a) Polos de la esfera, b) En la línea ecuatorial, φ es la longitud en la esfera de Poincaré, al pie se indican algunas orientaciones notables del polaroide analizador.*

- **Sobre el ecuador** se representa la Polarización lineal, a lo largo de los $360^o$ se indica la orientación de varios los planos de polarización sucesivos que se pueden encontrar.

De este modo el área que está entre los polos y el ecuador representa los diversos grados de la polarización elíptica tanto derecha como izquierda, se puede visualizar en la figura 6 a.

Como puede verse, la generalidad de los casos corresponde a polarización elíptica y solo en casos específicos tenemos lineal o circular. Un tubo de rayos de luz puede contener los tres tipos de polarización, se hace necesario definir de manera compacta su composición, esto se lo realiza mediante Vectores de Stokes, las matrices de Moeler contienen los cambios de estado de los vectores de Stokes.

### Vectores de Stokes y matrices de Moeller

Una información más completa hace necesario el uso de un vector columna $\mathcal{S}$, que representa la composición o estado de polarización de la luz y usualmente se conoce como vector de Stokes

$$\overrightarrow{\mathcal{S}^{\alpha}} = \begin{pmatrix} s_o^{\alpha} \\ s_1^{\alpha} \\ s_2^{\alpha} \\ s_3^{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & Iradiancia\ incidente & \\ \boldsymbol{Pol.hor.0^o;+} & ninguna;0 & \boldsymbol{Pol.vert.\ 90^o;-} \\ \boldsymbol{Pol.diag.+45^o;+} & ninguna;0 & \boldsymbol{Pol.obl.-45^o;\ -} \\ \boldsymbol{Circ.o\ elip.\ der;\ +} & ninguna;0 & \boldsymbol{Circ.o\ elip.\ izq.;\ -} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$\alpha = i$ indica que el el rayo incide, $\alpha = o$ cuando emerge del sistema [15].

$\mathcal{S}$ se define en función de las componentes ortogonales del vector de campo eléctrico (Ep,Es).

Para el caso de luz cuasi monocromática tendremos:

$$\vec{E}(t) = \begin{cases} \vec{\imath}\, E_{ox} & \cos[(\bar{k}z - \bar{\omega}t) + \varepsilon_{x(t)}], \\ \vec{\jmath} E_{oy} & \mathrm{sen}[(\bar{k}z - \bar{\omega}t) + \varepsilon_{y(t)}]. \end{cases} \quad (16)$$

Si además $\varepsilon_x - \varepsilon_y = \varepsilon$ y eliminamos la constante ${}^{c\varepsilon_o}/_2$ para que los parámetros sean proporcionales a las irradiancias, entonces tendremos:

$$\begin{pmatrix} s_o^\alpha \\ s_1^\alpha \\ s_2^\alpha \\ s_3^\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_{ox}^2 \rangle_T & + & \langle E_{oy}^2 \rangle_T \\ \langle E_{ox}^2 \rangle_T & - & \langle E_{oy}^2 \rangle_T \\ \langle 2\, E_{ox}\, E_{oy} \cos \varepsilon \rangle_T \\ \langle 2\, E_{ox}\, E_{oy} \operatorname{sen} \varepsilon \rangle_T \end{pmatrix} \qquad (17)$$

La rotación acimutal del analizador intercalado delante del lente de acuerdo a la ley de Malus [15], hará disminuir significativamente la influencia de los rayos 100% polarizados y por lo tanto varía el grado de polarización p para dicho pixel, es decir cambia respuesta lineal del sistema óptico a un rayo de luz incidente y puede expresarse mediante la relación

$$\overrightarrow{\mathcal{S}^o} = M\overrightarrow{\mathcal{S}^i} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_o^i \\ s_1^i \\ s_2^i \\ s_3^i \end{pmatrix} \qquad (18)$$

M es la matriz de Mueller del sistema, constituye una matriz de transformación cuadrada 4×4 de elementos reales [16], de esta manera cambió la composición de la polarización de un rayo reflejado. El análisis gráfico de sistemas polarimétricos puede realizarse utilizando representaciones en tres dimensiones (superficies) o en dos dimensiones (mapas), donde los respectivos ejes pueden estar asociados a los vectores de Stokes o bien a los ángulos elipsométricos asociados a los estados de polarización. Los vectores normalizados de Stokes pueden describirse gráficamente en término de los parámetros de la elipse de polarización, de los ángulos acimutal ($0 \leq \boldsymbol{\psi} \leq \pi$) y de elipticidad ($-\pi/4 \leq \boldsymbol{\chi} \leq \pi/4$), respectivamente [17],

$$\vec{\mathcal{S}} = \langle \mathcal{S}_o \rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(2\chi)\cos(2\psi) \\ \cos(2\chi)\operatorname{sen}(2\psi) \\ \operatorname{sen}(2\chi) \end{pmatrix} \qquad (19)$$

Donde $\langle \mathcal{S}_o \rangle$ representa la intensidad asociada al vector de Stokes, que usualmente se normaliza al valor unitario. [18].

El tamaño de ésta tarea supera la esfera del presente trabajo y nos abstenemos de ejecutar este análisis en función de las limitaciones.

## Materiales y Método

En esta sección se establece una investigación práctica basada en la captación de imagen reflejada y filtrada con polaroid orientado a diferentes ángulos acimutales, así mismo una investigación descriptiva del fenómeno que permite analizar características observables aplicando el proceso de binarización y comparación de las imágenes captadas. Se diseña, construye y utiliza el montaje óptico necesario para la investigación.

## Base Experimental

En la figura 8 se representa la formación de un pixel rayo por rayo, todos provenientes de un mismo punto luminoso de la imagen reflejada en una placa del vidrio la cual juega el papel de polarizador [19], y por ende cada rayo se refleja con diferente grado de polarización, la única manera de conocer dicha magnitud es intercalar un rotador con polaroide analizador graduado para registrar imágenes cada cierto ángulo (10 o 15 grados) , es decir variando el ángulo acimutal con un rotador de polaroide graduado.

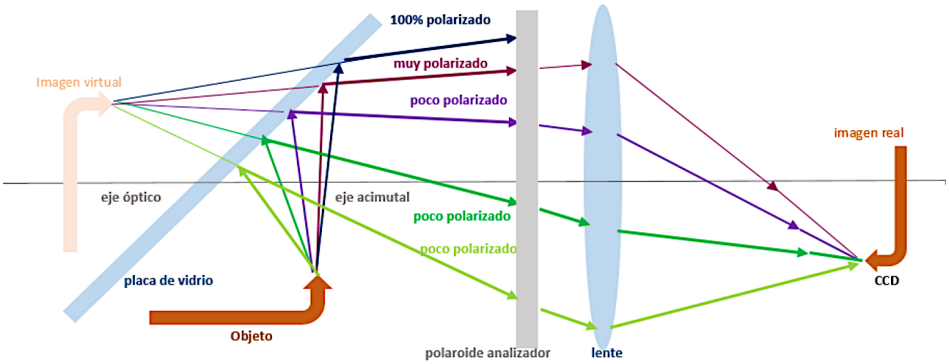



***Fig.8.*** *Formación de un pixel sobre el CCD de la cámara fotográfica*

Los rayos que adquieren mayor grado de polarización son aquellos que se reflejan bajo ángulos cercanos al Ángulo de Brewster, cuando el eje permisivo del polaroide analizador este en concordancia con el plano perpendicular (posición $0^o$) dichos rayos pasarán libremente, pero al rotar el analizador de acuerdo a la Ley de Malus [20], ya no lo podrán atravesar, como consecuencia la intensidad luminosa sobre el CCD disminuye y la imagen se vuelve opaca y con tendencia al negro en la escala de grises, el cambio en el proceso de binarización es inminente.

Los puntos cercanos al Ángulo de Brewster tendrán grados de polarización altos, es entonces Heuristicamente razonable agrupar los puntos luminosos por su zona de procedencia ya que tendrán similar binarización, lo cual sugiere una Segmentación regular de Imagen por División del cuadro, ésto deja fuera los otros criterios de segmentación sugeridos [21].

## Procesamiento de imagen

### *Adquisición de las imágenes*

En la figura 8 el lente y el CCD corresponden a una cámara digital bajo la siguiente descripción:

Marca Sony Cyber-Shot modelo DSC-W830
CCD de 7,76 mm (tipo ½,3) filtro de color primario
Número efectivo de píxeles 20,1 M px
Objetivo zoom 8Xzeiss Vario-Tessar, f=4,5 mm – 36mm
Imágenes fijas: compatible con JPEG (DCF, Exif, MPF Baseline), compatible con DPOF
Películas: MPEG-4 AVC/H264
Memoria interna: 27 MB, externa micro SD
Flash: Sensibilidad ISO ajuste automático.
Salidas: USB Hi Speed USB 2.0
Compatibilidad: Windows, Windows vista, Macintosh.

Se utilizó un rotador de polaroid manual, diámetro 45 mm con apreciación de $\pm 1^o$ de ángulo acimutal. Durante todas las tomas en cuarto obscuro a 0.1 lx, se mantuvo una temperatura de $25^o$ y la imagen bajo una retroiluminación constante de una lámpara osram de 50 Watts AC con reflector dicroico [22].

Todos los elementos se sujetaron a un tablero melamínico suspendido sobre capa de esponja suave de 1 pulgada más una capa de plástico de burbujas en configuración sánduche para minimizar la transmisión de posibles vibraciones en la mesa.

En la figura 9 se muestra algunas de las imágenes obtenidas, cada una obedece a un ángulo acimutal característico, se nota la similitud entre el primer cuadro( $45^o$) con el quinto ($225^o$), así también el segundo ($90^o$) con el sexto ($270^o$).

***Fig. 9.*** *Imágenes capturadas con polaroide analizador a* $45^o$, $90^o$,$135^o$, $180^o$, $225^o$ *y* $270^o$.

### *Recorte de las imágenes*

En el proceso de recorte de imagen se estableció un punto de referencia para realizar la comparación de la imagen original con la polarizada, considerando que las imágenes polarizadas sufren inversión y un leve desplazamiento debido al grosor del vidrio.

Con este análisis y de acuerdo con la función de MATLAB "*imcrop (imagen, [x1, y1, x2, y2])*" se estableció un recorte de imagen de 512x512 pixeles, considerando los puntos de referencias para una imagen polarizado de x1=1000, y1=800, x2=512 y y2=512 y para la imagen original los puntos x1=1110 y y1= 740, los valores de x2 y y2 se mantienen.

### *Binarización de la imagen*

El software que mejor se adaptó a las necesidades para el proceso de análisis de imagen es MAT LAB permitiendo fácilmente la binarización [23], segmentación y comparación de las imágenes.

La binarización permite una comparación más eficiente entre imágenes debido a que solo se consideran los valores de 0 y 1 (se cuantizan) por cada pixel analizado, haciéndolo más fácil que trabajar con una imagen en escala de grises o considerando todos los colores RGB.

### *Segmentación de Imagen por División del cuadro*

Si dividimos la pantalla en N cuadros utilizando la sucesión; $N = 2^{2xn}$, con n=1, 2, 3, 4,….. (20)

así por ejemplo la primera partición con n=1, nos da: $N = 2^{2x1} = 4$ cuatro partes como se indica a continuación en la figura 10 a):

a) b)

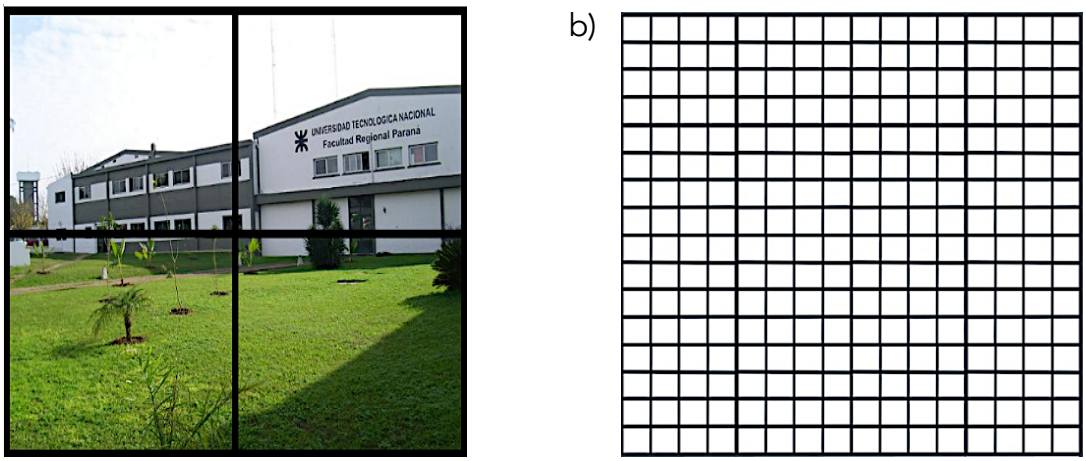



***Fig.10.*** *a) Segmentación de una imagen en su primera partición, n=1, b) Segmentación de una imagen en su cuarta partición, n=4.*

Entonces podremos analizar la imagen por subcuadros, en busca de semejanzas y diferencias entre ellos, estas diferencias pueden ser: el número de pixeles rojos (R), pixeles verdes (G) y pixeles azules (B), igualmente pueden incorporarse otras multiples características como repeticiones por filas o por columnas etc. El resultado de esta búsqueda será la elección celdas únicas e inconfundibles, si dos celdas tienen características similares, se consideraran "confusamente iguales" y no serán únicas.

Mientras más grande la celda S tendremos más pixeles por analizar, reduciremos el tamaño de las celdas a la cuarta parte, en compensación debemos repetir el proceso 4 veces, es necesario una subdivisión que contenga un número representativo de pixeles que haga a la subcelda única y diferente de las otras.

Siguiendo la sucesión: $N_n = 2^{2xn} = 4^n$, para n=4 tendremos 16 x 16 = 256 cuadros, fig. 10b)

$N_2 = 2^{2x4} = 256$ cuadros con $\frac{800\text{x}1200 \text{ pixeles}}{256} = 3750 \text{ px}$

### *Comparación*

Se toma los resultados de n=4, es decir la segmentación de 256 fig. 10b) y en ella se realiza el proceso de comparación fragmento por fragmento del cuadro, para la observación de cambios más específicos en las imágenes analizadas bajo un mismo umbral para los tonos de grises y se contabiliza el número de coincidencias y número de cambios respecto al original. Se desecha la comparación por colores debido al tamaño de la tarea.

## RESULTADOS

Se expone el patrón de cambios de superación del umbral binarizado de tonos de gris para cada fragmento con el polaroide analizador rotado un ángulo acimutal **θ**. Los subfotogramas que se expone no son tablas ni figuras, no obstante, se los llama figuras para no perder el orden en la numeración.

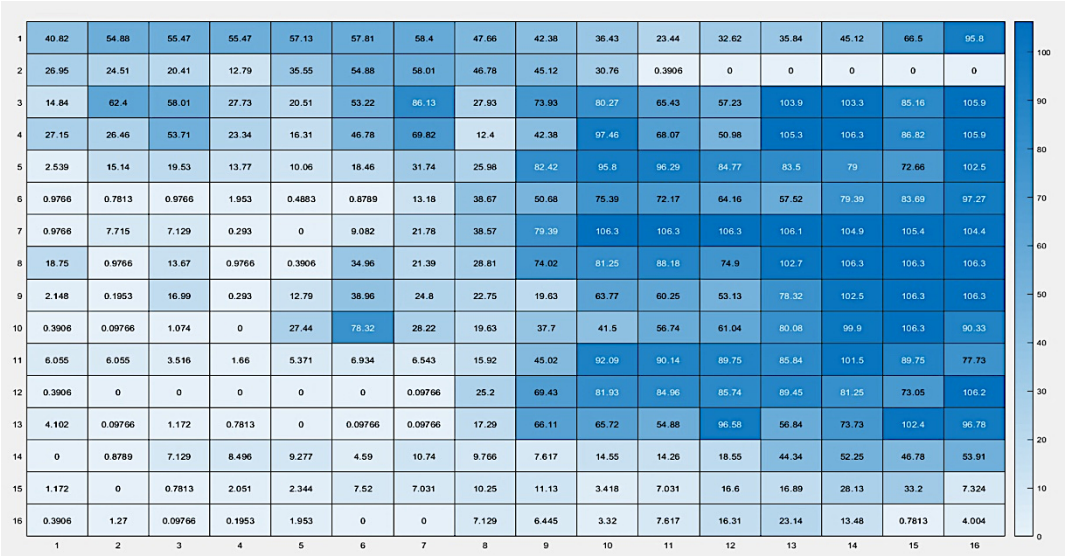
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 76.56 | 81.25 | 72.75 | 75 | 68.75 | 67.09 | 67.58 | 61.91 | 59.28 | 55.86 | 54.79 | 58.5 | 49.02 | 52.73 | 67.19 | 95.51 |
| 2 | 76.76 | 81.54 | 85.74 | 92.77 | 68.95 | 51.46 | 42.77 | 68.07 | 73.05 | 71 | 98.54 | 102.7 | 106.3 | 102.5 | 101.4 | 101.2 |
| 3 | 83.2 | 44.63 | 48.63 | 78.61 | 84.08 | 53.13 | 21.39 | 77.54 | 32.42 | 28.42 | 62.3 | 93.55 | 82.62 | 75.2 | 93.46 | 105.9 |
| 4 | 74.61 | 76.76 | 53.13 | 82.91 | 88.87 | 58.98 | 37.7 | 92.68 | 59.28 | 12.89 | 53.42 | 87.11 | 52.34 | 72.27 | 96.19 | 106.1 |
| 5 | 97.46 | 90.04 | 86.13 | 92.38 | 95.7 | 87.5 | 81.54 | 98.44 | 46.78 | 33.11 | 34.08 | 34.08 | 40.53 | 59.18 | 81.05 | 102.9 |
| 6 | 102.1 | 105.6 | 104.9 | 104.3 | 105.7 | 105.8 | 105.1 | 104.7 | 100 | 90.43 | 86.13 | 79.39 | 72.27 | 90.72 | 91.11 | 98.14 |
| 7 | 100.2 | 91.41 | 98.83 | 106 | 106.3 | 85.74 | 93.65 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.2 | 105.1 | 105.4 | 104.4 |
| 8 | 77.44 | 90.72 | 92.58 | 105.3 | 104.1 | 41.31 | 87.6 | 106.3 | 105.6 | 97.56 | 79.39 | 81.64 | 103.2 | 106.3 | 106.3 | 106.3 |
| 9 | 101 | 88.67 | 89.36 | 106 | 62.11 | 64.16 | 67.09 | 106.3 | 83.89 | 47.75 | 54.2 | 68.65 | 80.18 | 104.9 | 106.3 | 106.3 |
| 10 | 102.7 | 106.3 | 105.3 | 106.3 | 49.51 | 46.97 | 81.05 | 106.3 | 106.1 | 79.69 | 67.77 | 61.62 | 84.08 | 102.8 | 106.3 | 103.2 |
| 11 | 96.88 | 99.12 | 102.8 | 94.82 | 67.87 | 67.68 | 93.65 | 100.8 | 105.3 | 95.12 | 96.19 | 95.12 | 93.07 | 104.6 | 102.1 | 97.36 |
| 12 | 98.54 | 102.7 | 106.3 | 102.5 | 101.4 | 101.2 | 99.12 | 103 | 102.5 | 96.09 | 95.21 | 94.53 | 93.55 | 97.75 | 93.65 | 106.3 |
| 13 | 99.02 | 106.3 | 105.2 | 105.6 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 104 | 101.3 | 88.09 | 100.8 | 83.69 | 94.24 | 106.3 | 106.2 |
| 14 | 103 | 104.4 | 94.53 | 96.78 | 96.58 | 100.7 | 90.82 | 93.07 | 90.14 | 85.06 | 71.68 | 79.49 | 88.38 | 95.12 | 105.3 | 69.34 |
| 15 | 102 | 100.7 | 95.12 | 93.36 | 103.9 | 92.38 | 87.79 | 78.13 | 77.64 | 89.16 | 92.58 | 92.38 | 69.73 | 45.7 | 55.86 | 20.02 |
| 16 | 101.7 | 103.8 | 105.3 | 104.5 | 98.54 | 94.04 | 100.6 | 98.73 | 87.6 | 83.69 | 70.41 | 51.56 | 62.5 | 58.2 | 53.52 | 18.75 |

***Fig.11.*** *Original vs Angulo 0°*

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 83.89 | 83.5 | 76.66 | 76.37 | 71.97 | 71.68 | 72.07 | 66.11 | 62.11 | 59.67 | 56.64 | 54 | 47.75 | 47.85 | 69.34 | 96.29 |
| 2 | 76.95 | 81.84 | 85.74 | 93.07 | 70.7 | 51.07 | 41.8 | 67.87 | 72.85 | 71.19 | 99.51 | 103.3 | 105.8 | 102.2 | 101.5 | 100.9 |
| 3 | 83.01 | 45.7 | 48.63 | 78.52 | 84.96 | 52.34 | 20.21 | 78.03 | 32.23 | 26.95 | 61.82 | 80.96 | 81.25 | 73.83 | 72.95 | 105.9 |
| 4 | 75.1 | 78.03 | 51.95 | 82.13 | 87.89 | 59.77 | 36.91 | 93.26 | 62.11 | 13.96 | 51.86 | 77.44 | 53.61 | 76.17 | 73.05 | 106.1 |
| 5 | 97.75 | 89.94 | 85.84 | 92.29 | 95.61 | 87.99 | 81.45 | 97.85 | 47.07 | 34.67 | 35.45 | 34.47 | 45.21 | 61.13 | 72.85 | 103.7 |
| 6 | 101.9 | 105.6 | 105.4 | 104.4 | 105.9 | 105.7 | 105.1 | 104.6 | 97.95 | 94.63 | 90.04 | 81.15 | 76.76 | 91.41 | 89.94 | 98.44 |
| 7 | 97.85 | 95.02 | 98.93 | 106.1 | 106.2 | 86.91 | 93.65 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.2 | 105.1 | 105.4 | 104.4 |
| 8 | 83.4 | 92.77 | 92.68 | 105.4 | 93.55 | 39.94 | 89.06 | 106.3 | 105.6 | 92.68 | 72.36 | 61.91 | 102.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 |
| 9 | 100.9 | 88.67 | 89.26 | 104.5 | 55.66 | 62.99 | 68.55 | 106.3 | 60.35 | 33.4 | 37.4 | 64.16 | 79.2 | 103 | 106.3 | 106.3 |
| 10 | 102.7 | 106.3 | 105.3 | 103.4 | 48.63 | 41.8 | 77.54 | 106.3 | 101.9 | 64.06 | 41.7 | 60.55 | 81.54 | 98.93 | 106.3 | 103 |
| 11 | 97.07 | 99.51 | 102.8 | 88.28 | 63.77 | 69.34 | 98.73 | 100.8 | 105.3 | 95.12 | 94.43 | 94.63 | 92.77 | 105.4 | 101.5 | 99.71 |
| 12 | 99.51 | 103.3 | 105.8 | 102.2 | 101.5 | 100.9 | 99.41 | 104.6 | 100.1 | 94.73 | 95.41 | 94.14 | 95.31 | 96.97 | 96.58 | 106.3 |
| 13 | 99.02 | 106.3 | 105.2 | 105.6 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 104 | 100.9 | 88.87 | 100.7 | 80.18 | 99.12 | 106.3 | 106.1 |
| 14 | 102.8 | 103.6 | 96.78 | 96.58 | 95.7 | 99.22 | 93.55 | 87.89 | 88.18 | 87.7 | 70.7 | 80.18 | 90.92 | 97.17 | 105.2 | 59.18 |
| 15 | 101.7 | 96.78 | 98.14 | 93.75 | 103.7 | 91.21 | 87.99 | 76.27 | 76.86 | 88.87 | 94.34 | 84.67 | 55.86 | 39.65 | 46.88 | 12.5 |
| 16 | 101.3 | 104.3 | 106.2 | 103.2 | 95.41 | 95.41 | 101.4 | 97.36 | 88.48 | 76.66 | 71.97 | 43.85 | 58.69 | 58.3 | 46.58 | 13.67 |

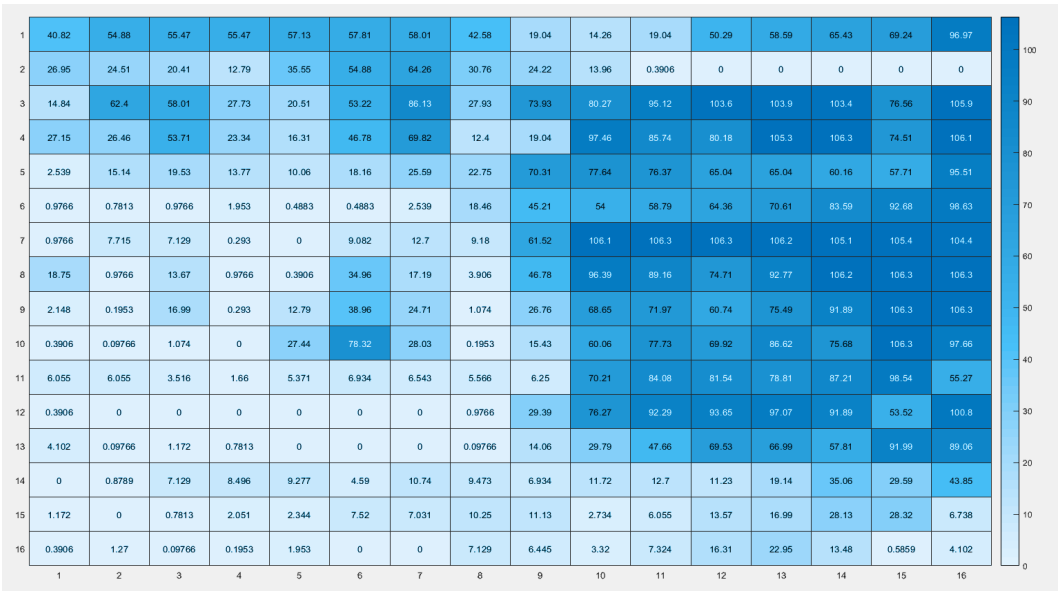
***Fig.12.*** *Original vs Angulo 180°*

Se observa la identidad de la figura **θ**=180° con el patrón obtenido cuando **θ**=0°, la abundante presencia de cuadrados azules confirma la concordancia del eje del polaroid analizador con el plano de polarización de los rayos provenientes de la imagen reflejada.



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 40.82 | 54.88 | 55.47 | 55.47 | 57.13 | 57.81 | 58.4 | 47.66 | 42.38 | 36.43 | 23.44 | 32.62 | 35.84 | 45.12 | 66.5 | 95.8 |
| 2 | 26.95 | 24.51 | 20.41 | 12.79 | 35.55 | 54.88 | 58.01 | 46.78 | 45.12 | 30.76 | 0.3906 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 14.84 | 62.4 | 58.01 | 27.73 | 20.51 | 53.22 | 86.13 | 27.93 | 73.93 | 80.27 | 65.43 | 57.23 | 103.9 | 103.3 | 85.16 | 105.9 |
| 4 | 27.15 | 26.46 | 53.71 | 23.34 | 16.31 | 46.78 | 69.82 | 12.4 | 42.38 | 97.46 | 68.07 | 50.98 | 105.3 | 106.3 | 86.82 | 105.9 |
| 5 | 2.539 | 15.14 | 19.53 | 13.77 | 10.06 | 18.46 | 31.74 | 25.98 | 82.42 | 95.8 | 96.29 | 84.77 | 83.5 | 79 | 72.66 | 102.5 |
| 6 | 0.9766 | 0.7813 | 0.9766 | 1.953 | 0.4883 | 0.8789 | 13.18 | 38.67 | 50.68 | 75.39 | 72.17 | 64.16 | 57.52 | 79.39 | 83.69 | 97.27 |
| 7 | 0.9766 | 7.715 | 7.129 | 0.293 | 0 | 9.082 | 21.78 | 38.57 | 79.39 | 106.3 | 106.3 | 106.3 | 106.1 | 104.9 | 105.4 | 104.4 |
| 8 | 18.75 | 0.9766 | 13.67 | 0.9766 | 0.3906 | 34.96 | 21.39 | 28.81 | 74.02 | 81.25 | 88.18 | 74.9 | 102.7 | 106.3 | 106.3 | 106.3 |
| 9 | 2.148 | 0.1953 | 16.99 | 0.293 | 12.79 | 38.96 | 24.8 | 22.75 | 19.63 | 63.77 | 60.25 | 53.13 | 78.32 | 102.5 | 106.3 | 106.3 |
| 10 | 0.3906 | 0.09766 | 1.074 | 0 | 27.44 | 78.32 | 28.22 | 19.63 | 37.7 | 41.5 | 56.74 | 61.04 | 80.08 | 99.9 | 106.3 | 90.33 |
| 11 | 6.055 | 6.055 | 3.516 | 1.66 | 5.371 | 6.934 | 6.543 | 15.92 | 45.02 | 92.09 | 90.14 | 89.75 | 85.84 | 101.5 | 89.75 | 77.73 |
| 12 | 0.3906 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.09766 | 25.2 | 69.43 | 81.93 | 84.96 | 85.74 | 89.45 | 81.25 | 73.05 | 106.2 |
| 13 | 4.102 | 0.09766 | 1.172 | 0.7813 | 0 | 0.09766 | 0.09766 | 17.29 | 66.11 | 65.72 | 54.88 | 96.58 | 56.84 | 73.73 | 102.4 | 96.78 |
| 14 | 0 | 0.8789 | 7.129 | 8.496 | 9.277 | 4.59 | 10.74 | 9.766 | 7.617 | 14.55 | 14.26 | 18.55 | 44.34 | 52.25 | 46.78 | 53.91 |
| 15 | 1.172 | 0 | 0.7813 | 2.051 | 2.344 | 7.52 | 7.031 | 10.25 | 11.13 | 3.418 | 7.031 | 16.6 | 16.89 | 28.13 | 33.2 | 7.324 |
| 16 | 0.3906 | 1.27 | 0.09766 | 0.1953 | 1.953 | 0 | 0 | 7.129 | 6.445 | 3.32 | 7.617 | 16.31 | 23.14 | 13.48 | 0.7813 | 4.004 |

***Fig.13.*** *Original vs Angulo 90°*



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 40.82 | 54.88 | 55.47 | 55.47 | 57.13 | 57.81 | 58.01 | 42.58 | 19.04 | 14.26 | 19.04 | 50.29 | 58.59 | 65.43 | 69.24 | 96.97 |
| 2 | 26.95 | 24.51 | 20.41 | 12.79 | 35.55 | 54.88 | 64.26 | 30.76 | 24.22 | 13.96 | 0.3906 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 14.84 | 62.4 | 58.01 | 27.73 | 20.51 | 53.22 | 86.13 | 27.93 | 73.93 | 80.27 | 95.12 | 103.6 | 103.9 | 103.4 | 76.56 | 105.9 |
| 4 | 27.15 | 26.46 | 53.71 | 23.34 | 16.31 | 46.78 | 69.82 | 12.4 | 19.04 | 97.46 | 85.74 | 80.18 | 105.3 | 106.3 | 74.51 | 106.1 |
| 5 | 2.539 | 15.14 | 19.53 | 13.77 | 10.06 | 18.16 | 25.59 | 22.75 | 70.31 | 77.64 | 76.37 | 65.04 | 65.04 | 60.16 | 57.71 | 95.51 |
| 6 | 0.9766 | 0.7813 | 0.9766 | 1.953 | 0.4883 | 0.4883 | 2.539 | 18.46 | 45.21 | 54 | 58.79 | 64.36 | 70.61 | 83.59 | 92.68 | 98.63 |
| 7 | 0.9766 | 7.715 | 7.129 | 0.293 | 0 | 9.082 | 12.7 | 9.18 | 61.52 | 106.1 | 106.3 | 106.3 | 106.2 | 105.1 | 105.4 | 104.4 |
| 8 | 18.75 | 0.9766 | 13.67 | 0.9766 | 0.3906 | 34.96 | 17.19 | 3.906 | 46.78 | 96.39 | 89.16 | 74.71 | 92.77 | 106.2 | 106.3 | 106.3 |
| 9 | 2.148 | 0.1953 | 16.99 | 0.293 | 12.79 | 38.96 | 24.71 | 1.074 | 26.76 | 68.65 | 71.97 | 60.74 | 75.49 | 91.89 | 106.3 | 106.3 |
| 10 | 0.3906 | 0.09766 | 1.074 | 0 | 27.44 | 78.32 | 28.03 | 0.1953 | 15.43 | 60.06 | 77.73 | 69.92 | 86.62 | 75.68 | 106.3 | 97.66 |
| 11 | 6.055 | 6.055 | 3.516 | 1.66 | 5.371 | 6.934 | 6.543 | 5.566 | 6.25 | 70.21 | 84.08 | 81.54 | 78.81 | 87.21 | 98.54 | 55.27 |
| 12 | 0.3906 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.9766 | 29.39 | 76.27 | 92.29 | 93.65 | 97.07 | 91.89 | 53.52 | 100.8 |
| 13 | 4.102 | 0.09766 | 1.172 | 0.7813 | 0 | 0 | 0 | 0.09766 | 14.06 | 29.79 | 47.66 | 69.53 | 66.99 | 57.81 | 91.99 | 89.06 |
| 14 | 0 | 0.8789 | 7.129 | 8.496 | 9.277 | 4.59 | 10.74 | 9.473 | 6.934 | 11.72 | 12.7 | 11.23 | 19.14 | 35.06 | 29.59 | 43.85 |
| 15 | 1.172 | 0 | 0.7813 | 2.051 | 2.344 | 7.52 | 7.031 | 10.25 | 11.13 | 2.734 | 6.055 | 13.57 | 16.99 | 28.13 | 28.32 | 6.738 |
| 16 | 0.3906 | 1.27 | 0.09766 | 0.1953 | 1.953 | 0 | 0 | 7.129 | 6.445 | 3.32 | 7.324 | 16.31 | 22.95 | 13.48 | 0.5859 | 4.102 |

***Fig.14.*** *Original vs Angulo 270°*

La similitud entre esta tabla y la obtenida a 90° con el oscurecimiento de los subfotogramas en la esquina inferior izquierda lo que evidencia una alta DOP de los rayos reflejados debido a las leyes de Brewster y Malus. Esto nos indica que es un efecto de la polarización lineal durante el reflejo.

Los ángulos acimutales de menor transparencia son los de 90° y 270°grados, de acuerdo con la figura 7b podemos concluir que se trata de polarización lineal con onda vertical (fórmula 4) representada por el vector; (-1, 0, 0) en la esfera de Poincaré. Éste es el aporte científico de la presente investigación.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### Discusión

Si se elige evaluar cada sector o fragmento con Vectores de Stokes como en la fórmula (15), identificando también la matriz de transformación de Mueller (fórmula 17) para el sistema, se podrá encontrar el nuevo vector del fragmento como producto matricial de la fórmula (18) y así predecir su intensidad. El número de cálculos crecerá con el número de fragmentos de acuerdo con la fórmula (20) y además se debe obtener las imágenes experimentalmente, el tamaño de la tarea supera en mucho a la presente investigación. Se escogió el método de umbral por su ventaja de que el cálculo es más simple que otros y la velocidad de operación es más rápida, esto dentro de una segmentación regular condicionada por una dependencia cartesiana del grado de polarización.

### Conclusiones

Los ángulos acimutales de menor transparencia son los de 90° y 270°grados, de acuerdo a la figura 7b podemos concluir que se trata de polarización lineal con onda vertical (fórmula 4) representada por el vector; (-1, 0, 0) en la esfera de Poincaré. Este es el aporte científico de la presente investigación.

En el caso de captación de imágenes reflejadas en dieléctricos de objetos cercanos siempre aparecerá un patrón de "mancha oscura", de acuerdo con los subfotogramas, obedecen a la polarización lineal en ángulos cercanos al ángulo de Brewster para el dieléctrico y constituyen un limitante para la resolución y la nitidez.

El patrón de "mancha oscura" de la reflexión desaparece al momento de utilizar espejo metalizado, esto demuestra el carácter ondulatorio del fenómeno.

El uso de doble cámara podría ser una solución interesante al momento de complementar imágenes en el sector de la mencionada "mancha oscura" o sombra.

Es posible caracterizar el estado de polarización de cada cuadro de una segmentación con algún vector de Stokes, su transformación tras cualquier tipo de polarización se puede evaluar con una matriz de transformación de Moeller. El patrón de cambio de una imagen binarizada y regularmente segmentada en forma n x n, se caracterizará por el mismo número n x n de matrices de Moeller 4x4, una para cada subcuadro, es decir con un tensor.

Para evaluar el patrón de cambio por colores, en futuras investigaciones, se recomienda utilizar una imagen regularizada con n x n colores y el mismo número de matrices de Moeller para la búsqueda del tensor de transformación.

La herramienta de Mat Lab cumple con las expectativas de procesamiento de imagen reflejada en dieléctricos. Para futuras investigaciones se recomienda una herramienta más automatizada en honor al tiempo.

## BIBLIOGRAFIA


E. Hecht: *OPTICS,* 5.7 Los sistemas ópticos, pp. 151-233 , 2002, San francisco, New York, Boston,..., Addison Wesley.

A.N. Zaidel Y.I.; Ostrovsky, G. V. O. : *TÉCNICA Y PRÁCTICA DE ESPECTROSCOPÍA.* Iluminación y Enfoque de Aparatos Espectrales, pp. 181–217, 1979, Moscú, Ed. Mir.

Jain A.; Anees, P.; Tamang, R.; Pendyala, N.; & Banerjee, A.: Development of Electro-optical Characterization Test Bench for High Performance Infrared Focal Plane Area Array Detectors (Lcc).

Christian Buil: CCD Astronomy, 4 Image Procesing, 1991, Richmond Virginia ,pp153-211, Willmann-Bell, Inc.

D. B. Sibujin: *Curso de Física General, tomo 4*«Elementos Polarizadores, pp. 264-272, 1985, Moscú, Nauka.

G. Anna; F. Goudail ; D. Dolfi: «Polarimetric target detection in the presence of spatially fluctuating Mueller matrices.,» *Optics Letters,* vol. 36, n° 23, 2011, pp. 1-4.

Chipman, R: *Handbook of Optics*, Polarimetry, p. 22.1-22.23, 1995, M. G. Hill (Ed.), (Second,). New York.

Z. B. Begunov: *TEORÍA DE SISTEMAS ÓPTICOS*, Óptica de rayos paraxiales, pp. 77-91, 1976, Moscú, Ed. Mir.

Vargas, G.; Neira, O.; Arango, R.; Fernando, D.; Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales, Cloud segmentation methods applied to satellite images. *Tecnura*, *17*(36), 96–110, 2013.

Guoxiu Huang; Shoichiro Oda; Yuichi Akiyama; Hiroyuki Irie; Setsuo Yoshida; Hisao Nakashima, T. H.: Poincaré Sphere. *Fujitsi Limited*, 1-2–3. Retrieved from Fujitsu

E. Hecht: *OPTICS,* 5.7 Polarización pp. 324–377, (2005, San francisco, New York, Boston,..., Addison Wesley Tercera Ed. Madrid, Pearson.

B. M. Yavorski; A. A. Detlaf: *PRONTUARIO DE FÍSICA*, Ondas electromagnéticas, pp. 416-434, 1985, Moscú, Ed.Mir.

J. M. Bennet: *Handbook oof OPTICS*, 2.- Fresnel equations, pp. 5-4 5-12, 1995, de, New York, San Francisco y otras, Mc GRAW-HILL,INC.

Guoxiu Huang; Shoichiro Oda; Yuichi Akiyama; Hiroyuki Irie; Setsuo Yoshida; Hisao Nakashima: Poincaré Sphere. *Fujitsi Limited*, 1-2–3. Retrieved from Fujitsu

Progreso, F.. Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller, *55*(3), 201–210, 2009

Luna, R. Espinoza; S. Hinojosa Ruiz; G. A. R. (n.d.): Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, *55*.

Son, T. V.; Truong, V. V.; Do, P. A.; Haché, A.: (2016). Ultra-thin, single-layer polarization rotator. *AIP Advances*, *6*(8). https://doi.org/10.1063/1.4960552

P. Wang; Q Chen; G. Q. W. R. K. Gu: Polarimetric Image Discrimination with Depolarization Mueller Matrix, *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, n° 6, pp. 1-14, 2016.

E. Hecht: *Optics,* «8.13 A Matemátical Description of polarization, pp. 374-379, 2002, New York, Boston, San Francisco..., Addison Wesley.

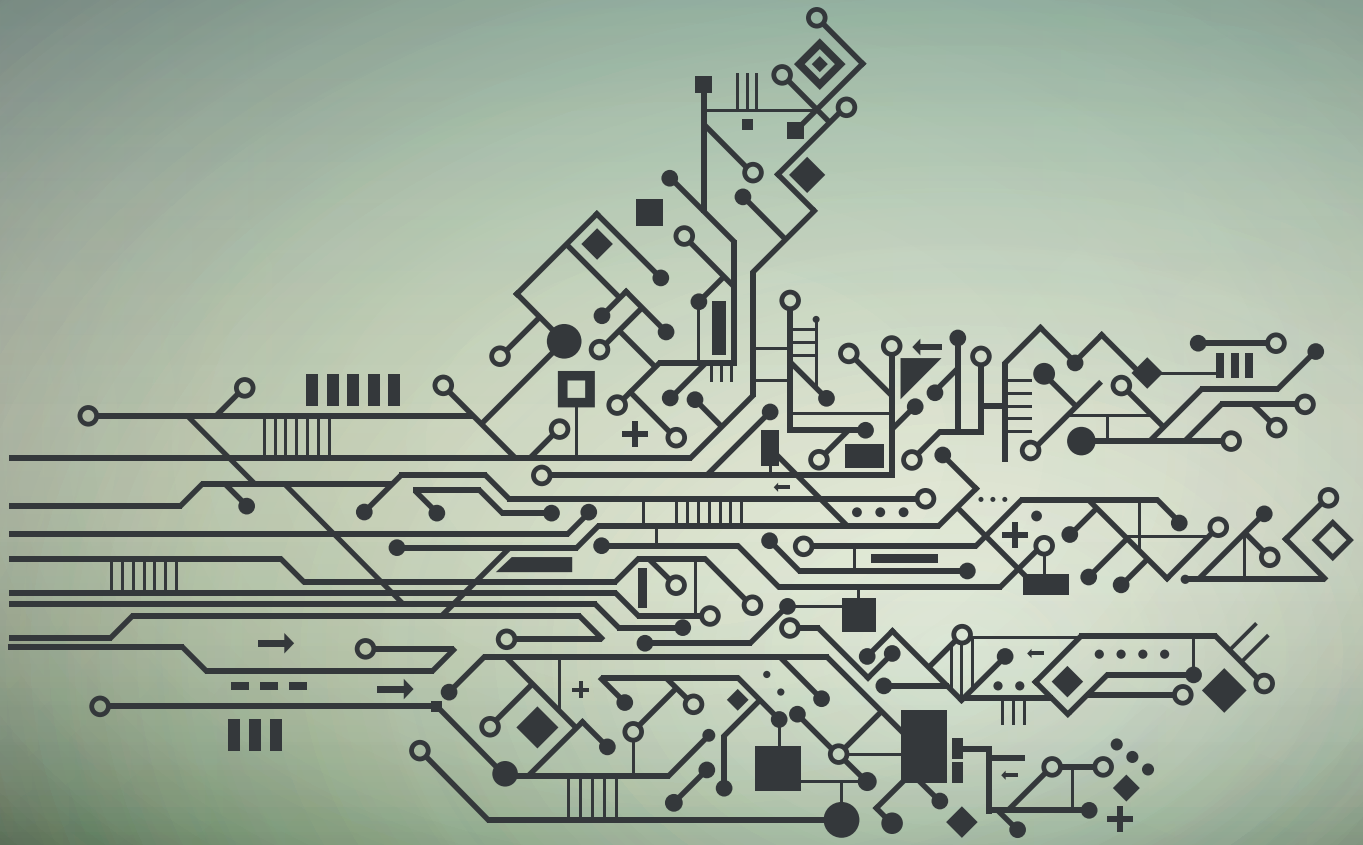
D. B. Sibujin, *Curso de Física General, T4* Análisis de la luz polarizada, pp. 472-480, 1985, Moscú, Ed. Nauka.

S. Yuheng; Y. Hao: «Image Segmentation Algorithms Overview,» vol. 1, pp. 1-6, 2017.

A. N. Zaidel; Y. I. Ostrovsky ; G. V. Ostrovskaya,: *TÉCNICA Y PRÁCTICA DE ESPECTROSCOPÍA*, Enfoque del aparato espectral, pp. 207-217, Moscú, 1979, Ed. Mir.

Vargas, G.; Neira, O.; Arango, R.; Fernando, D.:. Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales Cloud segmentation methods applied to satellite images. *Tecnura*, *17*(36), 96–110, 2013.

# Energy,
# Environmental engineering



# Viabilidad de Mezclas Supercríticas en Ciclos Brayton Acoplados a Plantas de Energía Solar Concentrada

**Paul Tafur-Escanta[1], Luis Coco-Enríquez[1] y Javier Muñoz-Antón[1]**
[1] Universidad Politécnica de Madrid. C/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006, Madrid, España

*[1]pm.tafur@alumnos.upm.es, [2]luiscocoenriquez@hotmail.com, [3]jamunoz@etsii.upm.es*

## RESUMEN

En este trabajo se promueve estudiar la viabilidad del uso de mezclas basadas en $CO_2$ supercrítico que pueda conducir a rendimientos térmicos en los ciclos Brayton más altos que los obtenidos con el fluido estándar (s-$CO_2$ puro). Las configuraciones que se recomienda analizar son las de Recompresión y Recompresión con enfriamiento intermedio en el compresor principal que pueden incluir más de un recalentamiento. Estas configuraciones son muy transcendentales debido a que en términos de eficiencia son las que mayores valores presentan dependiendo de las conductancias de los recuperadores de calor pueden alcanzar eficiencias de entre 47% y 53%, sin embargo, cuando se añaden caídas de presión en los componentes del ciclo las eficiencias disminuyen a valores de entre 44% y 50% cuando su fluido de trabajo es s-$CO_2$ puro, además, los costos totales por capacidad neta instalada son los más bajos en comparación con otras configuraciones.

Palabras Clave: $CO_2$ supercrítico, energía solar concentrada, planta termosolar, mezclas binarias

## Introducción

El mercado mundial de la energía ha ido cambiando progresivamente en los últimos años. Esto se puede explicar con distintos hechos, siendo los más destacados la creciente preocupación por el medio ambiente y el cambio climático, el incremento del coste de los combustibles fósiles y su agotamiento y el desarrollo de nuevas tecnologías renovables cada vez más competitivas. Se puede ver, desde el punto de vista del análisis estadístico, que en el período 2010-2020 se ha producido una gran revolución en las tecnologías renovables. De hecho, ha habido más instalaciones de este tipo que no renovables desde 2013, alcanzando 1/3 de la capacidad instalada total en todo el mundo. [1]

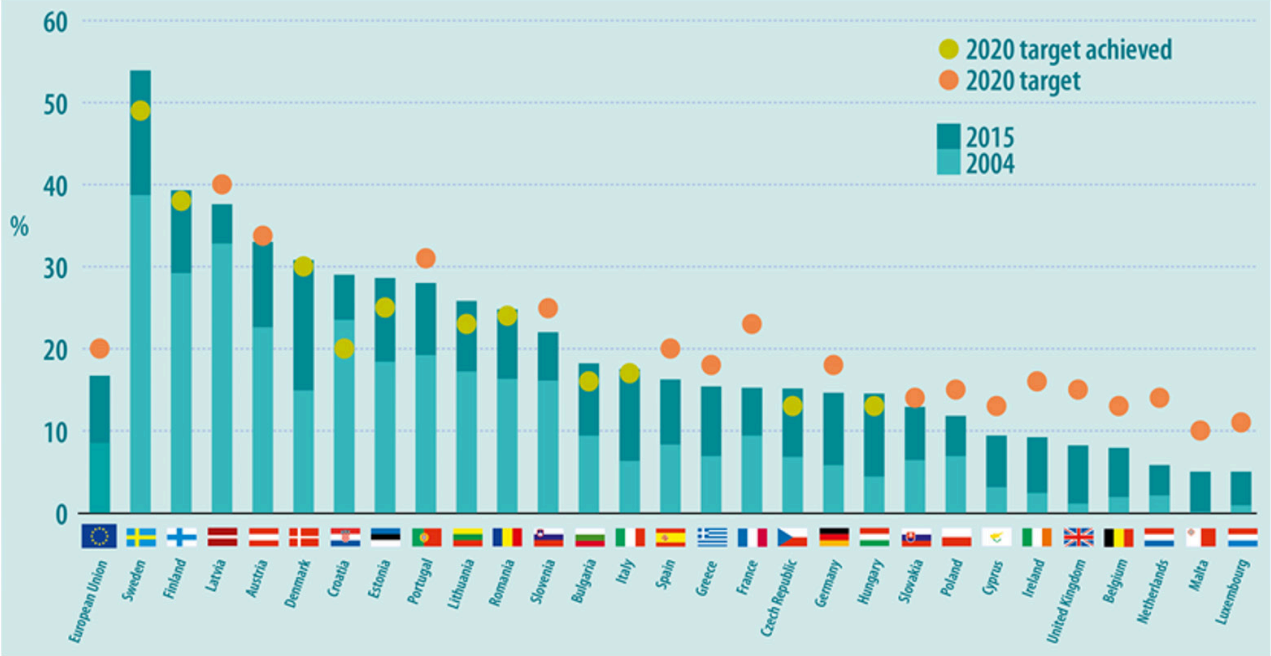



*Fig. 1. Proporción de energía procedente de fuentes renovables en los Estados miembros de la UE en porcentaje del consumo energético final bruto. [1]*

El futuro del mercado energético plantea una nueva situación en la que una cantidad razonable de plantas de generación no es manejable, por lo que su suministro depende de factores externos, principalmente climáticos. Este es el caso de las dos tecnologías con mayor crecimiento en los últimos años: los parques eólicos y los campos solares, cuya producción depende de la intensidad del viento y de la irradiación solar respectivamente. Actualmente, las redes eléctricas gestionan la ratio generación – consumo mediante la regulación de la producción de las centrales para adecuarlo a la curva de demanda. Sin embargo, si la participación renovable continúa aumentando (Fig. 1.), la capacidad de gestión de los reguladores de la red disminuye hasta volverse insuficiente.

La industria de generación de energía se ve en gran medida influenciada por el incremento significativo de plantas de energía renovables en los últimos años y la creciente demanda de energía en el mundo, especialmente la electricidad, sumado a las preocupaciones sobre el medio ambiente requieren fuentes de energía más ecológicas y sostenibles, así como sistemas de conversión de energía con mayor eficiencia [2].

Las energías renovables tienen un papel importante en la generación de energía eléctrica y unas de las más desarrolladas actualmente (energía solar fotovoltaica y eólica) tienen la limitación de la intermitencia, lo que conduce a sistemas de respaldo con combustibles fósiles. Uno de los mayores desafíos que enfrenta el mundo en este momento es poder sustituir progresivamente el uso de energía fósil por energías más limpias en las plantas de generación de energía eléctrica.

El problema de la intermitencia se puede afrontar mediante el uso de sistemas de almacenamiento de energía en las plantas, siendo el almacenamiento de energía solar térmica (TES), utilizado en las plantas de energía solar concentrada (CSP), una de las tecnologías más prometedoras. Estas plantas enfrentan varios desafíos, incluidos los altos costos de generación actuales, pero las ventajas de los TES los convierten en una alternativa competente en un escenario energético futuro que evita el calentamiento global. De esta manera, dentro de las nuevas investigaciones existe una Hoja de Ruta de Demostración de Energía Solar Gen3 del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) [3] que se ha centrado en la tecnología de Torre Central (SPT) con tres posibles caminos para el sistema de almacenamiento, el primero y más difundido, el de sales fundidas, y los que se encuentran en estudios son los de partículas y la fase gaseosa, donde el mayor desafío es no sobrepasar los costes fijados (Fig. 2.). Para todas estas vías, la Hoja de Ruta propone el ciclo de potencia Brayton de $CO_2$ supercrítico (s-$CO_2$).

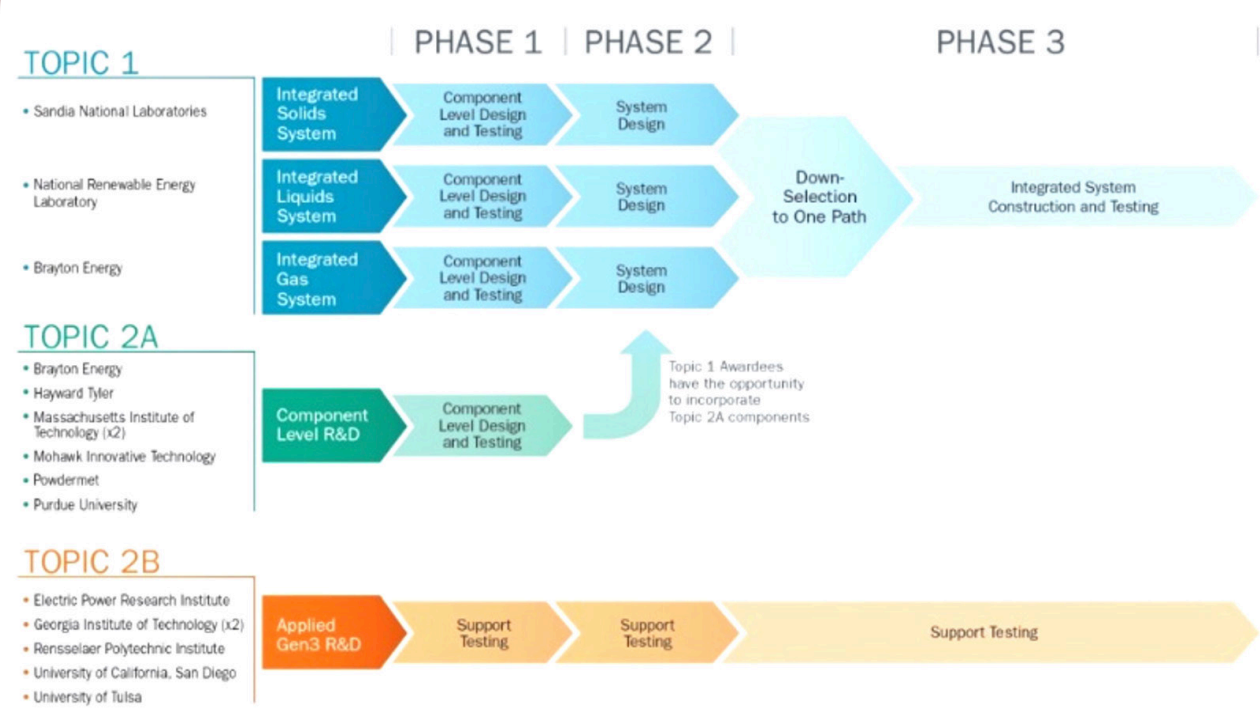



*Fig. 2. Programa de investigación de CSP Gen3. Departamento de Energía de EE.UU. (DOE).*

La concentración de energía solar típica aplicada en plantas de generación de energía enfoca el flujo solar diluido en un área pequeña a través del espejo óptico de diseño sofisticado. El área pequeña se conoce como un receptor donde el fluido de transferencia de calor (HTF) absorbe la radiación y finalmente transfiere la energía al vapor.

La CSP se distingue por poder entregar energía en participación de un almacenamiento de energía térmica (TES) de forma rentable y se caracteriza por la versatilidad en capacidad de salida. Su capacidad acumulativa global real y proyectada ha estado ganando impulso en los últimos años, siendo así que, se requieren 20 GWe de nueva capacidad por año a nivel mundial hasta 2050 para satisfacer los objetivos internacionales de política energética según los expertos de la EIA [4]. Con el apoyo adecuado, para 2050, CSP podría proporcionar 9.6% de la electricidad global solo de energía solar.

Es por ello que se han construido plantas de energía solar de gran capacidad como lo indica un informe del NREL, donde se menciona como ejemplos, el Proyecto de Energía Solar Crescent Dunes con una potencia de 110 MW y El Sistema de Generación Eléctrica Solar Ivanpah con una potencia de 392 MW en EE.UU., El Proyecto Solar Supcon con una potencia de 50MW en China y Proyecto Noor III de 150 MW de potencia en Marruecos [5].

Sin embargo, las plantas de energía solar que se han construido o que están en vía de desarrollo son principalmente impulsadas por ciclos de vapor sobrecalentado o vapor saturado (Rankine) con una eficiencia térmica relativamente baja y diseños complejos que impiden la electricidad solar tenga una reducción de LCOE (Levelized Cost of Energy) o costo ponderado de energía. En otras palabras, estas plantas de última generación no pueden competir con las que usan combustibles fósiles convencionales en términos de costes [6].

Los ciclos de potencia Brayton de $CO_2$ supercrítico (s-$CO_2$) han sido considerados ampliamente como una alternativa prometedora para la generación de energía debido a su alta eficiencia, diseño simple, compacidad y economía, también que operan con niveles de temperatura intermedios: energía solar concentrada (CSP) [7,8], recuperación de calor residual [9,10], centrales eléctricas de carbón [11–12] y reactores nucleares Gen IV [13–15] entre otros.

En comparación con el ciclo Rankine, el ciclo Brayton de s-$CO_2$ permite lograr mejores eficiencias a temperaturas más bajas y presenta menores costos operativos y de capital ya que el s-$CO_2$ es varias veces más denso que el vapor. Esta característica permite operar con componentes compactos y simples que también requerirían menos mantenimiento. Además, térmicamente se adapta de mejor manera a las variaciones de temperatura del fluido de trabajo y su fuente de calor y, a su vez, logra una mayor eficiencia de la segunda ley (exergía), es decir, una mejor utilización del calor.

Por estas razones, se están analizando varias configuraciones simplificadas o más complejas de los ciclos de potencia de s-$CO_2$ para la aplicación de conversión de calor a potencia de alto grado [16]. En general, existen principalmente dos métodos para mejorar la eficiencia del ciclo Brayton s-$CO_2$. Uno de ellos es proponer el diseño de nuevos ciclos novedosos y se han investigado exhaustivamente en un reactor nuclear y una planta de energía solar térmica. Otro es usar una mezcla binaria adecuada basada en s-$CO_2$ como fluido de trabajo en lugar de s-$CO_2$ puro que se aplica principalmente en las centrales nucleares. La capacidad de conseguir una alta eficiencia en diversas aplicaciones con valores intermedios de temperatura hace que este ciclo se vuelva muy interesante y se proponga como objeto de estudio. La idea de combinar ciclos de potencia de s-$CO_2$ con CSP se ha identificado teóricamente viable. Se estima que se logra una reducción del 8% de LCOE al reemplazar el ciclo de vapor – Rankine con un bloque de potencia de s-$CO_2$ en plantas de torre central con sales fundidas como fluido de trabajo ya existente [17 – 19].

El trabajo realizado por Al-Sulaiman et al. (2015), determina que el ciclo de recompresión muestra un mejor rendimiento en comparación con otras configuraciones: simple, pre-compresión y expansión dividida. Mientras que, en el estudio de Marchionni et al. (2018), éste analiza ocho variantes del ciclo de potencia s-$CO_2$. Las métricas de energía, proceso y costo para diferentes diseños de ciclo se comparan al variar la temperatura a la entrada de la turbina (TIT) en el rango entre 250 °C y 600°C. El análisis realizado demuestra que las configuraciones del ciclo Brayton de s-$CO_2$ más complejas conducen a una mayor eficiencia general y a una mayor producción neta de potencia, pero también a mayores costos de inversión (Fig. 3). Por el contrario, las arquitecturas más básicas, como el ciclo regenerativo simple, con un TIT de 425 °C, podrían lograr una eficiencia general del aproximadamente un 25 %, una potencia de salida de alrededor de 94 kWe y un período de recuperación bajo, menor a dos años. [16]

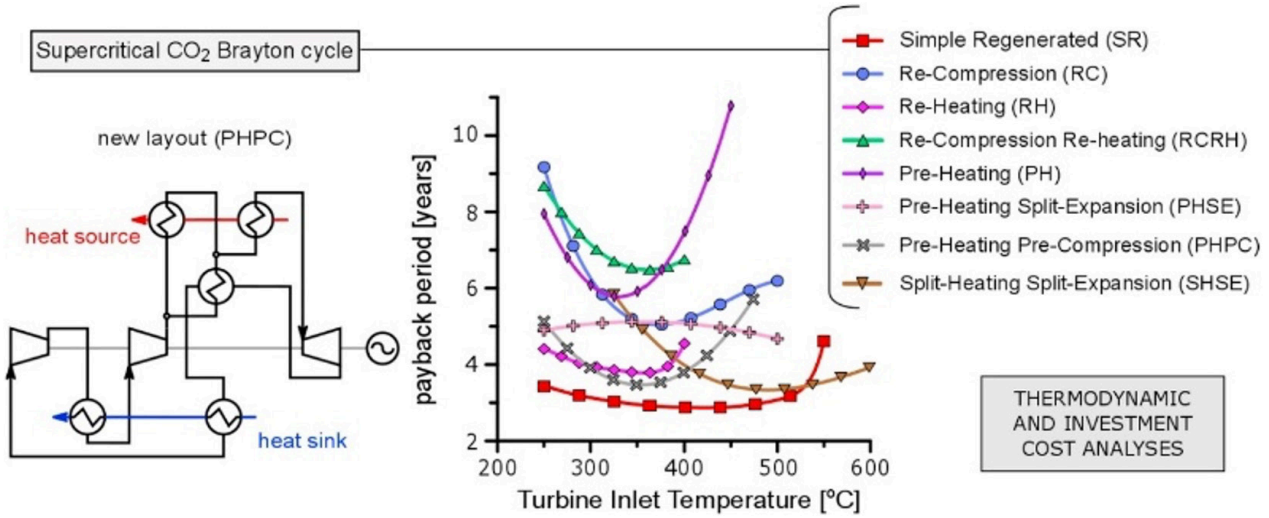



*Fig. 3. Configuraciones de Ciclos de Potencia s-CO2. PayBack vs. Temperatura de entrada a la turbina.*

Neises, T., y Turchi, C. (2019), realizan un estudio del diseño, rendimiento y coste de las configuraciones simples de recompresión y de enfriamiento parcial del ciclo de potencia de dióxido de carbono supercrítico integrado con una Torre Central de sales fundidas como fluido de transferencia de calor. En dicho estudio utilizan un modelo de estado estable para diseñar cada ciclo con cantidades variables de conductancia del recuperador para comprender el rendimiento y las compensaciones de costos. Donde se concluye que, el LCOE mínimo del ciclo de enfriamiento parcial es aproximadamente 6.2% menor que el LCOE mínimo del ciclo simple de recompresión. Existen algunas ventajas con el ciclo con enfriamiento parcial. La más importante es que al tener una diferencia de temperatura más grande en el intercambiador de calor primario (PHX) hace que se tenga diferencial de temperatura más grande en TES, lo que favorece al sistema de almacenamiento de energía porque se tendría un menor coste, y, por tanto, un menor coste en la instalación. Es conveniente tener una temperatura de trabajo más fría en ciclo de enfriamiento parcial ya que se ha comprobado que se minimizan las pérdidas térmicas. Finalmente, cuando mayor sea la diferencia de temperatura, se va a tener un menor caudal másico del HTF, lo que nos llevaría a un menor consumo de electricidad en la bomba.

En el estudio de [18], proponen varias configuraciones nuevas de ciclo de s-CO2 Brayton con recompresión para plantas solares de torre central (Fig. 4.). En donde el ciclo propuesto se suministra la energía térmica por del lado de baja presión con parámetros de 85 bar en la entrada principal de calor y menos de 200 bar en la entrada del recalentamiento, lo que permite utilizar los intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos donde circula la sal fundida. En los dos escenarios que propone, enfriamiento seco y enfriamiento húmedo, demuestra que, en el primero, se logra la mayor eficiencia en la recompresión con diseño de enfriamiento y recalentamiento, alcanzando un valor de 52.6% a 300 bar de presión de entrada de la turbina. Mientras que, en el escenario de enfriamiento húmedo, el ciclo de recompresión sin intercooler y no recalentado supera el 51% de eficiencia a 250 bar, aumentando a más del 54% si se agrega el recalentamiento. Además, concluye que, si la eficiencia del ciclo al 50% se establece como un objetivo para las plantas solares avanzadas, la recompresión en el escenario de enfriamiento húmedo podría ser considerado como el primer prototipo en probar en esta nueva tecnología.

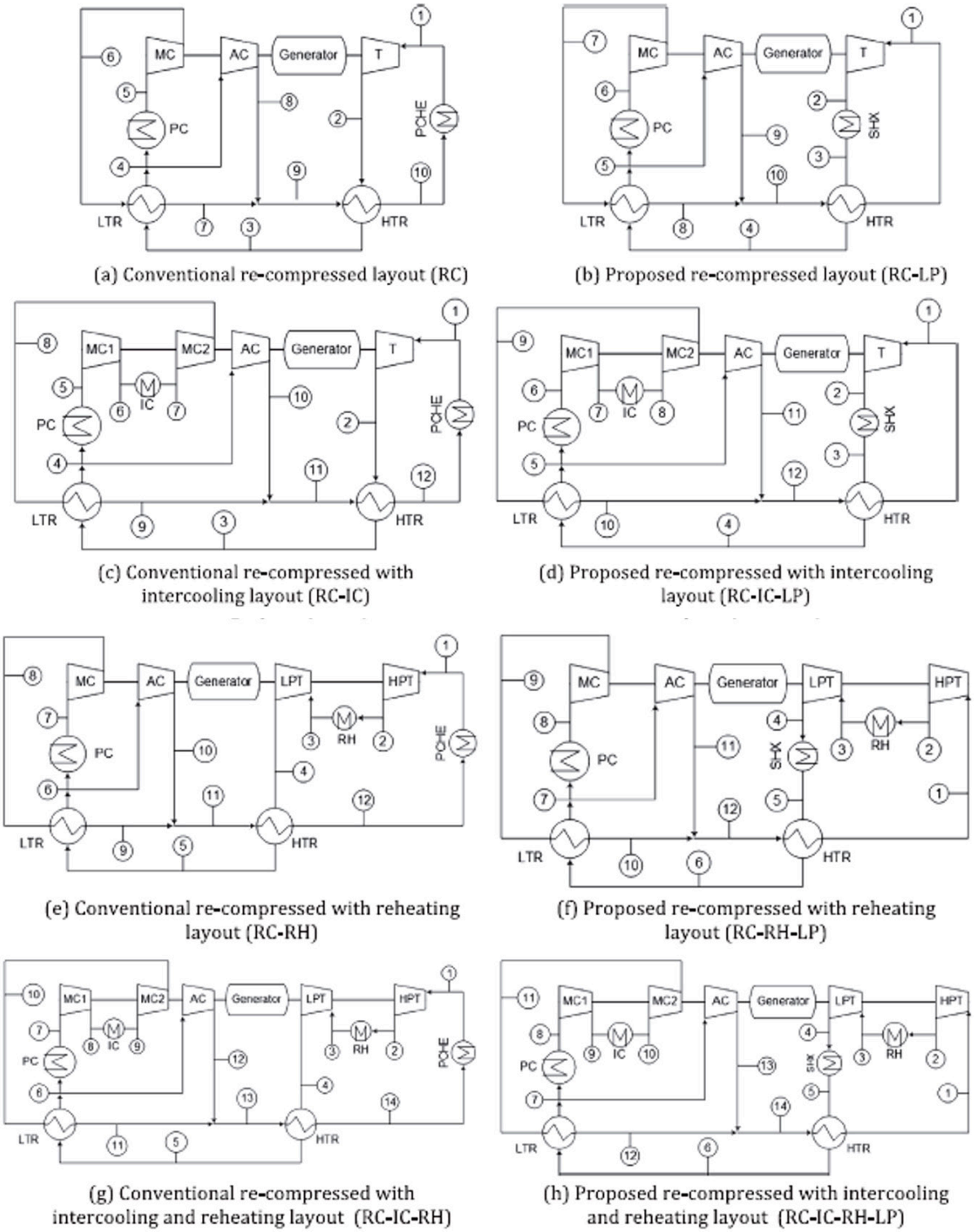



*Fig. 4. Diseños analizados a, c, e, g convencionales y b, d, f, h propuestos [18]*

Posteriormente afirma que los ciclos propuestos, (Fig. 4.) tienden a aprovechar una presión de entrada de la turbina más alta con lo cual logran aumentar el trabajo del ciclo específico, compensando así la temperatura de entrada de la turbina más baja. Y que, además, la reducción en la presión de trabajo de los intercambiadores de calor utilizados en el estudio permiten disminuir significativamente el coste logrando una mayor compacidad, es decir, una mejor respuesta dinámica y menores inversiones, manteniendo la eficiencia [18].

Finalmente, [19], estudia la influencia de las mezclas de fluidos a base de dióxido de carbono en un ciclo Brayton s-$CO_2$ con una configuración de recompresión, este ciclo es la evolución de una configuración anterior propuesta por Angelino et al. (1968), que también fueron estudiadas por Crespi et al. (2017) y Coco - Enríquez (2017). En la investigación [19] los autores señalan varias conclusiones, primero, existen dos grupos A y B: "A" son mezclas que disminuyen la temperatura crítica, en las que se incluye s-$CO_2$/He, s-$CO_2$/Kr, s-$CO_2$/$CH_4$ y s-$CO_2$/$C_2H_6$ y "B" son mezclas que aumentan la temperatura crítica, s-$CO_2$/$H_2S$, s-$CO_2$/$C_3H_8$, s-$CO_2$/$C_4H_{10}$, s-$CO_2$/$C_5H_{10}$, s-$CO_2$/$C_5H_{12}$, entre otros. Y, segundo, que en el caso de las mezclas de grupo A la eficiencia del ciclo es máxima cuando el ciclo funciona con una temperatura a la entrada del compresor (CIT) y presión a la entrada del compresor (CIP) cercano al punto crítico. Cuando se realiza la comparación entre el ciclo con s-$CO_2$ puro y usando mezclas del grupo A, se observa que en este último las eficiencias aumentan aproximadamente un 4%.

Mientras que si se compara el ciclo con s-$CO_2$ puro y las mezclas del grupo B, se puede observar que la eficiencia del ciclo disminuye cuando funciona con CIT y CIP justo por encima del punto crítico. Sin embargo, la eficiencia del ciclo solamente mejora en aproximadamente 3 a 4%, cuando el CIP se encuentra justo por encima de la presión crítica y CIT = 318.15 K.

Como indica la literatura, se han analizado diferentes configuraciones de ciclos de potencia para CSP, además se conoce que tanto las mezclas que disminuyen como las que aumentan la temperatura crítica incrementan la eficiencia del ciclo de potencia Brayton s-$CO_2$. Siguiendo esta tendencia, es importante seguir realizando estudios de las diferentes mezclas a base de s-$CO_2$ en varios ciclos de potencia Brayton, lo cual nos conducirá a poder encontrar una o varias substancias y una o varias configuraciones que maximicen la eficiencia, que reduzcan costes de generación de energía eléctrica y que, además, puedan ser aplicadas a la industria de las plantas de CSP.

## Fundamento Teórico

El software denominado SCSP (Planta de Energía Solar Concentrada Supercrítica) se puede considerar como un potente simulador del rendimiento de distintas configuraciones simples y complejas de ciclos de potencia Brayton utilizando mezclas binarias, ternarias y cuaternarias a base de dióxido de carbono y el fluido estándar (s-$CO_2$ puro). Este programa ha sido desarrollado por miembros del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de Madrid [17] y su núcleo se basa en el software desarrollado por J. Dyreby (2014), en su tesis doctoral: Modeling the supercritical carbon dioxide Brayton cycle with recompression [21]. Este programa tiene desarrollado un código Fortran donde se incluye configuraciones innovadoras que cuentan con recalentamientos en las etapas intermedias de expansión en la turbina. Se incluye también el dimensionamiento en detalle de los recuperadores y los intercambiadores de calor. Estas configuraciones de ciclos Brayton están acopladas a modelos de campo solar con colectores lineales Cilindro Parabólicos (PTC) y Lineales de Fresnel (LF), y con diferentes fluidos de transferencia de calor (HTF) como sales fundidas, aceites térmicos y DSG. SCSP establece una conductancia total del recuperador de calor constante como metodología de cálculo del rendimiento y utiliza algoritmos para la optimización de los parámetros de operación del ciclo (SUBPLEX, NEWUOA y BOBYQA) con el objetivo de maximizar el rendimiento térmico del ciclo. Una vez establecido el valor de la conductancia se pueden variar parámetros importantes para el estudio y análisis de la eficiencia térmica como la temperatura a la entrada del

compresor y la turbina, presión a la entrada del compresor y turbina, presiones intermedias y de recalentamiento, eficiencias isentrópicas de los compresor y turbinas, y, además las caídas de presión en los diferentes componentes del ciclo. Las propiedades de los fluidos se obtienen de la Base de datos de propiedades de transporte y termodinámica de fluidos de referencia (REFPROP) desarrollada por NIST en los EE. UU. [21]. La Fig. 5 muestra el proceso de iteración para los modelos de los ciclos integrados en el software SCSP.

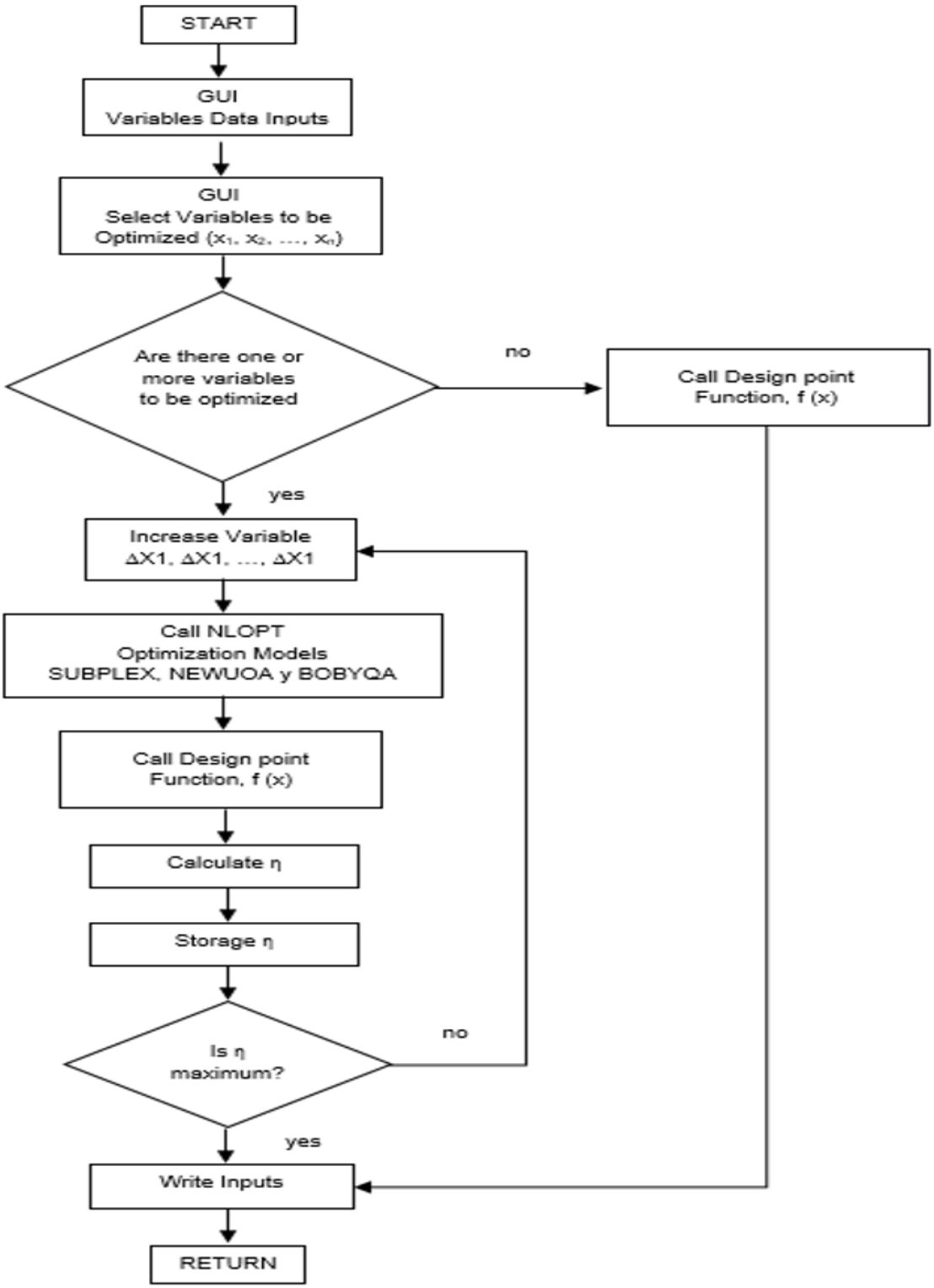



*Fig. 5. Proceso de iteración para los modelos de ciclos integrados en el software SCSP. [19]*

## Resultados y Validación del Software SCSP

Para validar los diferentes ciclos que tiene configurado este simulador SCSP se utiliza el software Thermoflex [22], en el cual se modela cada una de las configuraciones de ciclos de potencia Brayton. Como ejemplos en este caso se presenta la validación de las configuraciones de Recompresión con dos recalentamientos y Recompresión con enfriamiento intermedio en el compresor principal y con dos recalentamientos.

### Ciclo de Recompresión

Una vez modelado el ciclo en Thermoflex se obtienen los datos de temperatura, presión, entalpía y entropía en cada punto (Fig. 6.), para validar este último dato se toma en cuenta los valores de los dos primeros, temperatura (T) y presión (P), y mediante la función: *h=Enthalpy (Carbon Dioxide*, T=T, P=P) del software EES se obtiene las entalpías.

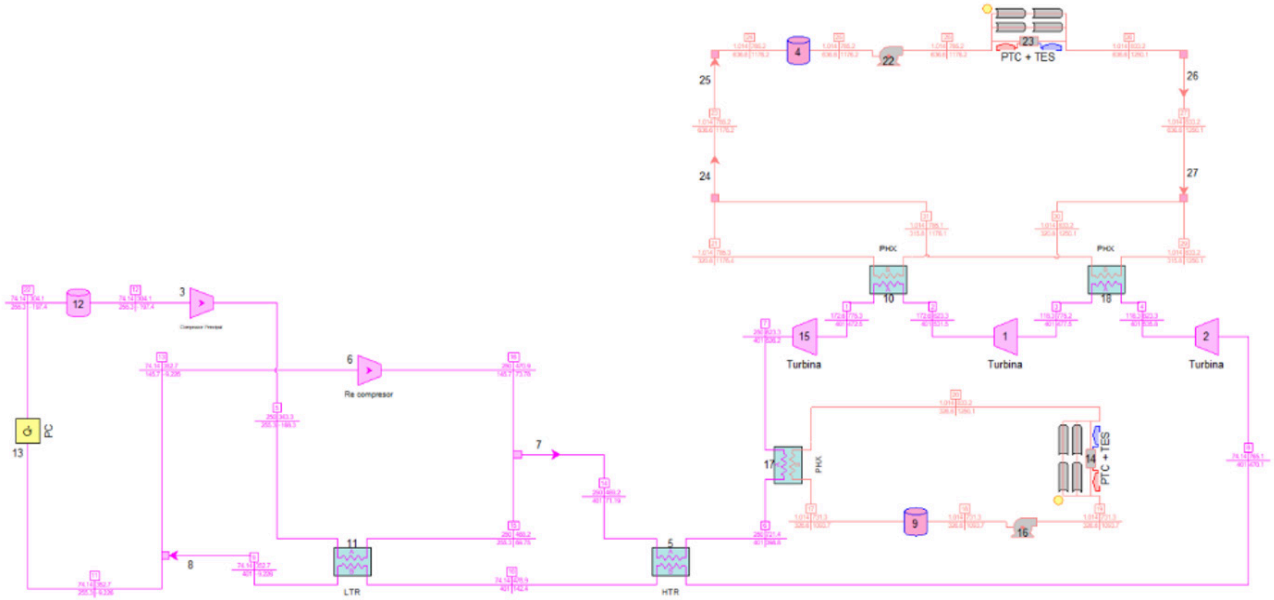



*Fig. 6. Esquema de la modelación del ciclo RCC con dos recalentamientos (UA 10MW/K) acoplado con CSP y TES*

Por tanto, para validar todos los datos se obtiene el rendimiento térmico del ciclo (RCC – 2RH) utilizando la siguiente formulación:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{Realizado}}{\dot{Q}_{Aportado}} \quad (1)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{MC} - \dot{W}_{RC}}{\dot{Q}_{PHX} + \dot{Q}_{RHX1} + \dot{Q}_{RHX2}} \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_T}{\dot{m}_T} * W_T - \frac{\dot{m}_{MC}}{\dot{m}_T} * W_{MC} - \frac{\dot{m}_{RC}}{\dot{m}_T} * W_{RC}\right)}{\frac{\dot{Q}_{PHX}}{\dot{m}_T} + \frac{\dot{Q}_{RHX1}}{\dot{m}_T} + \frac{\dot{Q}_{RHX2}}{\dot{m}_T}} \quad (3)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{T1} + W_{T2} + W_{T3} - (1-\gamma) * W_{MC} - \gamma * W_{RC}}{Q_{PHX} + Q_{RHX1} + Q_{RHX2}} \quad (4)$$

$$\eta_{th} = \frac{(h_6 - h_{11}) + (h_6 - h_{11}) + (h_{14} - h_7) - (1-\gamma) * (h_2 - h_1) - \gamma * (h_{10} - h_9)}{(h_6 - h_5) + (h_{12} - h_{11}) + (h_{14} - h_{13})} \quad (5)$$

Donde $\eta_{th}$ es el rendimiento térmico del ciclo, $\hat{W}_{Realizado}$ es el trabajo neto realizado por el ciclo, $Q_{Aportado}$ es el calor aportado hacia el ciclo, $\hat{W}_T$,$\hat{W}_{MC}$,$\hat{W}_{RC}$ son los trabajos de la turbina, compresor y recompresor respectivamente, $Q_{PHX}$,$Q_{RHX1}$,$Q_{RHX2}$ son los calores aportados por el intercambiador de calor primario e intercambiadores de calor de recalentamiento, $m_T$ es el flujo másico total que circula por el ciclo, $m_{MC}$ y $m_{RC}$ son los flujos másicos que se desvían al compresor principal y al recompresor respetivamente y $h_1$ a $h_{14}$ son las entalpías en cada uno de los puntos del ciclo. Siendo **γ** la fracción de mezcla que se desvía hacia recompresor con un valor de 0.3633. Con lo cual se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 1. Valores de eficiencia con los diferentes software**

| Software | SCSP | Thermoflex (Ecuación) | EES (Ecuación) | Error (SCSP - EES) |
|---|---|---|---|---|
| $\eta_{th}$ | 51.0822 % | 51.1341 % | 51.0788 % | 0.0066% |

Los valores obtenidos de la eficiencia térmica mostrados (Tabla 1.) demuestran que las configuraciones realizadas en el software SCSP (con $\eta_{th}$= 51.0822 %) quedan completamente validadas para realizar diferentes simulaciones con fluidos supercríticos como fluido de trabajo.

### Ciclo de Recompresión con enfriamiento intermedio en el compresor principal

Ocupando el criterio anterior, se realiza el modelado del ciclo RCMCI – RH (Fig. 7.) y se realiza el análisis propuesto en el apartado anterior para obtener los valores de eficiencia.

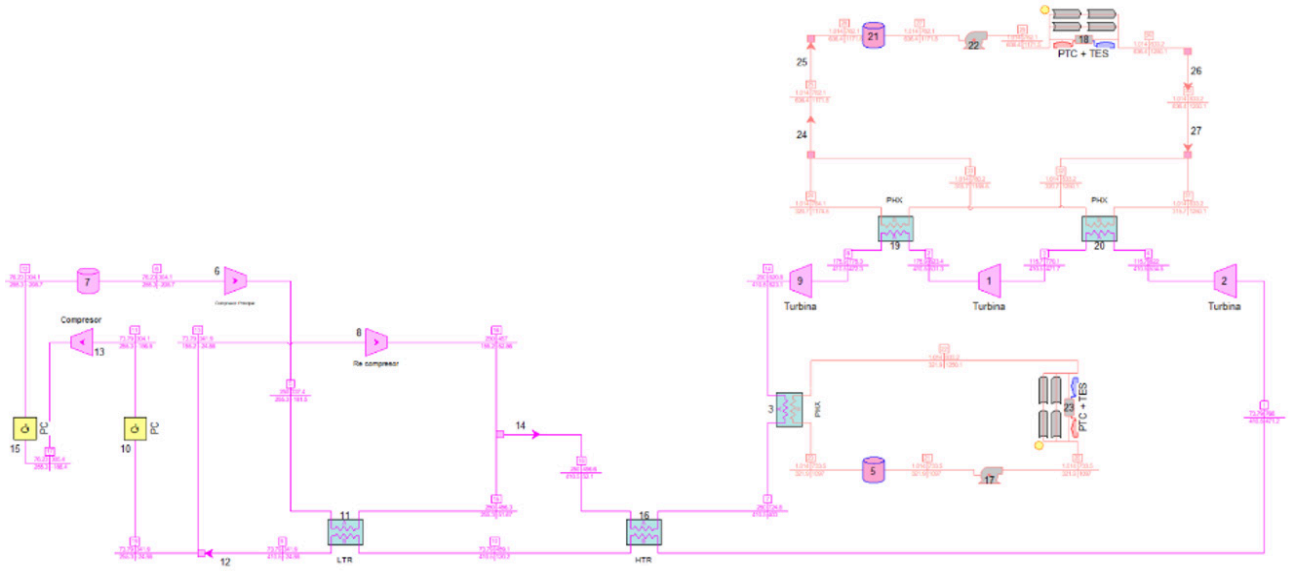



*Fig. 7. Esquema de la modelación del ciclo RCMCI con dos recalentamientos (UA 10MW/K) acoplado con CSP y TES*

Del mismo modo, para validar todos los datos se obtiene el rendimiento térmico del ciclo (RCC – 2RH) utilizando la siguiente formulación:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{Realizado}}{\dot{Q}_{Aportado}} \quad (6)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_C - \dot{W}_{MC} - \dot{W}_{RC}}{\dot{Q}_{PHX} + \dot{Q}_{RHX1} + \dot{Q}_{RHX2}} \quad (7)$$

$$\eta_{th} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_T}{\dot{m}_T} * W_T - \frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_T} * W_C - \frac{\dot{m}_{MC}}{\dot{m}_T} * W_{MC} - \frac{\dot{m}_{RC}}{\dot{m}_T} * W_{RC}\right)}{\frac{\dot{Q}_{PHX}}{\dot{m}_T} + \frac{\dot{Q}_{RHX1}}{\dot{m}_T} + \frac{\dot{Q}_{RHX2}}{\dot{m}_T}} \quad (8)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{T1} + W_{T2} + W_{T3} - (1-\gamma) * W_C - (1-\gamma) * W_{MC} - \gamma * W_{RC}}{Q_{PHX} + Q_{RHX1} + Q_{RHX2}} \quad (9)$$

$$\eta_{th} = \frac{(h_6 - h_{11}) + (h_{12} - h_{15}) + (h_{16} - h_7) - (1-\gamma) * (h_{14} - h_{13}) - (1-\gamma) * (h_2 - h_1) - \gamma * (h_{10} - h_9)}{(h_6 - h_5) + (h_{12} - h_{11}) + (h_{16} - h_{15})} \quad (10)$$

Siendo y la fracción de mezcla que se desvía hacia recompresor con un valor de 0.3776. Con lo cual se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 2. Valores de eficiencia con los diferentes software.**

| Software | SCSP | Thermoflex (Ecuación) | EES (Ecuación) | Error (SCSP - EES) |
|---|---|---|---|---|
| $\eta_{th}$ | 51.2484 % | 51.1627 % | 51.2351 % | 0.0260% |

De la misma manera, los valores obtenidos de la eficiencia térmica mostrados (Tabla 2.) demuestran que las configuraciones realizadas en el software SCSP (con $\eta_{th}$= 51.2484 %) quedan completamente validadas para realizar diferentes simulaciones con fluidos supercríticos como fluido de trabajo.

Por tanto, el estudio, análisis y simulación de la eficiencia térmica en los ciclos Brayton usando $CO_2$ supercrítico y mezclas binarias a base del fluido estándar (s-$CO_2$) como fluidos de trabajo se puede realizar ocupando el software SCSP. Dentro de las simulaciones en las diferentes configuraciones de ciclos de potencia se pueden considerar varios parámetros importantes para el análisis de la variación de eficiencia térmica como por ejemplo: la temperatura de entrada al compresor, presión a la entrada del compresor, temperatura de entrada a la turbina, presión a la entrada de la turbina, presión intermedia y a la entrada del recalentador, conductancia de los recuperadores de calor de baja y alta temperatura, fracción que se dirige al recompresor, caídas de presión en todos los componentes del ciclo y las eficiencias isentrópicas de la turbinas, compresor y recompresor.

Los usos de las mezclas deben logran mayores eficiencias para permitir una reducción drástica en el tamaño de la planta termosolar y, por lo tanto, en el costo del campo solar, que es el principal contribuyente a los costos de capital. También necesitan temperaturas de funcionamiento más altas para producir una reducción drástica del tamaño de la planta y, por tanto, del coste del sistema de almacenamiento. En este sentido el estudio de las mezclas a base de dióxido de carbono supercrítico se vuelve fundamental debido a que sus propiedades termofísicas y termoquímicas como la capacidad calorífica, viscosidad cinemática, conductividad térmica, nusselt, Reynolds, etc, permitirán una mejor comprensión de su comportamiento como fluido de trabajo en las diferentes configuraciones de ciclos de potencia.

## Conclusiones y trabajos futuros

Como principal conclusión se indica que las variaciones de las propiedades del fluido de trabajo tienen una incidencia directa positiva en los ciclos de potencia Brayton de CO2 supercríticos, dentro de estos ciclos las configuraciones que se encuentran en estudio son las de Recompresión y Recompresión con enfriamiento intermedio en el compresor principal ya que obtienen mejor eficiencia que otras configuraciones dependiendo de los parámetros de entrada como: temperatura ambiente, temperatura de entrada al compresor, temperatura de entrada a la turbina y la presión máxima del ciclo, entre otras.

Existen diferentes aspectos que se deben considerar al seleccionar una mezcla óptima, ya sea esta binaria, ternaria o cuaternaria. Las dimensiones de los componentes del ciclo se encuentran limitados por varios factores y uno de los principales es densidad del fluido de trabajo. Si la densidad aumenta, entonces los tamaños de los compresores y turbinas se minimizarán. Además, en el diseño de los Intercambiadores de Calor se deben tener en cuenta parámetros como: la conductividad térmica, la capacidad calorífica isobárica (Cp) y la viscosidad cinética. Se conoce que los coeficientes de transferencia de calor que se involucran en el sistema intercambiador de calor están relacionados con la viscosidad (dinámica y cinética), conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica isobárica. "Los valores más altos de Cp y densidad; y valores más bajos de viscosidad cinemática logran minimizar las dimensiones de los recuperadores de calor de baja y alta temperatura (LTR y HTR)".

Como se mencionó anteriormente, existen mezclas cuyas propiedades pueden ayudar a redistribuir el punto crítico, es decir aumentar o disminuir la temperatura crítica en comparación con la temperatura crítica del fluido estándar. Dichas mezclas a base de $CO_2$ supercrítico pueden llegar a aumentar la eficiencia en un 3 y 4 % dependiendo tanto de la temperatura ambiente en las que se encuentren trabajando, la temperatura de entrada al compresor y la temperatura de entrada a la turbina. También es importante analizar las pérdidas de presión en los componentes del sistema ya que las irreversibilidades causadas por estos puede tener repercusiones negativas en la eficiencia de cada una de las configuraciones de ciclos de potencia, es por ello que la comunidad científica y en sí nuestro trabajo futuro tiene en consideración todos estos parámetros para ser analizados y apuesta por el estudio de estos fluidos de trabajo en ciclos Brayton que cuentan con diferentes configuraciones como simple, recompresión, recompresión con enfriamiento intermedio en el compresor principal y recompresión con enfriamiento parcial; y que se encuentran acoplados a plantas de energía solar concentrada.

## Referencias

Euroheat & Power. 2020. Share of Renewables in EU Energy Consumption Reached 17% In 2016 | Euroheat & Power. [online] Available at: <https://www.euroheat.org/news/share-renewables-energy-consumption-eu-reached-17-2016/>. Accedido el 26 Marzo de 2021].

Löffler, K., Burandt, T., Hainsch, K., & Oei, P. Y. Modeling the low-carbon transition of the European energy system-A quantitative assessment of the stranded assets problem. Energy Strategy Reviews, 26, 100422. (2019)

Mehos, M., Turchi, C., Vidal, J., Wagner, M., Ma, Z., Ho, C., ... & Kruizenga, A. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap (No. NREL/TP-5500-67464). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). (2017). https://doi.org/10.2172/1338899

https://solarpaces.nrel.gov/.

Yin, J. M., Zheng, Q. Y., Peng, Z. R., & Zhang, X. R. Review of supercritical CO2 power cycles integrated with CSP. International Journal of Energy Research. (2019).

Turchi, C. 10 MW Supercritical CO2 Turbine Test (No. DE-EE0002589). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). (2014).

Zhu, H. H., Wang, K., & He, Y. L. Thermodynamic analysis and comparison for different direct-heated supercritical CO2 Brayton cycles integrated into a solar thermal power tower system. Energy, 140, 144-157, (2017).

Ma, Z., & Turchi, C. S. Advanced supercritical carbon dioxide power cycle configurations for use in concentrating solar power systems (No. NREL/CP-5500-50787). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States). (2011).

Manente, G., & Lazzaretto, A. Innovative biomass to power conversion systems based on cascaded supercritical CO2 Brayton cycles. Biomass and Bioenergy, 69, 155-168, (2014).

Wu, C., Yin, X., Ma, L., Zhou, Z., & Chen, H. Design and operation of a 5.5 MWe biomass integrated gasification combined cycle demonstration plant. Energy & fuels, 22(6), 4259-4264, (2008).

Mecheri, M.; Le, Y. Supercritical CO2 Brayton Cycles for Coal- Fired Power Plants. Energy 2016, 103, 758–771. [CrossRef]

Park, S., Kim, J., Yoon, M., Rhim, D., & Yeom, C. Thermodynamic and economic investigation of coal-fired power plant combined with various supercritical CO2 Brayton power cycle. Applied Thermal Engineering, 130, 611-623, (2018).

Li, M. J., Zhu, H. H., Guo, J. Q., Wang, K., & Tao, W. Q. The development technology and applications of supercritical CO2 power cycle in nuclear energy, solar energy and other energy industries. Applied Thermal Engineering, 126, 255-275, (2017).

Li, M. J., Jie, Y. J., Zhu, H. H., Qi, G. J., & Li, M. J. The thermodynamic and cost-benefit-analysis of miniaturized lead-cooled fast reactor with supercritical CO2 power cycle in the commercial market. Progress in Nuclear Energy, 103, 135-150, (2018).

Qi, H., Gui, N., Yang, X., Tu, J., & Jiang, S. The application of supercritical CO2 in nuclear engineering: A review. The Journal of Computational Multiphase Flows, 10(4), 149-158, (2018).

Crespi, F., Gavagnin, G., Sánchez, D., & Martínez, G. S. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review. Applied Energy, 195, 152-183, (2017).

Enriquez, L. C. (2017). Nueva generación de centrales termosolares con colectores solares lineales acoplados a ciclos supercríticos de potencia (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

Linares, J. I., Montes, M. J., Cantizano, A., & Sánchez, C. A novel supercritical CO2 recompression Brayton power cycle for power tower concentrating solar plants. Applied Energy, 263, 114644, (2020).

Valencia-Chapi, R., Coco-Enríquez, L., & Muñoz-Antón, J. Supercritical CO2 Mixtures for Advanced Brayton Power Cycles in Line-Focusing Solar Power Plants. Applied Sciences, 10(1), 55, (2020).

E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, and M. O. McLinden, "NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0", 2018.

Dyreby, J. J. (2014). Modeling the supercritical carbon dioxide Brayton cycle with recompression (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Madison).

Thermoflow Software manual. https://www.thermoflow.com/

# Bioengineering

# SCIENCE LAB

# Estimulación de motricidad fina con un videojuego en un paciente con hemiparesia izquierda

**Fabricio Tipantocta[1], Flor Tipan[1], Edison Coral[1], Gladys Herrera[1], Geovanny Pacheco[1]**
[1] Carrera en Electrónica Industrial, Instituto Superior Tecnológico Sucre,
Teodoro Gómez de la Torre, S14-72. 170148 Quito, Ecuador

[1]*{ftipantocta, ftipan, ecoral, gherrera, gpacheco}@tecnologicosucre.edu.ec*

## RESUMEN

El objetivo del proyecto es realizar un videojuego, adaptando un sistema electrónico en el brazo a un paciente con hemiparesia, y así estimular la motricidad fina en su extremidad superior izquierda lo que aporta a su rehabilitación. Se realizaron varios experimentos tomando datos de funcionamiento como son el número de puntos del jugador obtenidos en varias pruebas y se ejecutó el análisis de movimiento en la extremidad afectada tanto en brazo como muñeca. Como resultado se observa el trabajo realizado por el brazo izquierdo del paciente, a través del análisis de video se examina el resultado de flexo extensión de la biomecánica del miembro a rehabilitar, cumpliendo así el objetivo del proyecto. El videojuego, al ser amigable por el ambiente de fantasía incentiva el interés del paciente con hemiparesia izquierda, haciendo que a este le agrade jugar con el sistema, obteniendo así un gusto por mover el brazo afectado y creando así nuevos caminos neuronales para el movimiento y estimulación de su motricidad fina.

**Palabras Clave:** Videojuego, Biomecánica, Hemiparesia, Análisis de Movimiento.

## Introducción

La hemiparesia es definida como la debilidad o parálisis parcial de un lado del cuerpo y es provocado por un daño cerebral como por ejemplo un traumatismo craneocefálico (TCE) o insuficiente oxígeno al nacer y puede adquirir trastornos motores, sensoriales, conductuales e intelectuales.[1][2] Para este proyecto se tomó en cuenta un niño de 6 años con hemiparesia izquierda, quien después de haber recibido un golpe en la cabeza al nacer produjo un coagulo de sangre lo cual originó dicha patología, el neurólogo de cabecera quien sigue con detenimiento el caso explica que esto ha ocasionado la imposibilidad en cuanto a la motricidad en las extremidades del lado izquierdo de forma parcial.

El proceso de rehabilitación depende del nivel de afectación en el sistema nervioso del paciente. Siempre que sea posible, los pacientes requieren una amplia variedad de servicios profesionales que demandan gran coordinación y esfuerzo con el fin de obtener los mejores resultados. [3][4] En el caso del paciente escogido, ha pasado por una serie de terapias para mejorar su condición física, pero en la actualidad únicamente asiste al programa de rehabilitación ocupacional donde se hace énfasis en la realización de tareas y actividades importantes en la vida diaria.

Existen diferentes técnicas en la rehabilitación ocupacional, una de ellas es el sistema "Mirror-Neuron". Esta técnica hace referencia a la estimulación del sistema nervioso en base al trabajo de aprendizaje por reflejo, el cual por medio de observación de actividades pretende que la persona afectada realice los mismos movimientos en brazos y piernas. [5][6] Tomando en cuenta este método de rehabilitación, y observando la preferencia del paciente por la tecnología digital como teléfonos celulares, tablets y televisión, se ideo la forma de que el paciente con hemiparesia, estimule el sistema motor del brazo izquierdo mediante la realización de un videojuego.[7]

El objetivo del proyecto es realizar un videojuego, adaptando un sistema electrónico en el brazo a un paciente con hemiparesia, para estimular la motricidad fina en su extremidad superior izquierdo ayudando a su rehabilitación.

## Metodología

La metodología de esta investigación es aplicada y como técnica la experimentación, pues es necesario incluir sistemas electrónicos que permita enviar información inalámbrica y sistemas informáticos que puedan recibirlos, también el análisis teórico en biomecánica para orientar el resultado esperado para la realización del proyecto. En los siguientes apartados se explica cómo se realiza el proyecto.

### Biomecánica de brazo

De las características de la hemiparesia, se desarrolla una disminución del tono muscular en el hemicuerpo afectado [8], que para el caso de análisis es el brazo izquierdo del paciente. Otra característica en casos severos es la espasticidad que afecta a ciertas cadenas musculares como los flexores del brazo, el cual presenta un patrón típico de aducción de hombro, flexión de codo, pronación de antebrazo, flexión de muñeca y dígitos con aducción del pulgar. [8] En este caso, el paciente tendrá problemas como dolores musculares con el tiempo por falta de movilidad del brazo.

Según [9] [10], el objetivo principal de la biomecánica es evaluar la relación entre el movimiento ejecutado y el gasto de energía implicado en su realización. Para el caso del proyecto se analiza el movimiento del brazo izquierdo como se muestra en la Fig.1.

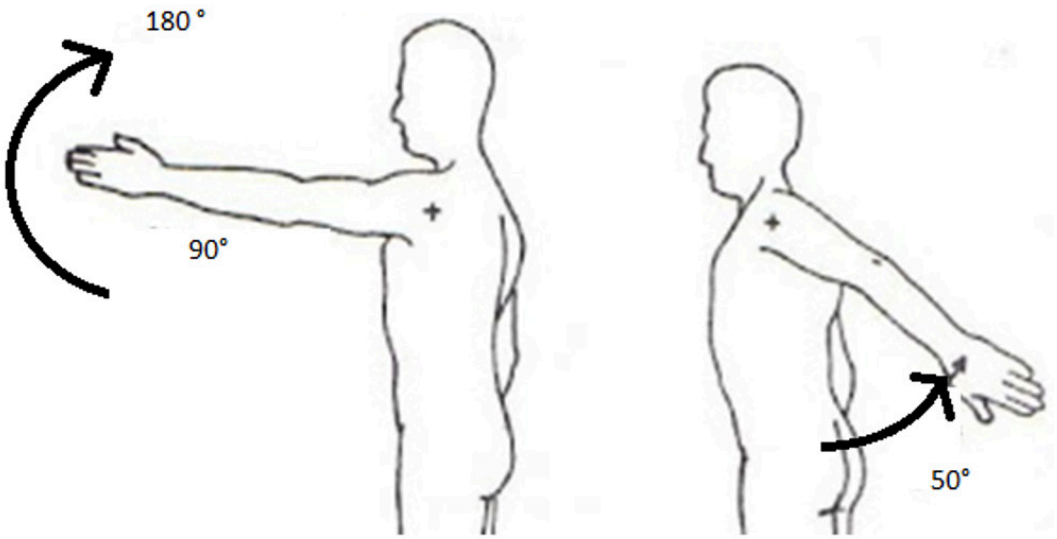



*Fig. 1. Flexión- extensión del brazo izquierdo*

Este movimiento se conoce como flexión-extensión, el cual se encuentra en el plano sagital, en el eje transversal y la flexión llega hasta los 180° y la extensión esta entre 45 y 60°. [10] Sabiendo estas características se realiza un sistema electrónico adaptado a una banda elástica, que se sujeta al brazo izquierdo para que el paciente realice el movimiento de flexión de 90° a 180°; se explica en el siguiente apartado.

## Sistema electrónico

El sistema electrónico se diseñó en base al movimiento de flexión-extensión del brazo izquierdo del paciente, y se compone de cuatro partes fundamentales como son: 1) Sensor acelerómetro; 2) Microcontrolador; 3) Bluetooth y 4) Fuente de energía, esto se muestra en la Fig. 2.

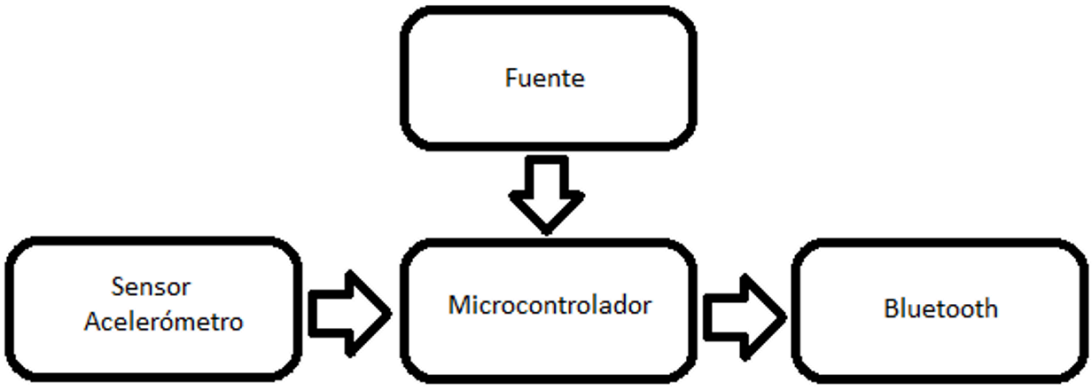



*Fig. 2. Sistema electrónico adaptado al brazo izquierdo.*

El sistema se encuentra basado en el movimiento del brazo izquierdo, y un elemento sensor que permite caracterizar su orientación y aceleración en ejes de tres dimensiones, el sensor acelerómetro, se muestra en la Fig.3.[11]

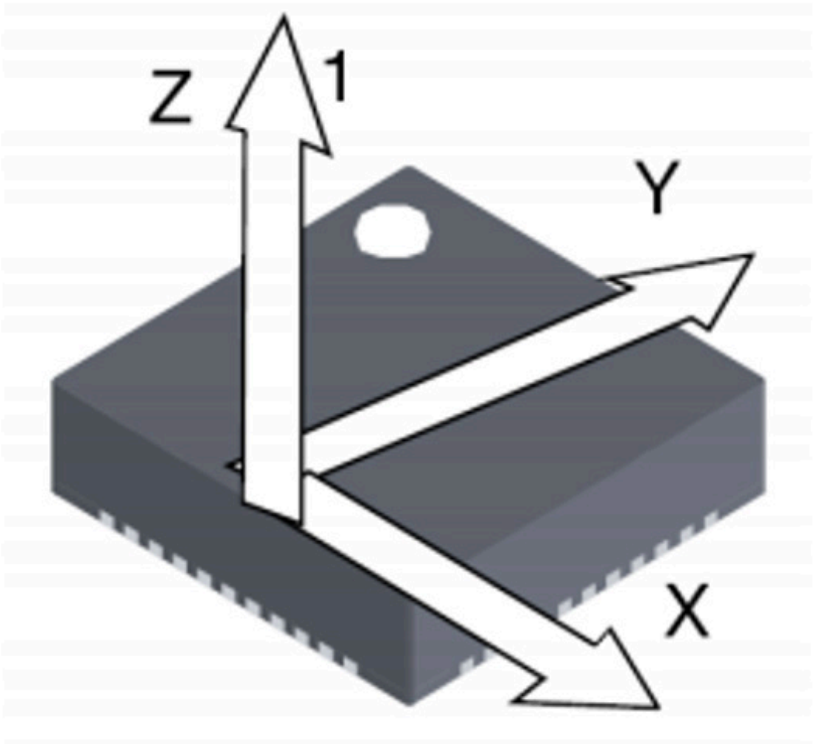



*Fig. 3. Dirección de los ejes de un acelerómetro de 3 ejes.*

Gracias a la gravedad terrestre se puede usar las lecturas del acelerómetro para saber cuál es el ángulo de inclinación respecto al eje X y al eje Y[12]; y se puede determinar su inclinación con las siguientes fórmulas:

$$AnguloY = atan\left(\frac{x}{\sqrt{y^2+z^2}}\right)$$

$$AnguloX = atan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}}\right)$$

Cuando se adapta el acelerómetro al paciente, se puede conocer si al brazo izquierdo se encuentra trasladado en posición horizontal (90°) o tiene el brazo levantado (180°), esto representa el movimiento en el eje Y, y si el paciente rota su muñeca obtendrá valores entre (-90° y 90°), esto representa el movimiento en el eje X.

El acelerómetro escogido es el MPU6050, este elemento es netamente digital y sus lecturas pueden ser adquiridas con cualquier dispositivo que tenga el protocolo de comunicación I2C[12]; para el caso del proyecto se escogió el microcontrolador Arduino Nano que tiene este recurso y se puede observar en la Fig. 4.

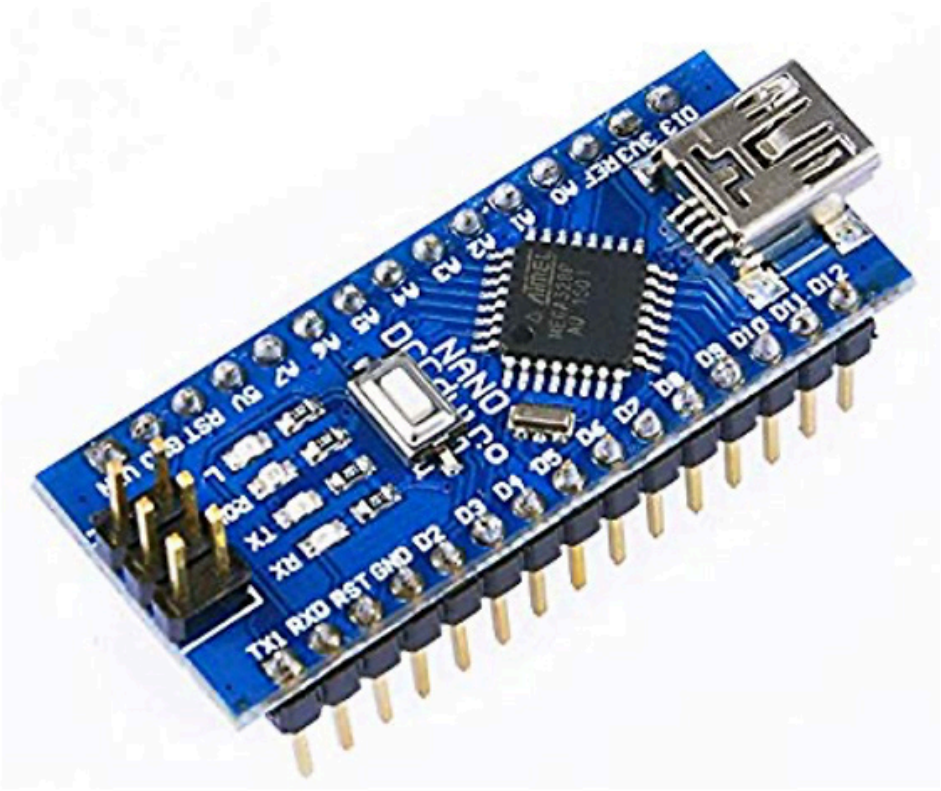



*Fig. 4. Tarjeta de adquisición Arduino Nano*

El proyecto se diseñó para recibir los datos del acelerómetro y que lleguen por comunicación inalámbrica a la computadora; para ello se escogió el dispositivo HC05 que es un tranceiver bluetooth que se conecta al microcontrolador retransmitiendo los datos recogidos, se puede ver en la Fig. 5.

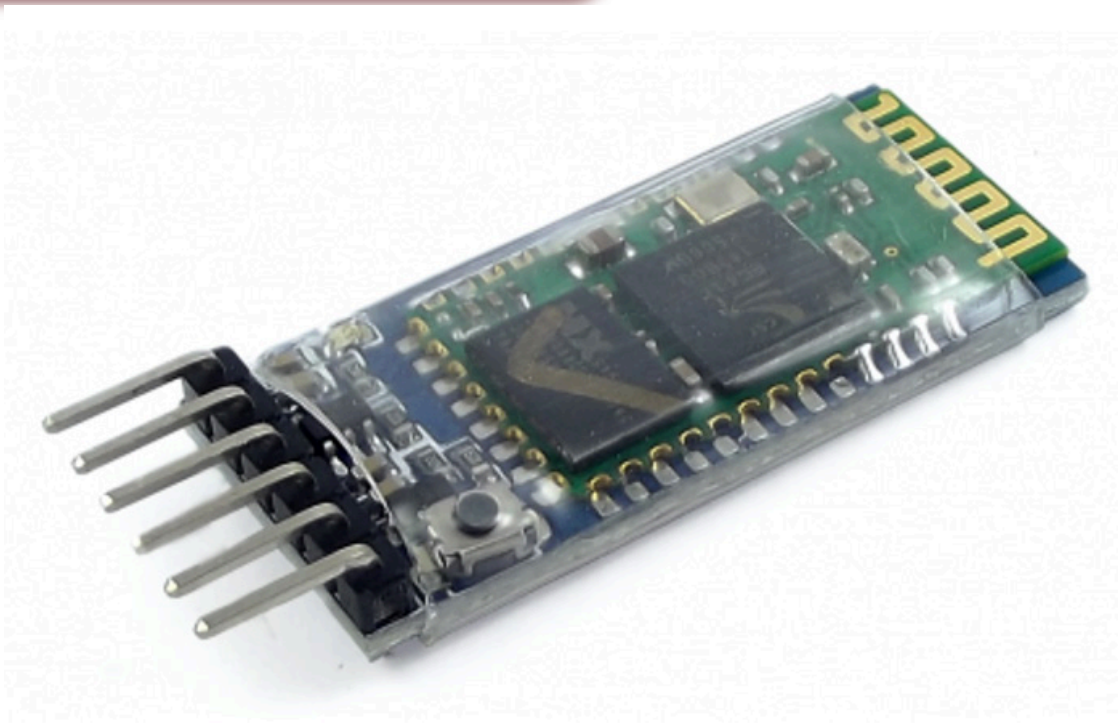


*Fig. 5. Tranceiver bluetooth HC05*

Conectados los dispositivos a una batería de 5 voltios, permiten enviar la información del movimiento del brazo izquierdo del paciente hacia la computadora.

**Videojuegos con Unity**

La industria de los videojuegos ha demostrado un impresionante crecimiento en los últimos años y países por ejemplo como España, que es el cuarto país europeo con más consumo de este tipo de entretenimiento y el sexto a nivel mundial demuestran su interés.[7][13] Por tal motivo se escogió este tipo de plataforma ya que el entretenimiento que brinda, causa gran interés en niños y adultos.[15]

Unity es un motor de videojuegos multiplataforma, Fig.6, permite programar diferentes entornos con lenguajes de programación como Javascript, Boo y el que se usa en el proyecto C#, y sobre todo permite una interfaz gráfica para 2 y 3 dimensiones.[14]

*Fig. 6. Motor de videojuegos multiplataforma Unity.*

Para el diseño del videojuego adaptado al paciente, quien tiene una edad de 6 años, se creó un ambiente de fantasía en 2 dimensiones, en el cual se incorporó un jugador el cual tiene la capacidad de correr y saltar por el escenario creado, esto se muestra en la Fig. 7.

*Fig. 7. Juego diseñado en Unity y adaptado al paciente.*

En base a programación en C#, se puede abrir puertos de comunicación conectados a la computadora para recibir datos, los cuales llegan a través del bluetooth que tiene la PC y la información es enviada desde la banda electrónica.

El juego tiene un único nivel, en el cual el jugador (paciente) no tiene un control remoto estándar, sino que con la banda adaptada al brazo y extendido a 90° empieza a transmitir la información de posición del brazo y empieza a jugar el usuario.

Por el movimiento del brazo, el jugador puede correr más rápido o más lento, trasladando el brazo de 90 a 180° y saltando cuando rota la muñeca desde 0 a 90°. Por consejos del neurólogo el juego debe ser controlado, para no crear síntomas secundarios que en algunos pacientes se generan como rasgos de epilepsia, máximo aconsejable 10 minutos.

## Resultados

Iniciado el juego que se encuentra instalado en la computadora previamente y receptando la información del sistema de control, empieza a correr el jugador representado por un niño pequeño que debe cruzar un ambiente en movimiento.

El sistema de referencia mostrado en la Fig.8, parte del hombro del paciente, y colocando el brazo en una posición de 180°, marca el punto de partida a velocidad lenta de corrida. Para aumentar la velocidad del jugador se programó en el videojuego que, al cambiar la posición del brazo, en este caso levantándolo, la inclinación del sensor cambia aumentando así su velocidad.

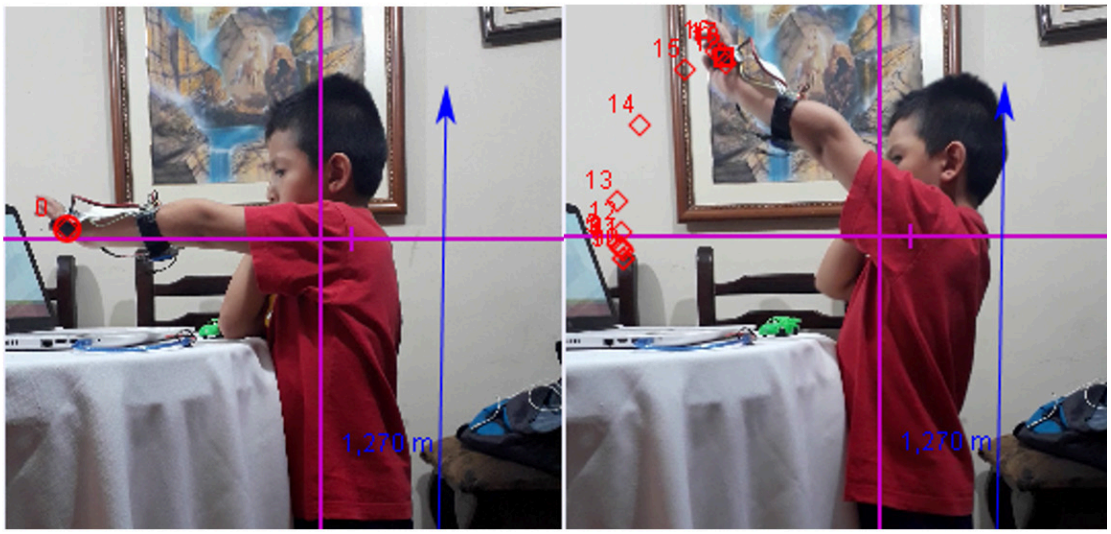



*Fig. 8. Movimiento del brazo, cambiando inclinación del sensor.*

El niño estimula por sí mismo la motricidad fina con el movimiento del brazo izquierdo, ya que debe colocarlo a un ángulo de inclinación que dará como resultado la velocidad en la que le guste jugar. Con el software para análisis de movimiento Tracker, permite revisar cuadro a cuadro el movimiento del brazo y se nota en la mayoría de pruebas el ángulo de desplazamiento mínimo y máximo que el paciente trabaja y se encuentra entre 130° y 180°, y generalmente se queda jugando en un ángulo entre 160° y 170° como muestra la Fig. 9.

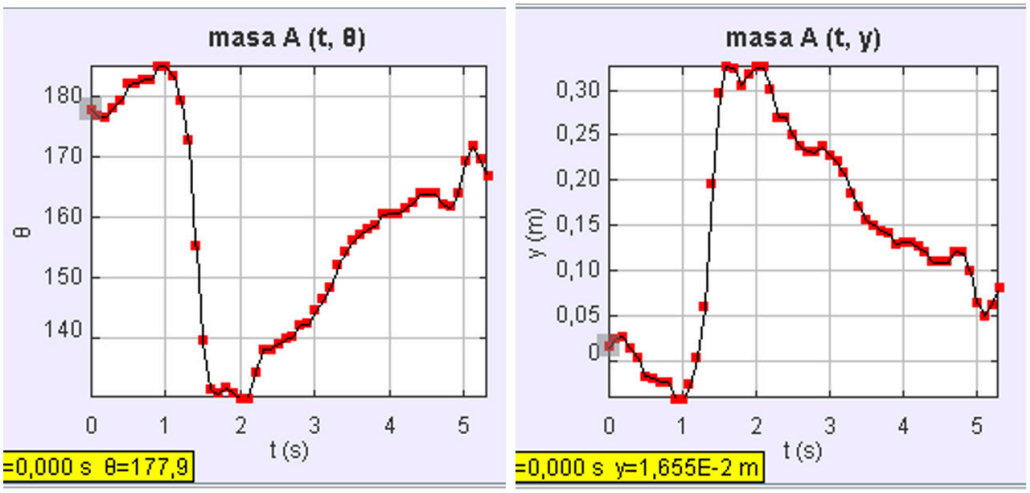



*Fig. 9. Gráfica de posición angular del brazo izquierdo.*

Adicionalmente, se implementó en el videojuego un personaje conocido como el enemigo, que aparece cada 10 segundos, caminando frente al jugador. El objetivo del jugador es pasar por encima del enemigo, dándole un punto por cada enemigo brincado, pero si no lo hace no recibe puntuación.

La forma de brincar del jugador fue implementada rotando la muñeca del paciente; el sensor acelerómetro capta el ángulo de inclinación al momento de rotar la mano, haciendo que este salte, esto se muestra en la Fig.10.

*Fig. 10. Rotación de la muñeca para salto del enemigo.*

Dada la dificultad del paciente porque no puede rotar directamente la mano, él se ayuda con su otra extremidad para poder realizar el giro. Fue una desventaja para el paciente, pero se espera que con más tiempo lo haga por sí mismo. Con tracker se pudo realizar el análisis de la rotación de la mano y especificar en varios experimentos el ángulo de desplazamiento de la muñeca y lo realiza entre 90 y 130°, según el sistema de referencia escogido, esto se muestra en la Fig.11

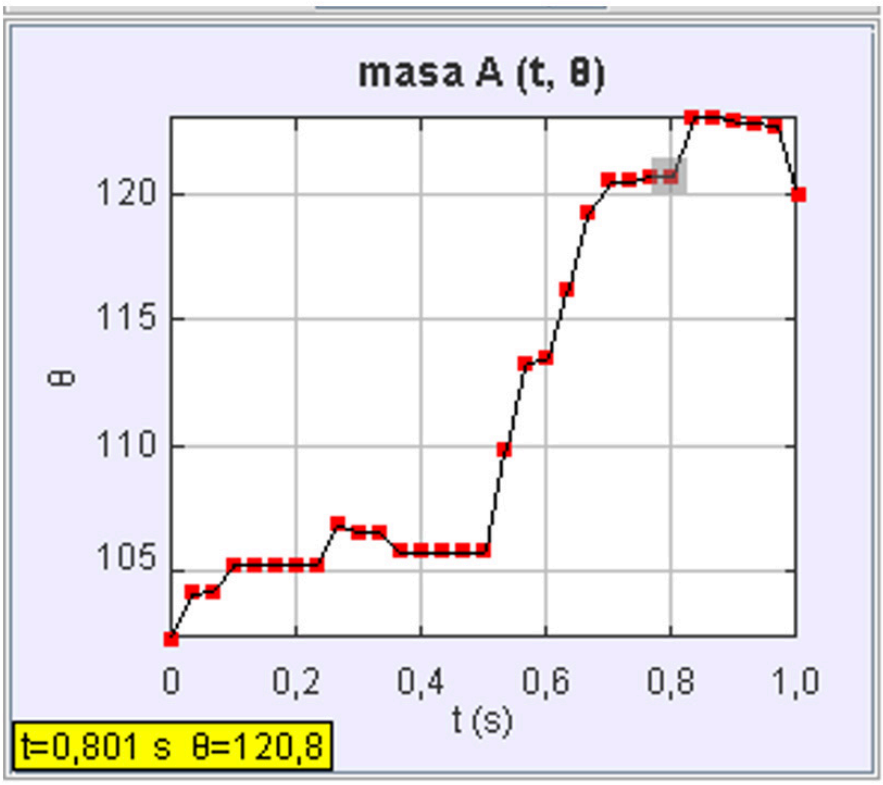



Fig. 11. Ángulo de rotación de la muñeca.

Tomando en cuenta las recomendaciones del neurólogo de no realizar pruebas demasiadas extensas, se tomó como parámetro estimar un tiempo de prueba de 5 minutos, y como máximo 5 pruebas por día, dado este parámetro y sabiendo que el enemigo sale cada 10 segundos se toma un estimado de 30 puntos si el paciente brincara todos, la Tabla 1 muestra las pruebas en un día al azar.

**Tabla 1 Pruebas de funcionamiento**

| Variable | Obs | Promedio | Std. Dev. | ConteoPuntos |
|---|---|---|---|---|
| P1 | 30 | .3666667 | .4901325 | 11 |
| P2 | 30 | .4 | .4982729 | 12 |
| P3 | 30 | .5333333 | .5074163 | 16 |
| P4 | 30 | .6666667 | .4794633 | 20 |
| P5 | 30 | .6333333 | .4901325 | 19 |

Como resultado en esta serie de experimentos, se muestra que entre la prueba 4 y la prueba 5 adquiere mayor experiencia, obteniendo un mayor puntaje. Se observa el trabajo realizado por el brazo izquierdo que es el objetivo del proyecto, estimulando así su motricidad.

## Conclusiones y trabajos futuros

El videojuego al ser amigable por el ambiente de fantasía incentiva el interés del paciente, haciendo que este le guste jugar con el sistema, obteniendo así un agrado por mover el brazo afectado, creando nuevos caminos neuronales para el movimiento y estimulación de su motricidad fina.

Al finalizar las pruebas, el brazo del niño terminaba cansado y se observó que la batería del sistema hacía contra peso en el miembro. Como conclusión final se puede mejorar el sistema electrónico colocando la batería no exactamente en el brazo sino en otra parte del cuerpo.

Este trabajo permite iniciar estudios con mayor profundidad en los pacientes con hemiparesia izquierda y desarrollar prototipos tecnológicos que ayuden en su rehabilitación y pueda mejorar su calidad de vida.

## Agradecimientos

A todos y todas las personas que alrededor de mi familia han sabido brindar ese apoyo incondicional y a mis amigos y profesionales que me supieron incentivar en la culminación del proyecto.

## Referencias

M. Echeverría, "Hemiparesia izquierda secuela de un traumatismo craneoencefálico infantil," Repo.Uta.Edu.Ec, no. 1, p. 130, 2011.

S. Espin, "Hemiparesia izquierda a consecuencia de accidente de tránsito en adolescentes de 16 años," Repo.Uta.Edu.Ec, p. 115, 2014.

D. J. Gutierrez, D. C. A. Reyes, D. M. Tovar, D. N. Alzate, and D. F. Bohórquez, "Rehabilitacion En Trauma Craneoencefálico," Conv. ISS- ASCOFAME, 2011.

M. Jover Torres, "Rehabilitación del miembro superior mediante Terapia de movimiento inducido por restricción del lado sano en paciente neurológico.," p. 30, 2016.

T. F. Yuan and R. Hoff, "Mirror neuron system based therapy for emotional disorders," Med. Hypotheses, vol. 71, no. 5, pp. 722–726, 2010.

G. Rizzolatti and L. Craighero, "The Mirror-Neuron System," Fam. Med., vol. 48, no. 9, p. 731, 2016.

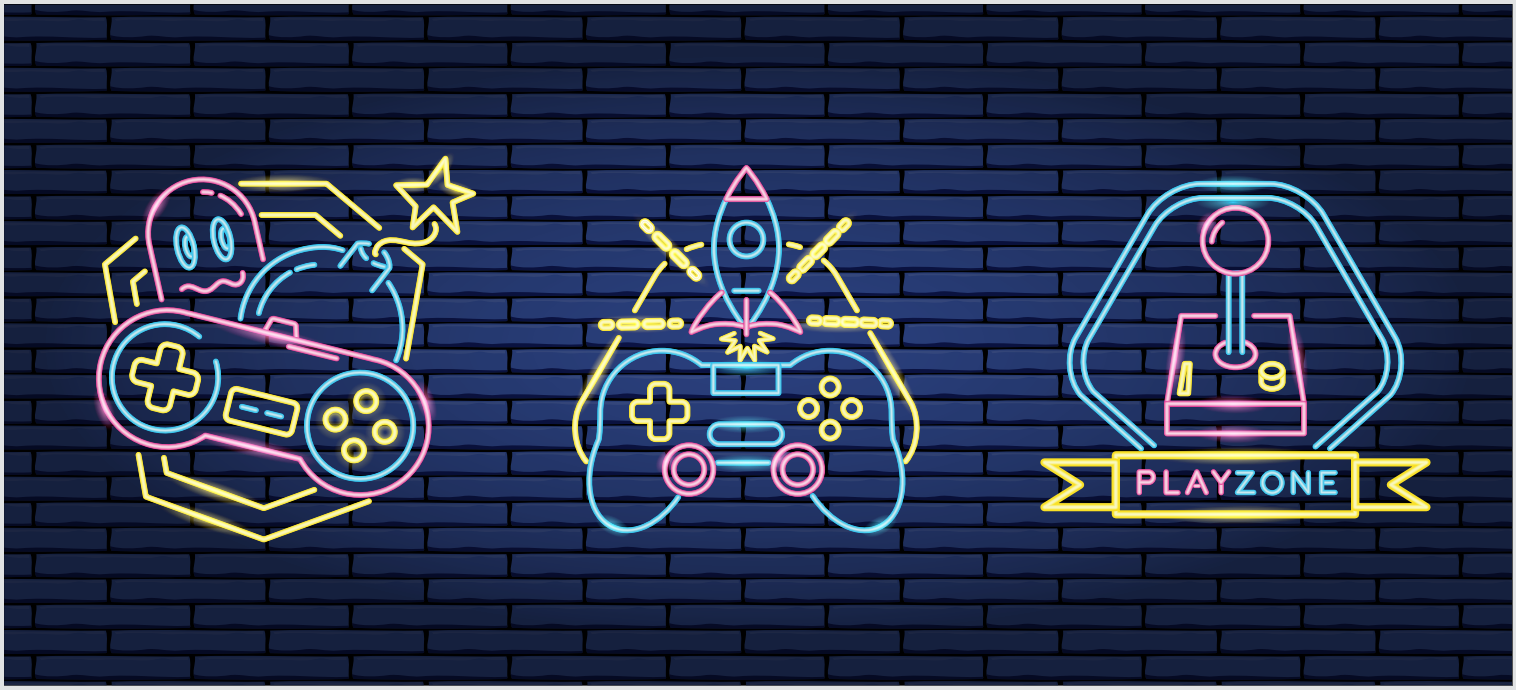
C. L. Universidad de Guadalajara, "El videojuego como herramienta educativa," Apertura, vol. 8, no. 1, pp. 136–151, 2016.

M. Murie-Fernández, M. Carmona Iragui, V. Gnanakumar, M. Meyer, N. Foley, and R. Teasell, "Hombro doloroso hemipléjico en pacientes con ictus: Causas y manejo," Neurologia, vol. 27, no. 4, pp. 234–244, 2012.

A. Repetto, Bases biomecánicas para el análisis del movimiento humano. 2007.

O. Diaz-hernandez, "Un análisis cinemático del brazo humano para biomecánica," no. September 2014, 2017.

S. Parra, "Diseño e implementacion de un sistema de control para robots bípedos," vol. 6, no. 1, Chile, 2012, pp. 1–11.


PLAYZONE

# Rehabilitador para terapias activas y pasivas de rodilla

**Génesis Mora[1], Luis Blanco[1], Brizeida Ojeda[2]**
[1] Centro de Biomecánica, Universidad de Carabobo, Av. Universidad, Naguanagua, Estado Carabobo, Venezuela
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica, EAFIT, Carrera 49 N° 7 Sur 50, Medellín, Colombia

*[1]genesismora93@gmail.com, [1]santiago.blanco16@gmail.com, [2]bojedag@eafit.edu.co*

## RESUMEN

Resumen. Se presenta el diseño mecánico de un rehabilitador con el cual se puede combinar la terapia activa-pasiva de la articulación de rodilla. Se proponen dos alternativas de solución basadas en características anatómicas, fisiológicas y terapéuticas de la articulación. Analizando los criterios establecidos se elige la mejor alternativa. Para el dimensionamiento del equipo se consideraron las características antropométricas de un adulto promedio. En el desarrollo de la etapa de selección de materiales se consideraron criterios de peso, resistencia y costo. Posteriormente, se llevó a cabo un estudio de esfuerzos y desplazamientos empleando un programa computacional, basado en el Método de Elementos Finitos, estimando condiciones reales de operación. Para llevar a cabo este proceso se establecieron condiciones de carga y restricciones considerando el accionamiento asociado a los movimientos y amplitud de estos (ángulos máximos) de la rodilla en condición normal. Finalmente, se verificaron las condiciones de operación con base al factor de seguridad de los componentes estructurales confirmando la capacidad de resistir los escenarios de operación establecidos

**Palabras Clave:** Rehabilitador, Rodilla, Activo, Pasivo.

## Introducción

La Fisioterapia se considera una ciencia y un arte, destinada a prestar cuidados a individuos para mantener y restaurar al máximo el movimiento y la habilidad funcional durante el ciclo vital. Actualmente, existe una alta población que sufre de lesiones a nivel del miembro inferior, específicamente la rodilla, la cual, mediante el conocimiento, y evaluación pertinente, se indica para cada caso su tratamiento y rehabilitación del miembro afectado para recuperar su función y que el paciente sea capaz de volver a sus actividades de la vida diaria [1]. Como se mencionó anteriormente, de los miembros inferiores, la rodilla es una de las articulaciones más propensa a lesionarse debido a que soporta gran parte del peso del cuerpo humano. Tan solo al caminar, se está cargando en cada rodilla el equivalente a dos veces el peso corporal. Si se está trotando, cerca de cuatro veces. En muchas actividades habituales la rodilla soporta de 5 a 6 veces el peso corporal [2].

Las lesiones que se presentan en esta articulación pueden ser causadas por un movimiento mal efectuado, un golpe durante alguna actividad cotidiana o en la práctica de algún deporte. Además, la rodilla también puede ser afectada por alguna enfermedad, como la artritis, la condromalacia rotuliana, deformaciones congénitas, entre otras. La rehabilitación de rodilla es comúnmente aplicada por un fisioterapeuta, quien se encarga de movilizar la zona perjudicada. Existe una gran cantidad de centros de salud que no logran satisfacer la demanda de la población afectada ya que no cuentan con la cantidad de fisioterapeutas requeridos. Aunado a esto, el fisioterapeuta encargado de la rehabilitación de rodilla debe realizar, en algunas ocasiones, un esfuerzo físico elevado para poder movilizar la pierna del paciente y brindarle la funcionalidad a la rodilla. Esto significa que la rehabilitación de rodilla representa un proceso complejo tanto para el paciente como para el fisioterapeuta que la realiza. Si la rehabilitación se realiza de manera incorrecta o el paciente no tiene acceso a la misma esto puede resultar en la prolongación de la recuperación del paciente, o que la misma no se lleve a cabo de manera satisfactoria.

Actualmente, se encuentran en el mercado una variedad de dispositivos que realizan el movimiento de la rodilla para rehabilitar la misma; sin embargo, los costos de estos dispositivos son sumamente elevados, ya que son importados [3], por lo cual se encuentran fuera del alcance de muchas instituciones de salud, tanto públicas como privadas. En su mayoría, estos dispositivos brindan un movimiento pasivo continuo, lo que significa que el dispositivo realiza el movimiento del paciente sin ayuda o resistencia ofrecida por el mismo, es decir, a través de una fuerza externa, esto brinda como beneficios principales el aumento de rango de movimientos en la rodilla, evitar adherencias y recuperación muscular. No obstante, el movimiento activo que es el que se realiza voluntariamente, permite un aumento del tono muscular y en la resistencia, por lo cual también resulta beneficioso durante la etapa de rehabilitación. De acuerdo con lo anterior, el Centro de Biomecánica de la Universidad de Carabobo, a través de la presente investigación, propone el diseño y construcción de un dispositivo que permita la dualidad de los movimientos pasivo y activo, que sea diseñado y fabricado en el país, disminuyendo esto su precio de venta, resultando de mayor accesibilidad para los centros de salud pública y privada, permitiendo de tal manera aumentar la cantidad de pacientes a tratar tras afecciones en la rodilla, y de la misma forma aligerar el trabajo de los fisioterapeutas involucrados.

## Metodología

### Fase 1: Evaluación preliminar

Se procede a la recopilación de información anatómica, fisiológica y biomecánica, referida a los miembros inferiores. Así mismo, se analizan los protocolos utilizados en los tratamientos fisioterapéuticos, postoperatorios y de rehabilitación de lesiones de rodilla. Posteriormente, se estudian los tipos de movimientos más comunes en los procesos de rehabilitación activa y/o pasiva. Las consideraciones anteriores son necesarias para establecer los requerimientos de diseño.

### Fase 2: Diseño del rehabilitador

Con base a la etapa anterior, se plantean características para el equipo asociadas con la seguridad, ergonomía, ángulos de movimientos permitidos, peso del dispositivo y tipo de terapia que se puede aplicar. Con esta información, se proponen alternativas de solución para el dispositivo de rehabilitación empleando un software CAD/CAE. En la Fig. 1 se observan los modelos propuestos.

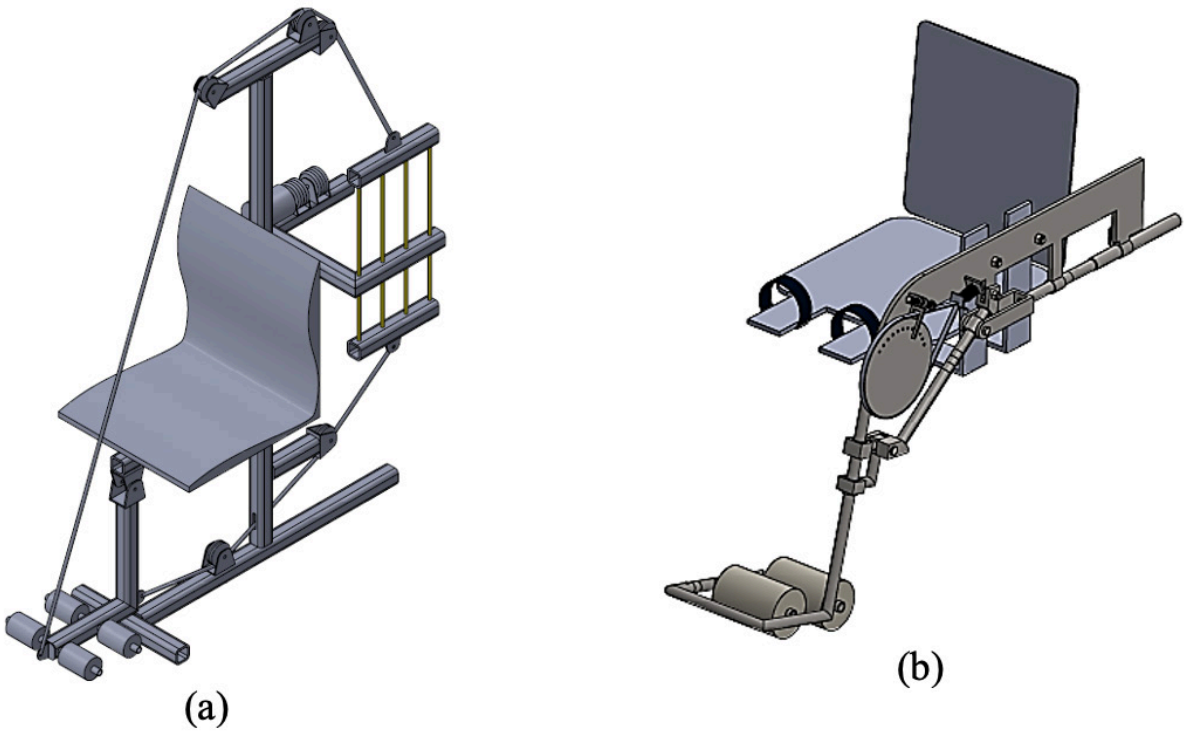



*Fig. 1. Alternativas de solución para el rehabilitador de rodilla. (a) Modelo Nro. 1, (b) Modelo Nro. 2.*

Evaluando las ventajas que ofrece cada alternativa se selecciona el Modelo Nro. 2. En la Fig. 2 se muestra la vista en explosión del modelo seleccionado, del cual se valoran las posibilidades de ensamblaje de los componentes. Adicionalmente, en la Tabla 1 se presenta la lista de componentes de la solución.

Una vez verificado el ensamblaje a partir del modelo 3D, se procede a la selección de los materiales apropiados para la fabricación del rehabilitador. Para este proceso se tienen en cuenta criterios de facilidad de adquisición, bajo costo y disponibilidad en el mercado nacional. Así mismo, las cualidades adecuadas a los procesos a que se deba someter en la elaboración de los diferentes componentes que conformen el rehabilitador. Adicionalmente, se consideran materiales propios para dispositivos que puedan ser utilizados por pacientes. Se estima utilizar en el dispositivo aluminio 6061-T6 para el asiento, y acero AISI 1020 para el resto de los componentes del dispositivo. Las propiedades mecánicas de dichos materiales se especifican en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

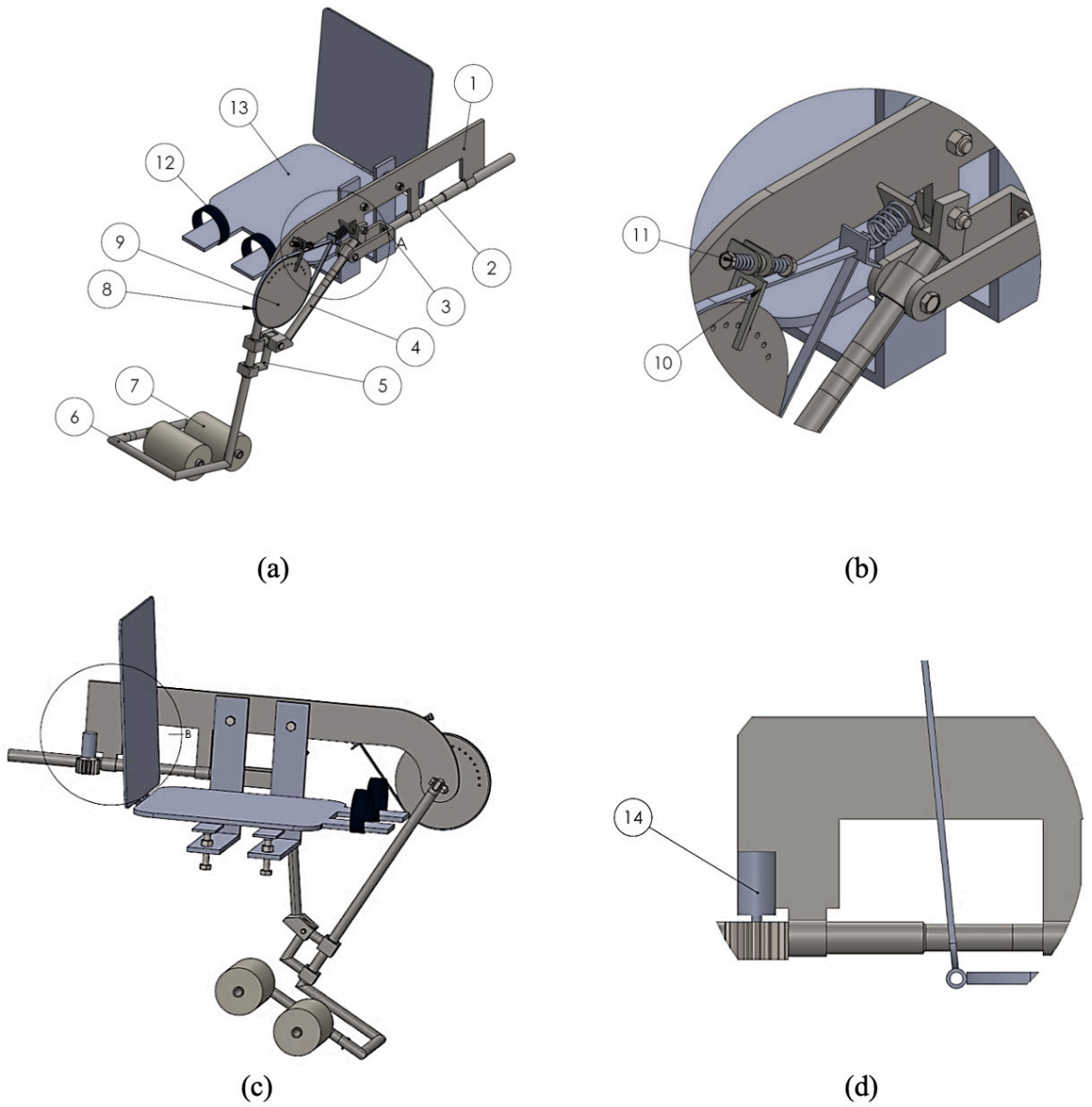



*Fig. 2. Solución seleccionada para el rehabilitador de rodilla. (a) Vista isométrica, (b) Vista de detalle A (movimiento activo), (c) Vista izquierda proyectada, (d) Vista de detalle B (sistema motriz)*

**Tabla 1. Lista de piezas de la solución propuesta.**

| N° de Elemento | Descripción | Cantidad |
|---|---|---|
| 1 | Base | 1 |
| 2 | Barra-Cremallera | 1 |
| 3 | Corredera principal | 1 |
| 4 | Brazo recto | 1 |
| 5 | Corredera auxiliar en U | 1 |
| 6 | Barra paralela a la pierna | 1 |
| 7 | Rodillos acolchados | 2 |
| 8 | Banda de Freno | 1 |
| 9 | Disco de Freno | 1 |
| 10 | Tope ángulo de frenado | 1 |
| 11 | Anclaje de tope frenado | 1 |
| 12 | Banda para ajuste cuádriceps | 2 |
| 13 | Asiento con espaldar | 1 |
| 14 | Motor/Piñón | 1 |

**Tabla 2. Propiedades mecánicas del Aluminio 6061-T6 [4]**

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| **Esfuerzo de fluencia** | 276 | MPa |
| **Esfuerzo máximo** | 310 | MPa |
| **Elongación** | 1% (en 50 mm) | --- |
| **Módulo de elasticidad** | 71,7 | GPa |
| **Coeficiente de Poisson** | 0,34 | --- |
| **Dureza** | 95 | HBN |

**Tabla 3. Propiedades mecánicas del Acero AISI 1020 [4]**

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| **Esfuerzo de fluencia** | 390 | MPa |
| **Esfuerzo máximo** | 470 | MPa |
| **Elongación** | 15% (en 50,8 mm) | --- |
| **Módulo de elasticidad** | 206,8 | GPa |
| **Coeficiente de Poisson** | 0,28 | --- |
| **Dureza** | 131 | HBN |

### Fase 3: Cálculos

Para el estudio de esfuerzos y desplazamientos en el dispositivo rehabilitador, se establecen las condiciones de carga y restricciones de movimientos. Se consideran dos tipos de movimiento, el pasivo y el activo; así como dos posiciones del ángulo de la rodilla, extensión máxima a 5° (ver Fig. 3-a) y flexión máxima a 120° (ver Fig. 3-b) [5].

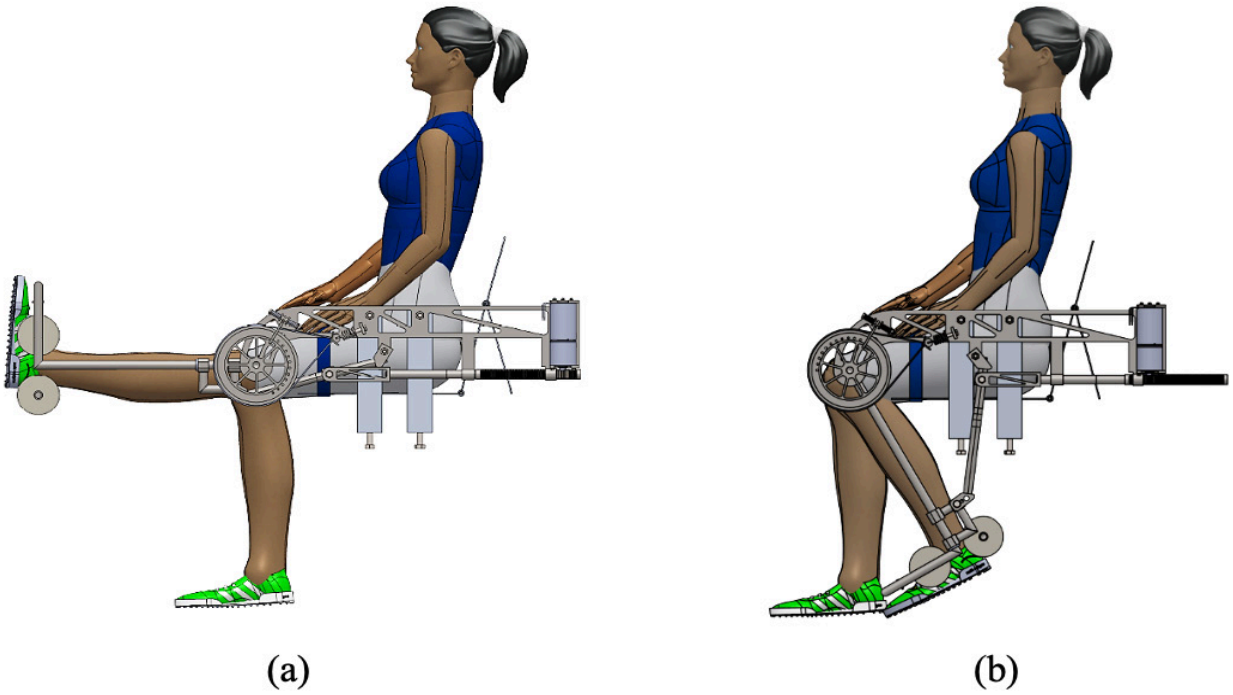



*Fig. 3. Movimientos del rehabilitador de articulación de rodilla, (a) Extensión de rodilla, (b) Flexión de rodilla.*

Se estima un paciente con peso promedio de 100 kg, de los cuales el miembro inferior representa el 16% del peso total del cuerpo, es decir 16 kg. De este peso el 60% pertenece al área del fémur y 40% pertenece a la zona tibial junto con el pie [6]. Por lo tanto, el fémur tiene un peso de 9,6 kg y la zona tibial junto con el pie posee un peso de 6,4 kg. En posición sedente, cerca del 75% del peso total del cuerpo es soportado por las tuberosidades isquiáticas que descansan en la superficie de asiento [7]. Debido a lo expuesto anteriormente, el peso restante total del cuerpo (84%) se encuentra dividido en una distribución de carga de un 63% en el asiento (63 kg) y un 21% sobre el espaldar (21 kg). En la Fig. 4 se indican las condiciones de carga propuestas para el cálculo estructural y dimensional de los componentes.

Para la rehabilitación pasiva, las condiciones de carga a utilizar son resultantes del peso de la zona tibial junto con el pie, añadiendo la fricción existente entre los elementos, así como la gravedad.

Para la rehabilitación activa, las condiciones de carga a utilizar son el peso de la zona tibial junto con el pie del paciente, el momento asociado con los movimientos de la rodilla (flexión y extensión) y la gravedad. En la Tabla 4 se indican los valores asociados a dichos momentos, siendo utilizado el mayor valor de momento flector para hombres, de manera que el estudio se efectúe bajo las condiciones más esforzadas.

**Tabla 4. Momentos asociados a los movimientos de rodilla [8].**

| MOVIMIENTO | MOMENTO FLECTOR (MASCULINO) [N.m] | MOMENTO FLECTOR (FEMENINO) [N.m] |
|---|---|---|
| **FLEXIÓN** | 97,2 ± 13,2 | 59,1 ± 1,3 |
| **EXTENSIÓN** | 97,2 ± 13,2 | 59,1 ± 1,3 |

En la Fig. 4 se muestra el estado de cargas que resulta de la colocación de un paciente sobre el dispositivo. La flecha de color rojo representa el peso de la zona tibial junto con el pie del paciente (6,4 kg), las cargas azul oscuro se refieren a la distribución de carga en el asiento (56 kg) y las cargas azul claro aluden a la distribución de carga en el espaldar (28 kg).

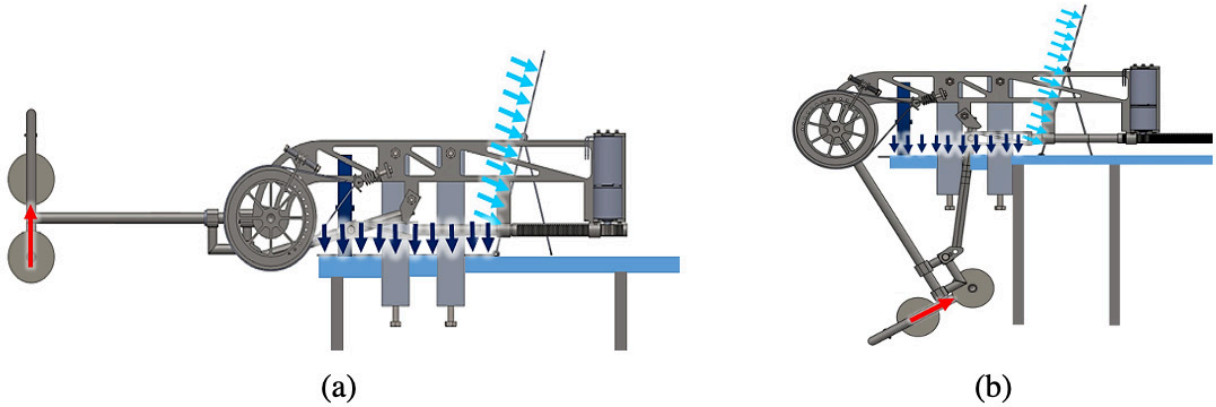



*Fig. 4. Configuración de cargas para el cálculo estructural según la posición del rehabilitador de articulación de rodilla, (a) Distribución de cargas en extensión de rodilla, (b) Distribución de cargas en flexión de rodilla.*

Dada la complejidad del dispositivo, la simulación del rehabilitador de rodilla con el programa basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF), se ejecuta por separado a aquellas piezas que por sus dimensiones y cargas a las que están sometidas pueden presentar fallas (piezas críticas). Cabe destacar que el rehabilitador realiza la función pasiva y activa, por lo tanto, algunas piezas se analizan bajo las condiciones de carga pasiva, mientras que otras se estudian con la condición de cargas activas, siempre tomando en cuenta el estado más crítico para el elemento en estudio.

Realizando un análisis de carga en el modelo, se observa que al encontrarse el mismo en completa extensión ocurre la condición crítica, debido a que es el instante donde la fuerza ejercida en la barra paralela a la pierna posee mayor brazo de palanca, obteniéndose el mayor valor en magnitud para los momentos que en ella se aplican. De igual forma, en el resto de las piezas que componen el dispositivo las condiciones de carga son similares a las de la barra paralela, es decir, en la máxima extensión se obtiene el mayor brazo de palanca, y como dichas piezas presentan un comportamiento instantáneo similar a los de una viga, el estado mencionado resulta el más esforzado.

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis de esfuerzo y desplazamiento realizado a cada elemento que conforma el modelo presentado como solución definitiva. Para todas las imágenes de este apartado, las restricciones se encuentran representadas por flechas verdes, mientras que las flechas moradas representan las cargas aplicadas. Sólo se anexan las imágenes resultantes del estudio de desplazamientos de aquellas piezas donde el valor máximo del mismo sea igual o mayor a 1 mm.

El conjunto asiento-espaldar (elemento 13 de la Tabla 1) se analiza considerando el paciente sentado. Para el asiento, en la Fig. 5-a se indican las condiciones de borde y mallado de la pieza, mientras que en la Fig. 5-b se observan los valores de esfuerzo de von Mises para el asiento.

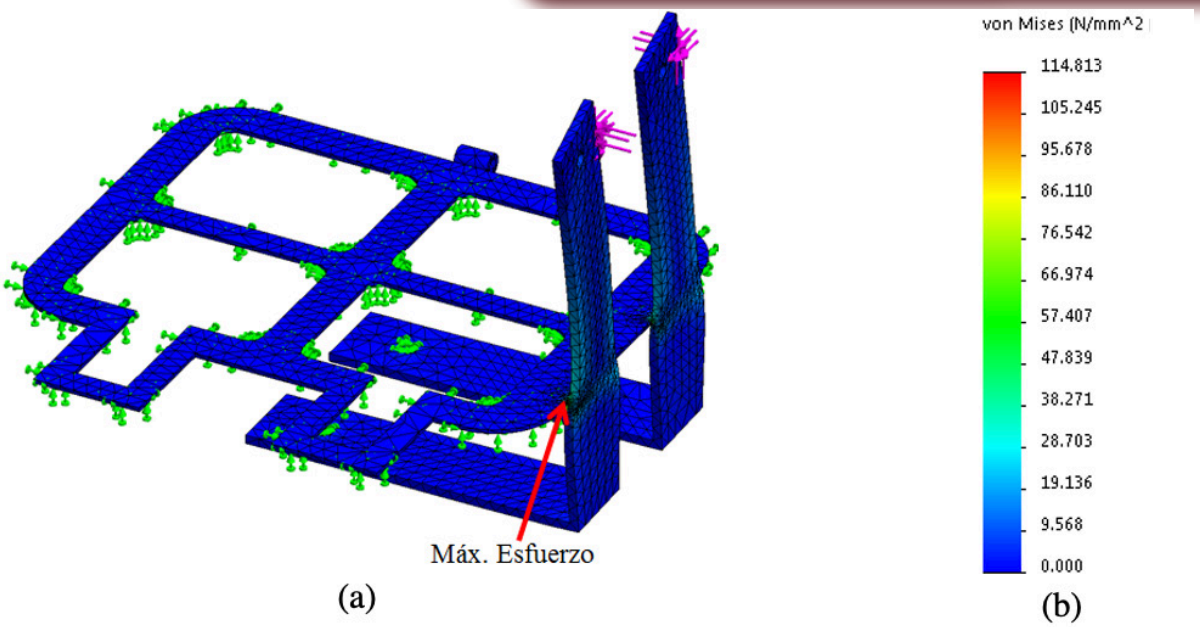



*Fig. 5. Asiento, (a) Condiciones de borde y mallado del asiento, (b) Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa).*

Para el espaldar, las restricciones se encuentran en la pieza donde se encuentran los pasadores de las bisagras del asiento, mientras que la carga distribuida es un porcentaje del peso de una persona apoyada sobre el mismo (ver Fig. 4). En la Fig. 6 se especifican los resultados del análisis de esfuerzos en el espaldar.

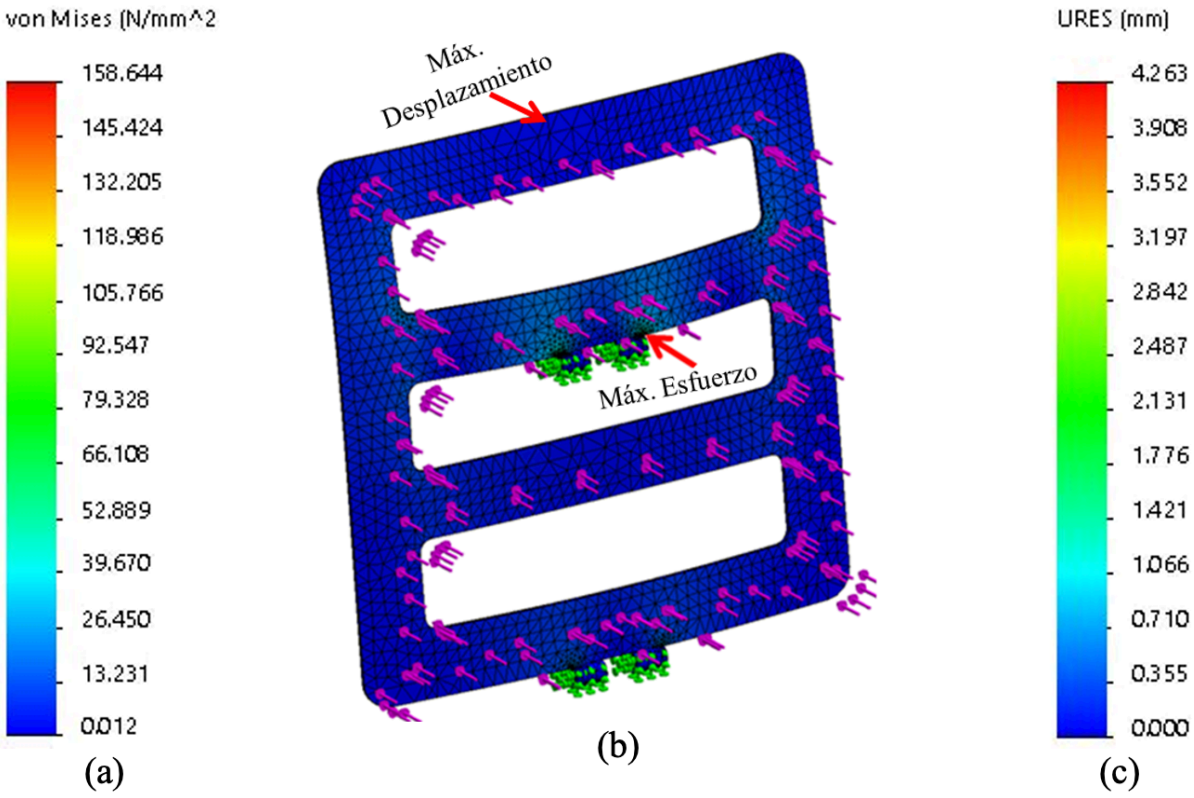



*Fig. 6. Espaldar, (a) Distribución de esfuerzos de von Mises (MPa), (b) Condiciones de borde y mallado de la pieza, (b) Desplazamientos (mm)*

Para el brazo recto (elemento 13 de la Tabla 1) las restricciones se encuentran en la estructura donde se vincula al pivote que va a la base del dispositivo y en la camisa de acero que arropa a la bocina de teflón, mientras que las cargas aplicadas provienen de la barra paralela a la pierna, transmitidas por medio de la corredera auxiliar en U (ver Fig. 7). En la Fig. 8 se indican los resultados del análisis de esfuerzo y desplazamiento en el brazo recto.

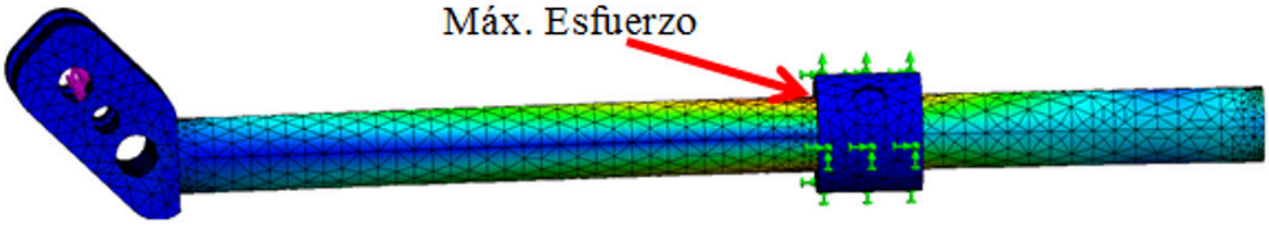



*Fig. 7. Condiciones de borde y mallado del brazo recto.*

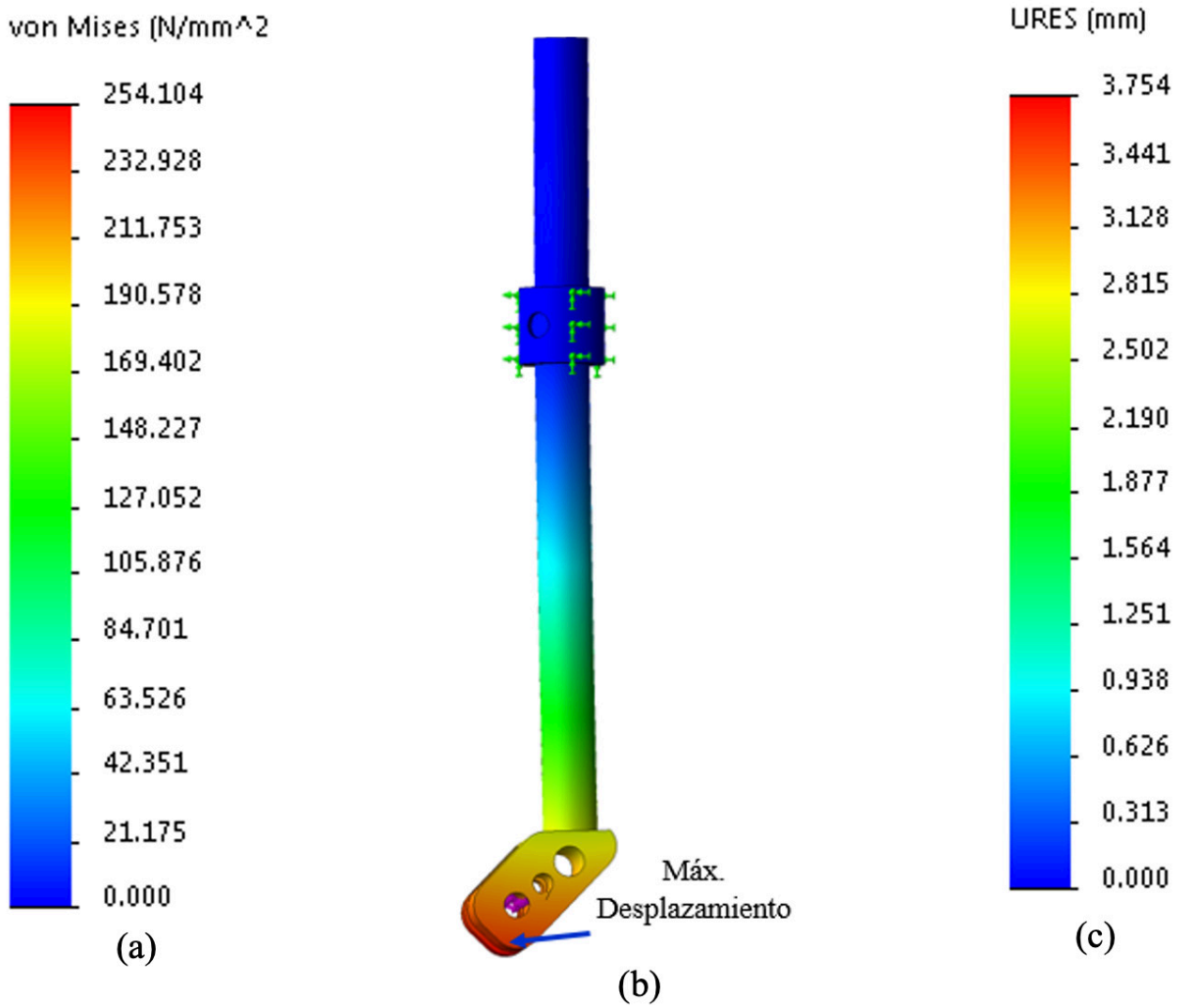



*Fig. 8. Resultados análisis esfuerzo y desplazamiento del brazo recto, (a) Esfuerzos de von Mises (MPa), (b) Ubicación máximo desplazamiento, (c) Desplazamientos (mm).*

Para la corredera principal (elemento 13 de la Tabla 1), las restricciones están en la estructura donde se vincula a la rosca del sistema barra-cremallera, mientras que las cargas aplicadas provienen de la transferencia de fuerzas entre el brazo recto y la pieza en estudio. En la Fig. 9-a se indican las condiciones de borde y el mallado para la corredera principal, mientras que el esfuerzo de von Mises se muestra en la Fig. 9-b. El máximo esfuerzo, y por ende, el mínimo valor del factor de seguridad se encuentra en la periferia del orificio del tornillo que une a la corredera principal con la barra-cremallera.

En lo que corresponde al sistema de frenado se realiza un ensamble entre varias piezas (elementos 8,9,10,11 de la Tabla 1) con el objetivo de aproximar el estudio a la situación real en la que se encuentra el dispositivo. Para el conjunto disco de freno-base las restricciones se encuentran donde se vincula con la barra paralela a la pierna, mientras que las cargas aplicadas corresponden a la fuerza de frenado y la tensión de la correa de la banda de freno. Las condiciones de mayor criticidad para las piezas en estudio son las del movimiento activo. Cabe destacar que, aunque la base durante el movimiento pasivo se encuentra sometida al momento torsor ejercido por el motor, esta condición es mucho menos esforzada que la que se presenta en el movimiento activo; por lo tanto, esta pieza se estudia bajo las condiciones antes descritas (ver Fig. 10).

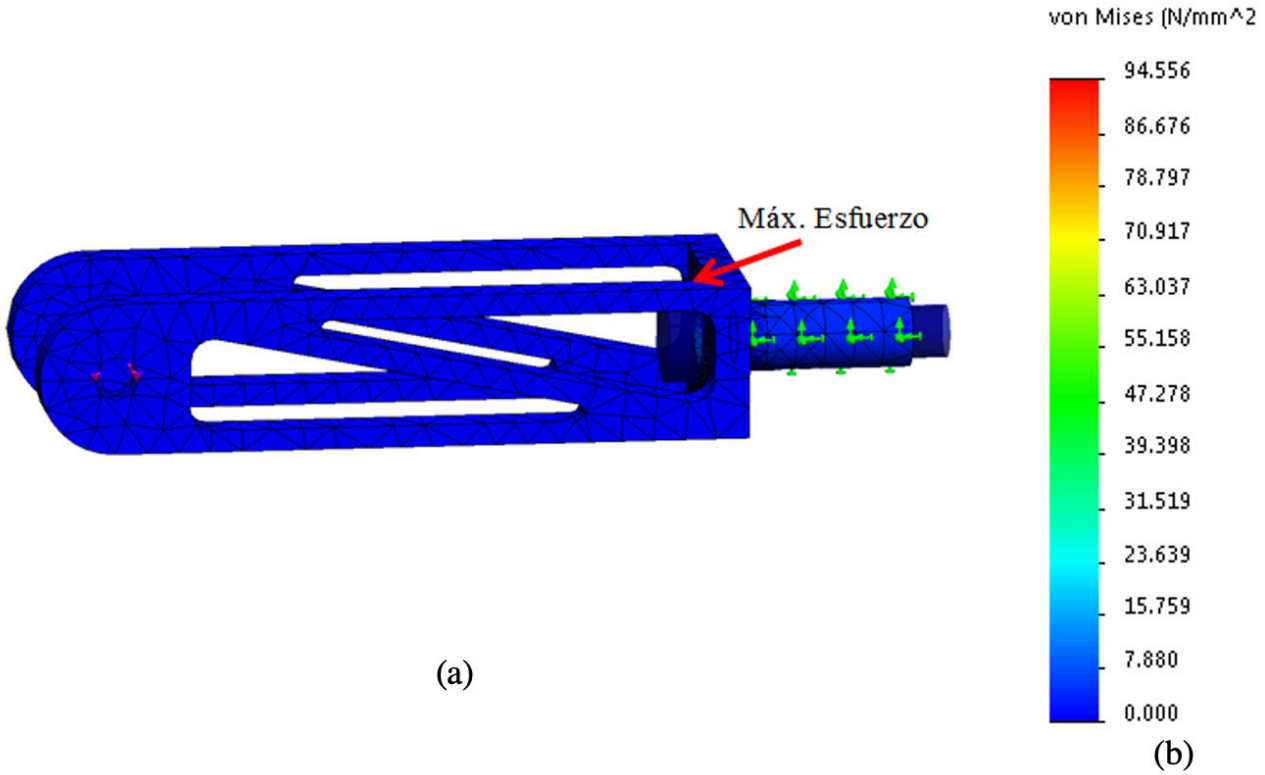



*Fig. 9. Corredera principal, (a) Condiciones de borde, (b) Esfuerzos de von Mises (MPa)*

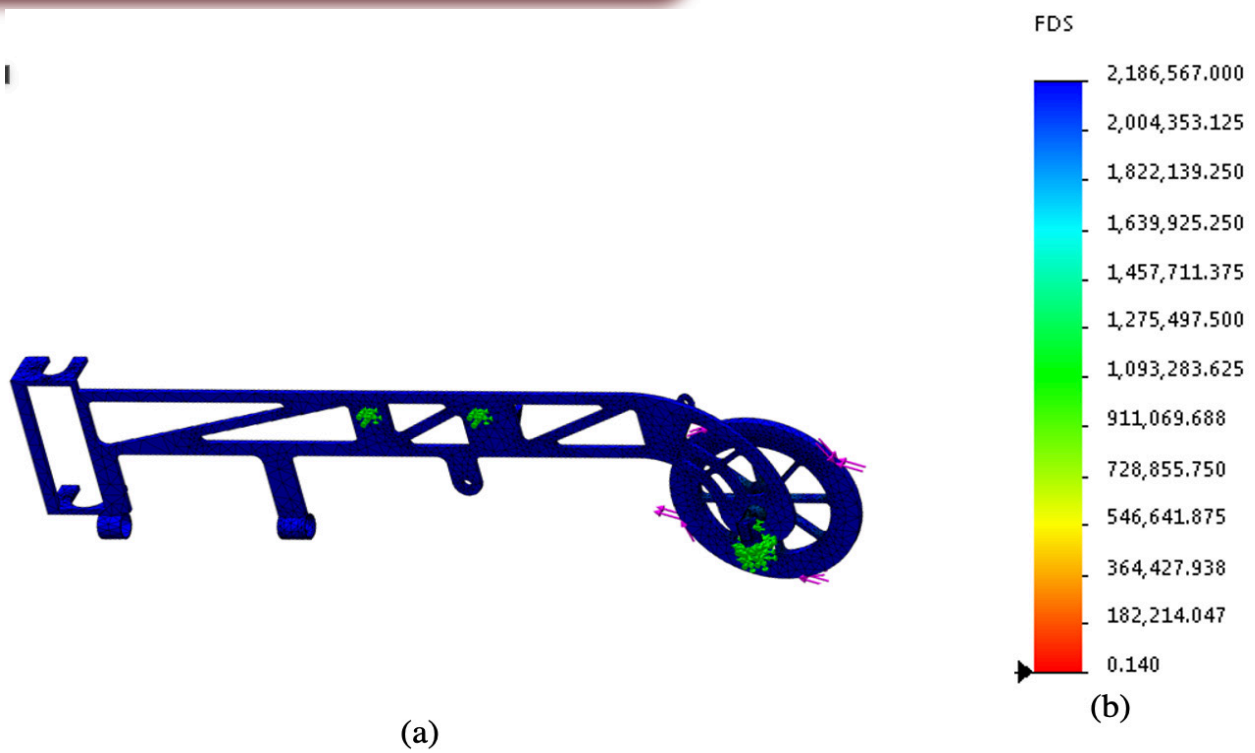



*Fig. 10. Disco freno-base del dispositivo, (a) Condiciones de borde y mallado, (b) Esfuerzos de von Mises (MPa)*

Para el sistema barra-cremallera del dispositivo, las restricciones se ubican donde se sujeta a tierra, siendo para este caso la vinculación al asiento (ver Fig. 11). Adicionalmente en el estudio, se agrega la base del dispositivo y se define un contacto sin penetración entre componentes de forma que se simule la interfaz entre elementos y así obtener un resultado más realista de la pieza en estudio.

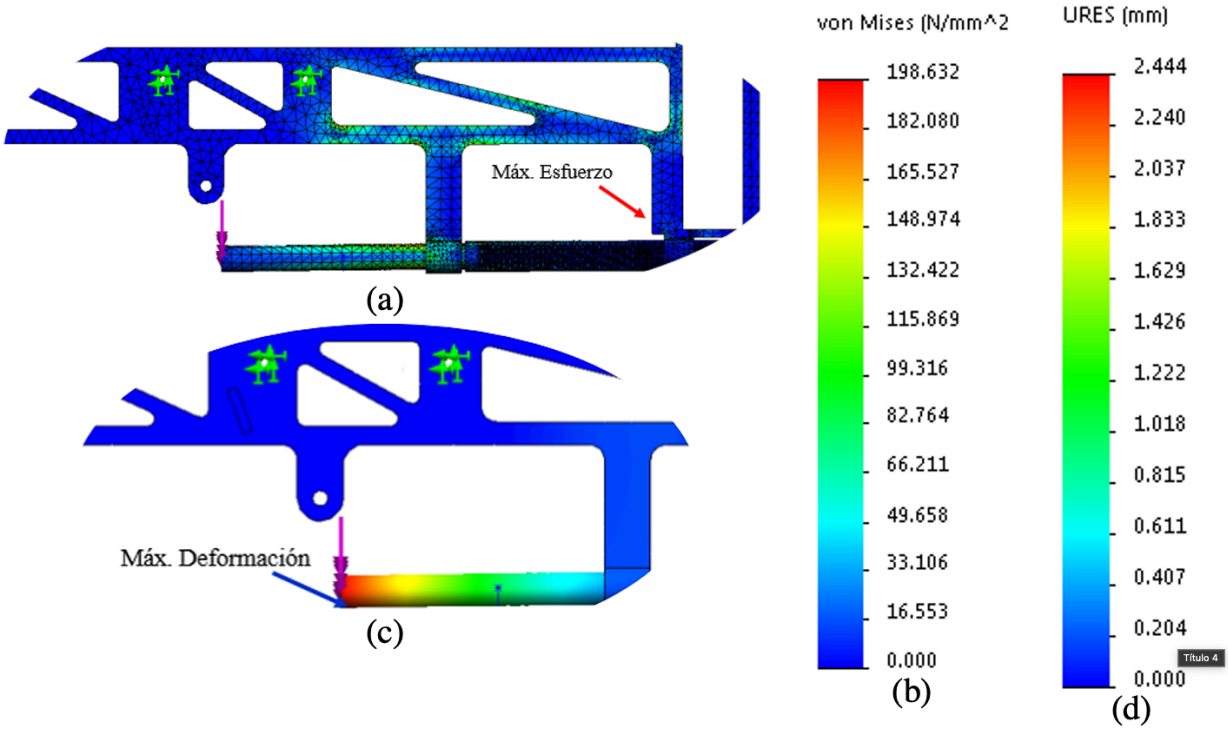



*Fig. 11. Barra-cremallera, (a) Condiciones de borde y mallado, (b) Esfuerzos de von Mises (MPa), (c) Ubicación de máximo desplazamiento, (d) Desplazamientos (mm)*

El estudio de la barra paralela a la pierna (ver elemento 6 de la Tabla 1) en el modo activo a flexión y extensión, se divide en tres piezas denominadas: cuerpo principal, vinculación y soporte de pie. Cabe destacar que las condiciones críticas para cada una de las piezas son las de la rehabilitación activa.

Para el cuerpo principal de la barra paralela a la pierna, las restricciones se encuentran donde se vincula a tierra por medio del acople con el disco de freno, las cargas son resultantes de la fuerza realizada por el paciente al realizar la rehabilitación activa, esta fuerza es un torque que cambia de sentido dependiendo sí el ejercicio es de flexión o de extensión. Los resultados del análisis se indican en la Fig. 12.

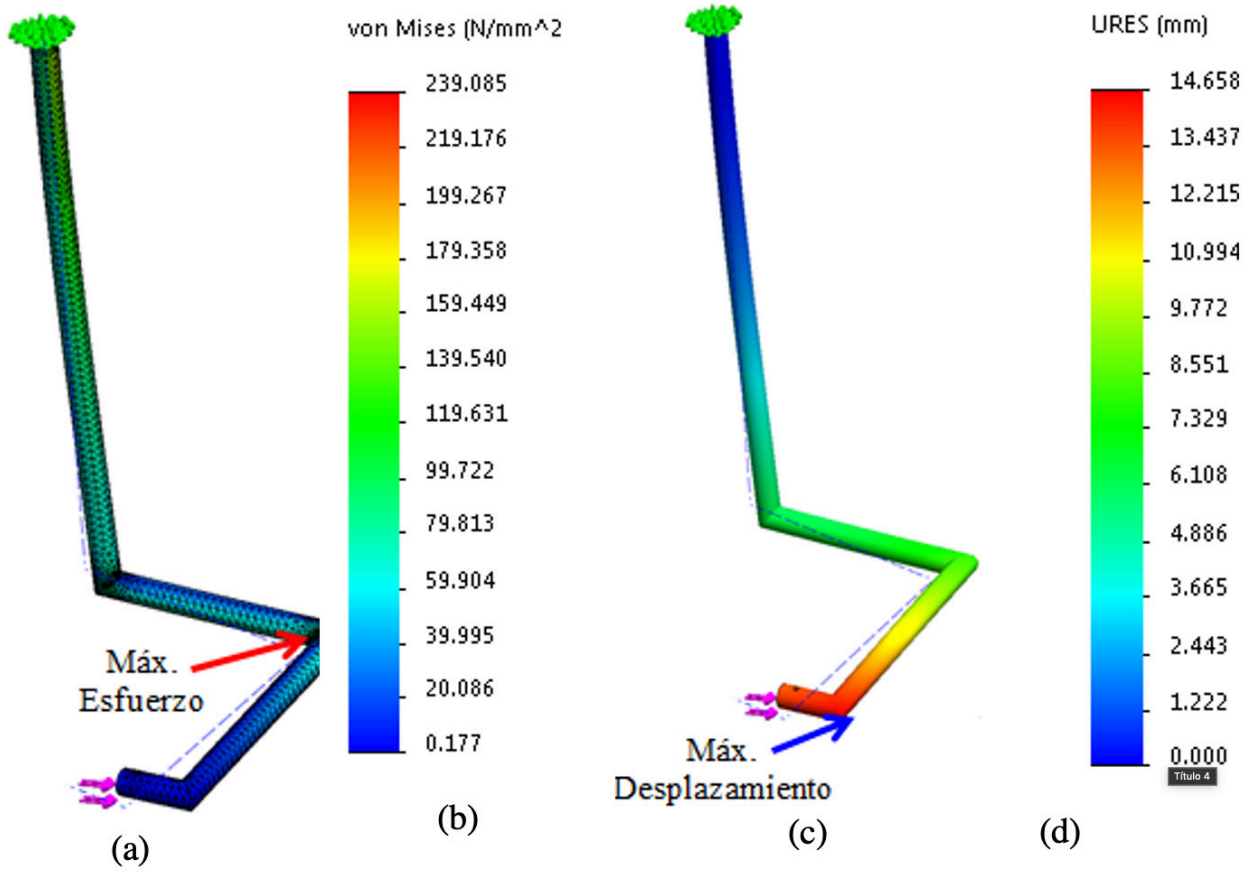



*Fig. 12. Cuerpo principal de la barra paralela a la pierna, (a) Condiciones de borde y mallado, (b) Esfuerzo de von Mises, (c) Ubicación de máximo desplazamiento, (d) Desplazamientos*

La vinculación cuerpo principal a soporte de pie permite realizar la rehabilitación en ambas piernas, ya que otorga la posibilidad de rotación del posa-pie a 180°. El estudio se lleva a cabo para las condiciones de rehabilitación activa ya que son las más esforzadas en este elemento. De igual forma se desarrolla el estudio para flexión y extensión.

En el soporte se aprecia la restricción en la vinculación al cuerpo principal, mientras que las cargas son la fuerza ejercida directamente por el paciente al elemento en estudio tanto en la flexión como en la extensión (ver Fig. 13).

En el soporte de pie se aprecia la restricción en la vinculación al cuerpo principal, mientras que las cargas son la fuerza ejercida directamente por el paciente al elemento en estudio tanto en la flexión como en la extensión (ver Fig. 14).

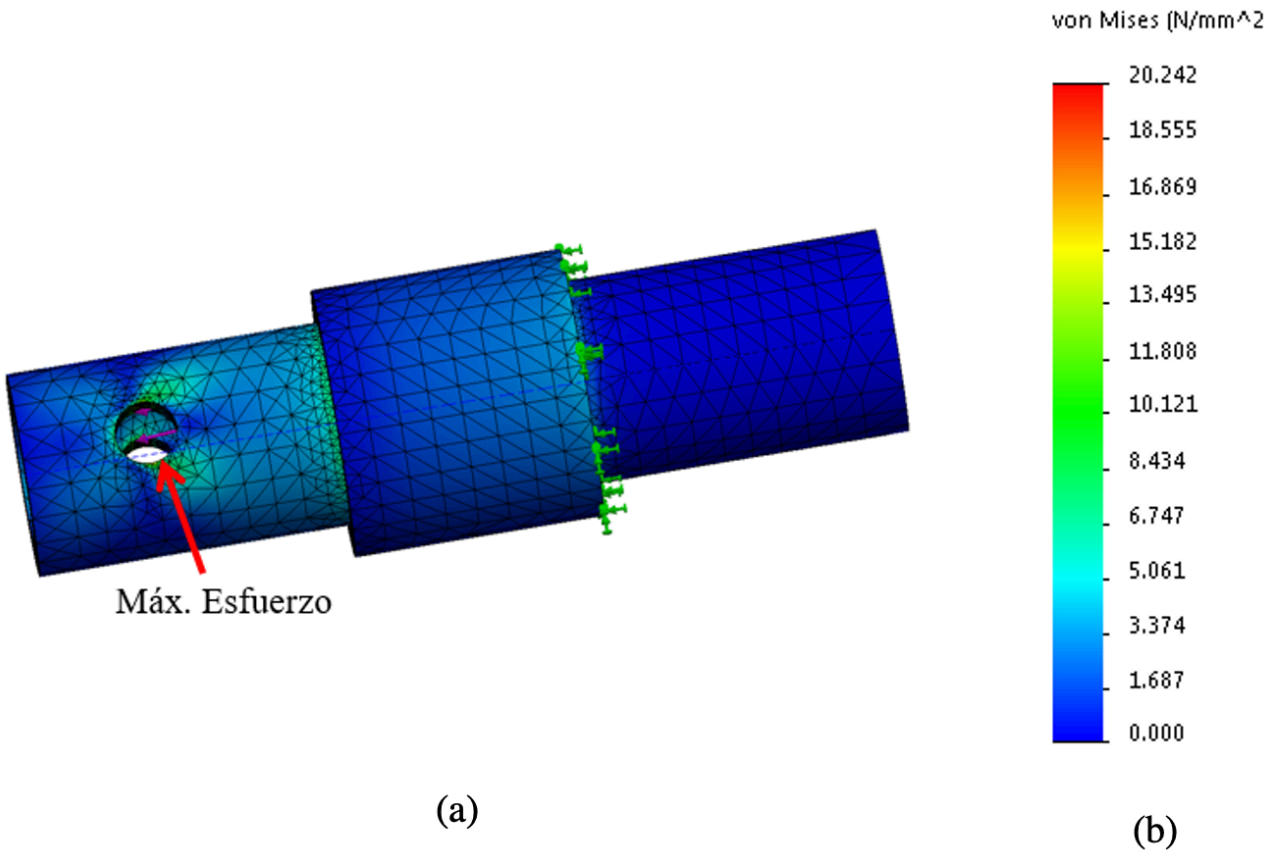



*Fig. 13. Vinculación cuerpo principal a soporte de pie, (a) Condiciones de borde y mallado, (b) Esfuerzo de von Mises (MPa)*

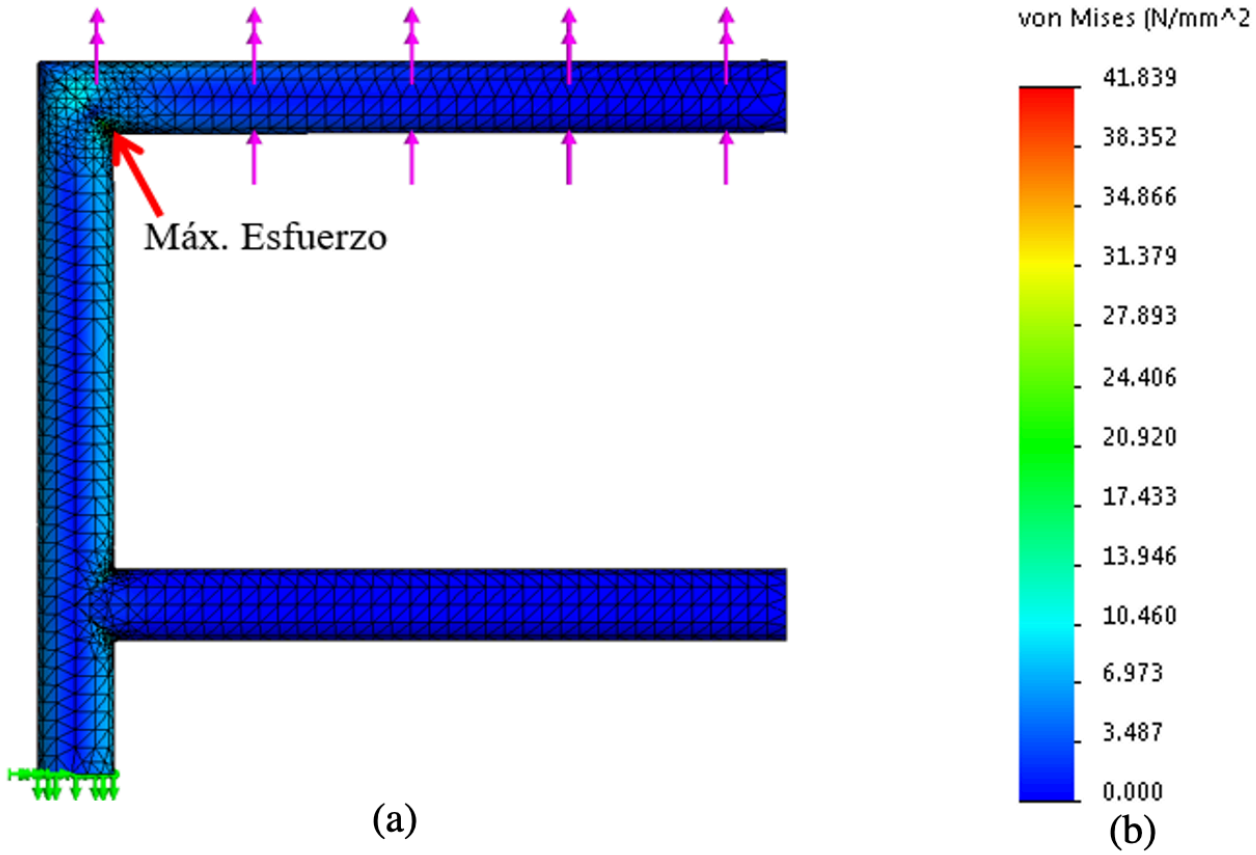



*Fig. 14. Soporte de pie, (a) Condiciones de borde y mallado, (b) Esfuerzo de von Mises (MPa)*

Posterior al análisis de esfuerzo y desplazamiento de todas las piezas que componen el dispositivo, es posible reportar en la Tabla 5 el factor de seguridad para cada uno de los elementos se obtiene que el factor de seguridad (N) de cada uno de los elementos. Se concluye que el factor de seguridad es de 1,4, siendo este el menor valor de la relación entre el esfuerzo de la resistencia de fluencia del material y el esfuerzo de von Mises en cada caso.

**Tabla 5. Momentos asociados a los movimientos de rodilla [8].**

| Elemento | Esfuerzo Máximo (MPa) | Desplazamiento Máximo (mm) | Factor de Seguridad (N) |
|---|---|---|---|
| Asiento | 114,813 | 0,295 | 2,4 |
| Espaldar | 158,64 | 4,26 | 1,73 |
| Brazo recto | 254,104 | 3,754 | 1,4 |
| Corredera principal | 94,553 | 0,003 | 3,7 |
| Barra cremallera | 198,632 | 2,444 | 1,7 |
| Cuerpo principal | 235,085 | 14,658 | 2,2 |
| Vinculación | 20,242 | 0,002 | 17 |
| Soporte de pie | 44,545 | 0,250 | 7,9 |

## Conclusiones y trabajos futuros

El diseño planteado satisface ambas etapas de rehabilitación, la pasiva y la activa, cubriendo las fases de la rehabilitación de rodilla en un solo dispositivo. Así como también permite, durante la etapa activa, realizar el fortalecimiento del cuádriceps y del femoral.

El dispositivo diseñado posee dimensiones que se basan en las características antropométricas de un paciente adulto de 100 kg. El dispositivo no es ajustable a distintas medidas antropométricas, no obstante, se realizó el diseño de tal forma que un amplio rango de paciente con distintas medidas puedan utilizarlo.

El material seleccionado para el mecanismo de barras del rehabilitador es acero AISI 1020, debido a que el mismo ofrece la resistencia requerida para las condiciones de operación del dispositivo de manera segura y adicionalmente ofrece como ventaja su disponibilidad en el país. Mientras que para la estructura del asiento el material seleccionado es el aluminio 6061-T6 debido a que resulta un material más liviano que el acero y aporta la resistencia requerida para este elemento.

Las piezas que componen la solución seleccionada fueron diseñadas y analizadas empleando una herramienta computacional basada en el método de elementos finitos. El estudio se llevó a cabo bajo las condiciones de carga presentes para la máxima extensión, debido a que esta posición resulta la más crítica para la mayoría de las piezas que conforman el dispositivo. Los resultados del estudio arrojan que el factor de seguridad más bajo del modelo es de 1,4 encontrándose el mismo en el brazo recto, siendo este el factor de seguridad de todo el diseño. Debido a que el valor del factor de seguridad de todas las piezas que conforman el rehabilitador de rodilla es mayor a uno (N>1) se considera que presenta un desempeño adecuado para las condiciones a las cuales se encuentra sometido.

Se proyecta, en un trabajo futuro, llevar a cabo el control de los parámetros requeridos tales como la velocidad angular y ángulo de flexo-extensión de la rodilla durante la etapa pasiva.

## Referencias

Cervini, A. Fisioterapiaro. [Entrevista]. 10 Mayo 2015.

Delgado, A. D. Cirugía Ortopédica y Traumatología (2018) Artroplastia de rodilla. Editorial Médica Panamericana.

btlnet, CPMMOTION Web. https://www.btlnet.com/products-physiotherapy-cpmotion (2021). Accedido el 10 de junio de 2020.

Budynas, R. G y Nisbett, K. J. Shigley's Mechanical Engineering Design. (2019) McGraw-Hill Education.

Kapandji, A. I. Fisiología Articular. Tomo 1. Miembro superior (2012) Editorial Médica Panamericana.

Latash, M. L & Zatsiorsky, V. M. Biomechanics and motor control of human movement: Defining Central Concepts. Elsevier (2016).

J. P. y. M. Zelnik, Las dimensiones humanas en los espacios interiores, Barcelona: Editorial G. Gili, S.A. de C.V., 2017.

D. A. Ojeda, Biomecánica del miembro inferior. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela ded Ingeniería Mecánica (2015).

UTN
IBARRA - ECUADOR

Vive
sueña
construye

# FICA

## Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

SCAN ME

Ciencia y técnica
AL
SERVICIO
DEL
PUEBLO