

Athenea

Revista en Ciencias de la Ingeniería

ISSN: 2737-6439

DOI: 10.47460/athenea

Volume 5, Issue 18

December 2024

Published by:

AutanaBooks
Engineering & Science

ATHENEA JOURNAL

JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

Electronic Journal Edited By AutanaBooks

Quarterly Periodicity

Our cover:



Our cover reveals that engineering has infinite applications in modern life and favors the growth and development of societies and nations.

Volume 5 // Issue 18 // Oct-Dec 2024
DOI:10.47460/athenea
ISSN: 2737-6439

Viewing the Journal:

<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

TECHNICAL TEAM

Webmaster and Metadata
Ing. Ángel Lezama (Quito, Ecuador).
a2lezama@gmail.com

Graphic design and layout:
Adrián Hauser
(AutanaBooks, Ecuador).
adrian.hauser@gmail.com

Translator: Fausto Bartolotta
Via Francesco Crispi, 309/A
98028 Santa Teresa Di Riva, Provincia Messina
Italia
[email: fbartolotta@gmail.com](mailto:fbartolotta@gmail.com)

The articles, opinions and collaborations that are published in this journal do not necessarily represent the informative or institutional philosophy of AutanaBooks SAS and may be reproduced with the prior authorization of the Publisher. In case of reproduction, please cite the source and send copies of the medium used to AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

"by the grace of God"

Publisher: Dr. Franyelit Suárez,
<http://orcid.org/0000-0002-8763-5513>
editorial@autanabooks.com
AutanaBooks, Quito, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES
ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Luis Rosales.
Universidad Nacional Experimental Politécnica
"Antonino José de Sucre", Vice Rectorado Puerto Ordaz
luis.rosals2@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7787-9178>
Venezuela.

Dr. José García-Arroyo.
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
jagarcia@uees.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9905-1374>
España

Dr. Valentina Millano.
<https://orcid.org/0000-0001-6138-4747>.
millanov@fing.luz.edu.ve , millanov@gmail.com
Directora. Universidad del Zulia.
Centro de Estudios de Corrosión (CEC).
Venezuela.

PhD. Yajaira Lizeth Carrasco Vega
<https://orcid.org/0000-0003-4337-6684>
ycarrasco@undc.edu.pe
Universidad Nacional de Cañete
Lima, Perú.

Dr. Edwin Flórez Gómez
<https://orcid.org/0000-0003-4142-3985>
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez
edwin.florez@upr.edu
Mayagüez, Puerto Rico

Dr. Hilda Márquez
<https://orcid.org/0000-0002-7958-420X>
Universidad Metropolitana de Quito,
amarquez@umet.edu.ec
Quito, Ecuador

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia
<https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>
dc.moralesu@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato
Ambato, Ecuador

Dr. Hernan Mauricio Quisimain Santamaria
<https://orcid.org/0000-8491-8326>
hernanmquisimalin@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato.
Ambato, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES
ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Hernan Mauricio Quisimain Santamaria
<https://orcid.org/0000-8491-8326>
hernanmquisimalin@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato.
Ambato, Ecuador

Dr. Yelka Martina López Cuadra
<https://orcid.org/0000-0002-3522-0658>
ylopez@unibagua.edu.pe
Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar
Leguía de Bagua
Bagua, Perú

Dra. Irela Perez Magin
<https://orcid.org/0000-0003-3329-4503>
iperezmagin@pupr.edu
Universidad Politécnica de Puerto Rico
San Juan, Puerto Rico

PhD. Alejandro Suarez-Alvites
<https://orcid.org/0000-0002-9397-057X>
alejandrosualvites@hotmail.com
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Peru, Lima

Dr. Neris Ortega
<https://orcid.org/0000-0001-5643-5925>
Universidad Metropolitana de Quito,
Quito, Ecuador
nortega@umet.edu.ec

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez
<https://orcid.org/0000-0002-6413-3457>
jalvarado@unibagua.edu.pe
Universidad Nacional Intercultural Fabiola
Salazar Leguía de Bagua
Bagua-Perú

Mgt. Juan Segura
<https://orcid.org/0000-0002-0625-0719>
juansegura@uti.edu.ec
Universidad Tecnológica Indoamérica
Quito, Ecuador

Dr. Jairo José Rondón Contreras
<https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>
rondonjx@gmail.com/
jairo.rondon@intec.edu.do República
Dominicana

Dr. Angel Gonzalez Lizardo
<https://orcid.org/0000-0002-0722-1426>
Polytechnic University of Puerto Rico
agonzalez@pupr.edu
Puerto Rico, San Juan

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado
<https://orcid.org/0000-0003-2095-5755>
Polytechnic University of Puerto Rico
wfarinascoronado@pupr.edu
Puerto Rico, San Juan

Dra. Diana Cristina Morales Urrutia
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>
dc.moralesu@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato
Ambato-Ecuador

Dr. Carlos Alberto Gómez Cano
<https://orcid.org/0000-0003-0425-7201>
Corporación Unificada Nacional de Educación
Superior – CUN.
carlos_gomezca@cun.edu.co
carlosgomez325@gmail.com
Flores, Caquetá, Colombia.

Mgr. Benjamín David Carril Verastegui
<https://orcid.org/0000-0001-6010-0175>
bcarril@unitru.edu.pe
Universidad Nacional de Trujillo
Trujillo, Perú.

Dr. Luis Concepción Atoche Alcas
I.E. N° 14100 – Paita – Perú.
<https://orcid.org/0000-0003-1454-2129>
luisatochealcas16@gmail.com
Paita-Perú

Dr. Orlando Rafael Gil Rubio
<https://orcid.org/0009-0005-0964-7112>
Universidad Católica Andrés Bello, sede Ciudad
Guayana
orgil@unexpo.edu.ve; orgil@ucab.edu.ve;
ogil07@gmail.com.ve
Puerto Ordaz, Venezuela

Dr. Jesús Ramón López Hercules
Universidad Experimental Politécnica UNEXPO.
<https://orcid.org/0009-0006-4577-6728>
jlopezz@unexpo.edu.ve
Puerto Ordaz, Venezuela.

Content

- 7 Paul Balladares, Angelica Bustos-Estrella, Geovanny Albuja, Miguel Alarcón. ***Avances en tecnologías de drones militares.***
- 19 Alfredo Alejandro Marot Guevara, Sergio Velásquez. ***Diagnosis of low insulation fault in the starting transient of squirrel cage rotor induction motors using wavelet analysis.***
- 33 Angel Lezama. ***Strategies to optimize energy consumption in smart buildings.***
- 46 Adrian David Hauser. ***Gravitational waves: echoes of the universe in motion.***
- 54 Omar Flor. ***The role of advanced materials in flexible electronics.***

Editorial

Engineering is deeply embedded in everyday life, shaping every aspect of our daily lives, from the infrastructure we use to the technologies that facilitate our activities. Engineering solutions not only enable greater efficiency in processes, but also ensure the sustainability of resources and improve our quality of life. Every bridge we cross, every public transport system we use, and every energy network that powers our cities is a tangible testament to human ingenuity applied to solving real problems.

The impact of engineering is not limited to individual solutions; it also plays a crucial role in the growth of cities. Through the design of smart urban systems, such as integrated transportation networks and energy-efficient buildings, engineering contributes to the creation of more sustainable and livable urban environments. These innovations not only optimize the use of resources, but also promote social inclusion by improving accessibility and connecting communities.

At a societal level, engineering is a driving force of development. By addressing complex problems such as access to clean water, waste management, and clean energy generation, engineers are transforming lives and closing inequality gaps. In addition, their involvement in resilient infrastructure projects enables communities to face natural disasters and other challenges with greater adaptive capacity.

In this context, it is vital to recognize the value of engineering as a catalyst for progress. By combining creativity, technical knowledge and ethical commitment, engineers not only solve current challenges, but also pave the way for a more sustainable and equitable future. This edition of our magazine seeks to highlight the contributions of engineering in daily life and its indispensable role in developing stronger and more connected cities and societies.

Dr. Franyelit Suárez



Tipo de artículo: Revisión bibliográfica

Avances en tecnologías de drones militares

Paul Balladares
<https://orcid.org/0000-0003-0855-270X>
ppaulball@gmail.com
Brigada de Fuerzas Especiales Nro. 9 PATRIA
Ejército Ecuatoriano
Quito-Ecuador

Angélica Bustos-Estrella
<https://orcid.org/0000-0002-9975-1335>
angelicab.estrella21@gmail.com
Área de Criminalística,
Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina
Buenos Aires-Argentina

Geovanny Albuja
<https://orcid.org/0009-0003-2239-6747>
geovas.albuja1982@gmail.com
Base de Movilización ORIENTAL
Ejército Ecuatoriano
Quito-Ecuador

Miguel Alarcón
<https://orcid.org/0009-0002-7405-9032>
alarcondiegom77@gmail.com
Cuarta División de Ejército AMAZONAS
Ejército Ecuatoriano
Quito-Ecuador

Correspondence author: ppaulball@gmail.com

Received (10/06/2024), Accepted (6/09/2024)

Resumen: En los últimos años, las tecnologías de drones militares han experimentado un desarrollo acelerado e impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia y precisión en operaciones de defensa y seguridad. En este trabajo se describen los avances más recientes en tecnologías que contribuyen a un mejor desempeño de los drones en la ejecución de sus tareas militares, abordando la participación los sistemas de inteligencia artificial, capacidades de autonomía, mejoras en sensores para drones en misiones tácticas y estratégicas. Los avances tecnológicos han impulsado un aumento significativo en la capacidad operativa y la reducción de riesgos para el personal militar, gracias a la implementación de tecnologías de drones con mayor autonomía y precisión. Los avances en esta área no solo están redefiniendo el panorama de la actividad militar moderno, sino que también plantean nuevos retos en cuanto a regulaciones éticas y control de armas autónomas, lo que sugiere la necesidad de un marco normativo internacional robusto y actualizado.

Palabras clave: dron militar, vehículo autónomo, capacidad de carga, maniobrabilidad.

Advances in military drone technologies

Abstract. - In recent years, military drone technologies have undergone accelerated development driven by the need to improve efficiency and precision in defense and security operations. This paper describes the most recent advances in technologies that contribute to the better performance of drones in the execution of their military tasks, addressing the participation of artificial intelligence systems, autonomy capabilities, and improvements in sensors for drones in tactical and strategic missions. Technological advances have driven a significant increase in operational capability and reduced risks for military personnel, thanks to drone technologies with greater autonomy and accuracy. Advances in this area are redefining the landscape of modern military activity and pose new challenges regarding ethical regulations and autonomous arms control, suggesting the need for a robust and up-to-date international regulatory framework.

Keywords: military drone, autonomous vehicle, payload capacity, maneuverability.



I. INTRODUCCIÓN

Un dron militar es una aeronave no tripulada (UAV, por sus siglas en inglés) diseñada para llevar a cabo una amplia gama de misiones en el ámbito de la defensa y seguridad [1]. A diferencia de los drones civiles, los drones militares suelen estar equipados con capacidades avanzadas para el reconocimiento, la vigilancia y, en muchos casos, el combate. Pueden ser controlados de manera remota por un operador o volar de manera autónoma, dependiendo de su nivel de sofisticación [2]. Estas aeronaves permiten ejecutar operaciones en entornos peligrosos sin poner en riesgo la vida de los pilotos humanos, lo que las convierte en una herramienta esencial para misiones en áreas de conflicto, vigilancia fronteriza y otras operaciones militares críticas [3].

Las tecnologías que emplean los drones militares son variadas y de alta complejidad. Incorporan sistemas avanzados de inteligencia artificial que les permiten tomar decisiones autónomas, navegación por GPS de alta precisión, y sensores como cámaras de alta resolución, infrarrojos y radares para el reconocimiento y la vigilancia [4]. Varios tipos de drones están equipados con sistemas de comunicación encriptados y resistentes a interferencias, lo que les permite operar en entornos hostiles. En drones de combate, también se utilizan tecnologías de armamento guiado por láser o misiles de precisión [5]. La integración de estos sistemas avanzados ha permitido que los drones militares realicen misiones de manera más efectiva, con mayor autonomía y precisión que las plataformas tradicionales. La figura 1 ilustra los componentes primordiales de los drones militares.



Fig1. Componentes básicos de drones militares para su navegación autónoma en operaciones militares.

El uso de drones militares ofrece importantes ventajas, como la reducción de riesgos para los soldados al permitir que se realicen misiones peligrosas sin presencia humana directa [6]. Estos dispositivos son extremadamente eficientes para llevar a cabo operaciones de vigilancia, reconocimiento y combate, con alta precisión gracias a su tecnología avanzada de sensores y sistemas autónomos [7]. Además, la versatilidad de los drones les permite adaptarse a diversos entornos y cumplir múltiples funciones en conflictos y situaciones estratégicas, lo que ha revolucionado las tácticas militares modernas.

El uso de drones militares también plantea varias controversias. En el ámbito ético, existe el debate sobre la responsabilidad en los ataques ejecutados por drones, especialmente cuando se producen errores o daños colaterales [8]. Además, su proliferación entre actores no estatales, como grupos terroristas, representa un desafío global de seguridad. El uso de drones para vigilancia ha planteado preocupaciones sobre la privacidad y los derechos humanos, especialmente cuando se emplean en áreas civiles o en misiones prolongadas [9].

Este artículo presenta en la sección 2 los hallazgos en literatura científica sobre los avances tecnológicos que dan soporte a las operaciones militares con drones, así como las diferentes clasificaciones para los drones desarrollados en la última década. En la sección 3 se describen los lineamientos que se aplicaron según metodología PRISMA® para la realización de este artículo de revisión sistemática. Posteriormente se presentan los resultados y las respectivas conclusiones.

II. DESARROLLO

Dron

Un dron es un vehículo volador que no necesita un piloto a bordo, ya que puede ser controlado a distancia o programado para hacerlo de manera autónoma. Está fabricado con materiales ligeros que le permiten ser ágil en el aire y funciona gracias a motores con hélices o propulsores. Posee un sistema de control que lo mantiene estable y le guía durante sus movimientos, para ellos, los drones llevan cámaras de video, sistemas de posicionamiento global (GPS) y otros sensores que les permiten tomar fotografías, grabar videos, seguir rutas o medir cosas. Los drones se usan en muchísimas áreas, como grabar películas, entregar paquetes, cuidar cultivos, buscar personas en emergencias, para la diversión, y además brindan soluciones para tareas realizadas en el ámbito militar.

Alcance y autonomía de vuelo

El alcance y la autonomía de vuelo en drones se refieren a la distancia máxima que pueden recorrer desde su punto de control y al tiempo que pueden mantenerse en el aire antes de agotar su batería. El alcance depende de la potencia del sistema de comunicación entre el dron y su controlador, pudiendo variar desde unos pocos metros en modelos recreativos hasta varios kilómetros en drones profesionales. Por otro lado, la autonomía está determinada principalmente por la capacidad de la batería y la eficiencia de sus motores, oscilando entre 10 minutos en drones básicos y más de una hora en modelos avanzados. Factores como el peso, las condiciones del viento y el uso de funciones adicionales, como cámaras o luces, también influyen en estos parámetros.

Operaciones militares realizadas con drones

Los drones se han convertido en herramientas clave en operaciones militares debido a su capacidad para realizar tareas de forma remota y minimizar riesgos para los soldados. Estos dispositivos se utilizan para reconocimiento y vigilancia, permitiendo recopilar información en tiempo real sobre movimientos enemigos, terrenos o instalaciones estratégicas. También se emplean en ataques de precisión con misiles guiados, lo que reduce los daños colaterales en comparación con métodos tradicionales. Además, los drones se utilizan para transporte de suministros en zonas de difícil acceso, evaluación de daños tras combates y patrullas fronterizas. Su versatilidad y eficiencia los han posicionado como una tecnología esencial en conflictos modernos.

III. METODOLOGÍA

La revisión sistemática de este artículo se realizó estableciendo un protocolo de revisión, formulando preguntas de investigación y siguiendo la metodología PRISMA®. Se han considerado para esta revisión a documentos publicados en los últimos diez años en revistas científicas y papers de conferencias sobre el tema. La principal pregunta de investigación fue ¿Cuáles tecnologías se han desarrollado para el uso de drones en el ámbito militar en los últimos diez años?

Table 1. Cadenas de texto utilizadas para la búsqueda de la literatura científica.

Base de datos	Cadena de búsqueda	Número de estudios
Web of Science	military drones (Author Keywords) and 2024 or 2023 or 2022 or 2021 or 2020 or 2019 or 2018 or 2017 or 2016 or 2015 (Publication Years)	80
Taylor & Francis	[Publication Title: military] AND [Publication Title: drones] AND [Publication Date: (01/01/2014 TO 12/31/2024)]	11
Scopus	TITLE (military AND drones) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025	95
Science direct	Title, abstract, keywords:military drones	11
IEEE xplore	("Document Title":military) AND ("Document Title":drones)	18
Número total de estudios		215

El desarrollo de esta revisión de literatura se llevó a cabo en tres etapas: la formulación de las preguntas de investigación, la delimitación del alcance y la creación de una estrategia de búsqueda integral para recuperar todos los documentos relevantes. Se seleccionaron los artículos con mayor relevancia y se aplicó un proceso de extracción y revisión de datos.

El primer objetivo de esta investigación fue conocer los avances en tecnologías aplicadas a drones que se desempeñan en el ámbito militar. Para extraer la información de los documentos de referencia, se plantearon las siguientes preguntas de investigación (RQ). RQ1. ¿Cuáles tecnologías se han implementado en drones militares en los últimos cinco años? RQ2. ¿Cuál es el impacto del uso de drones y sus tecnologías en las tareas militares? RQ3. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas en el uso de drones en el ámbito militar? RQ4. ¿Cuáles son las implicaciones éticas en torno al uso de drones en el ámbito militar? RQ5. ¿Cuáles son las perspectivas que se tienen para el futuro sobre el uso de drones en tareas militares? Los criterios para evaluar la calidad de los artículos científicos se aplicaron las preguntas descritas en la (Tabla 2).

Tabla 2. Preguntas de evaluación de calidad de los documentos de referencia.

Preguntas de evaluación de calidad	Respuesta
¿El artículo describe tecnologías desarrolladas e implementadas en drones para mejorar las tareas militares?	(+1) Sí / (+0) No
¿El documento aborda los impactos de las tecnologías en el desempeño de los drones para tareas militares?	(+1) Sí / (+0) No
¿El documento describe implicaciones éticas planteados y controversias sobre el uso de drones en el ámbito militar?	(+1) Sí / (+0) No
¿La revista o congreso en el que se publicó el artículo? publicado indexado en SJR?	(+1) si ocupa el puesto Q1, (+0,75) si ocupa el puesto Q2, (+0,50) si ocupa el puesto Q3, (+0,25) si ocupa el puesto Q 4, (+0,0) si no está clasificado

La Figura 2 muestra el flujo de trabajo en la selección de los documentos de referencia cuya búsqueda se realizó con las palabras: "military drones". La búsqueda fue realizada en bases y repositorios científicos. Se incluyeron documentos que destacaron desarrollos que se han incorporado en los drones militares en los últimos diez años. Se excluyeron documentos que abordaron el desarrollo de algoritmos, técnicas de control, modelamiento y simulación desarrolladas para los drones militares.

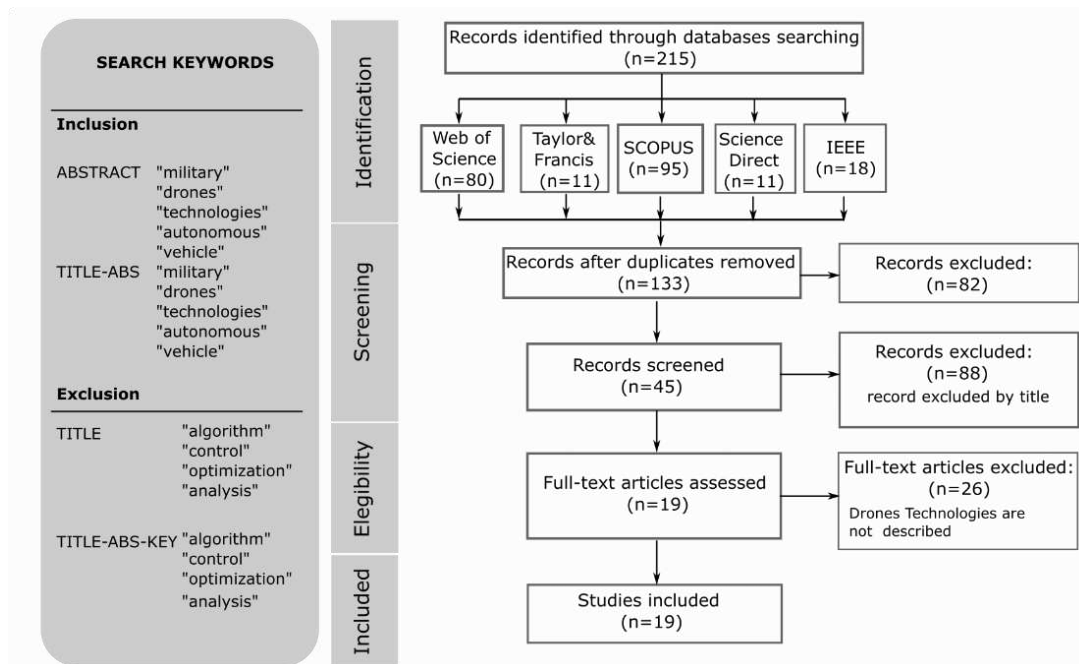


Fig. 2. Flujo de trabajo de la revisión sistemática utilizando los lineamientos de la metodología PRISMA®.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan los avances tecnológicos que dan soporte a las operaciones militares con drones, así como se ilustran las múltiples configuraciones de drones de carácter militar que se han desarrollado y se presentan clasificadas con múltiples criterios en la figura 3. Existe una considerable variedad de modelos de drones de distintas dimensiones en su mayoría diseñados para tareas de vigilancia [10]. Los modelos y referencia de sus escalas reales para identificar sus dimensiones se pueden apreciar en la Figura 2.

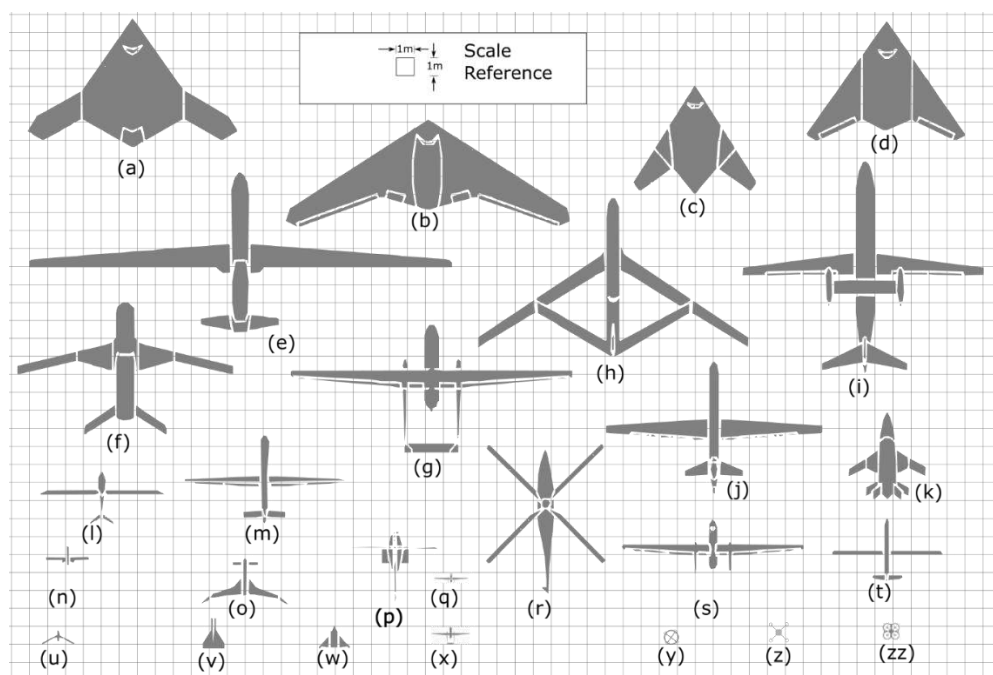


Fig. 2. Drones para tareas militares, (a)X-47B, (b) Sentinel, (c)nEUROn, (d) X-45C, (e) Global Hawk, (f) Avenger, (g) Heron TP/Eitan, (h)Soar Dragon, (i) Mantis, (j) Reaper, (k) Barracuda, (l) Herti, (m) Falcao, (n) Shadow, (o) Rustom I, (p) Fire scout, (q) WASP III, (r) Hummingbird, (s) Heron, (t) Hermes, (u) Scan Eagle, (v) Harpy, (w) Killer bee, (x) Raven, (y) Air robot, (z) Aeryon Scout, (zz) AR Parrot.

A. Avances tecnológicos que dan soporte a operaciones militares con drones

La investigación sobre drones militares ha crecido significativamente en los últimos años, impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa en el campo de batalla y minimizar los riesgos para el personal militar. Los drones, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), han transformado las tácticas militares modernas al proporcionar una herramienta versátil que puede realizar misiones de vigilancia [2], reconocimiento, ataque de precisión y logística en zonas de conflicto [4].

Avances en inteligencia artificial y autonomía

Uno de los desarrollos más importantes en la investigación de drones militares es la integración de inteligencia artificial (IA) avanzada. Los drones equipados con IA pueden operar de manera autónoma, tomar decisiones en tiempo real [11] y adaptarse a cambios en el entorno del campo de batalla sin intervención humana constante. Esto ha permitido una mayor precisión en la identificación de amenazas y objetivos, mejorando la eficacia de los ataques y reduciendo el riesgo de errores [12]. Los avances en IA también están habilitando el uso de enjambres de drones, donde múltiples UAV operan en conjunto para realizar misiones complejas de manera coordinada. Esta capacidad de actuar como un equipo sincronizado es clave para misiones de vigilancia a gran escala y ataques múltiples simultáneos.

Tecnología de enjambres y operaciones coordinadas

La investigación ha mostrado un interés creciente en la aplicación de tecnología de enjambres en drones militares [13]. Este enfoque implica el uso de varios drones que trabajan en conjunto para realizar misiones coordinadas, lo que proporciona una ventaja táctica significativa. Los enjambres pueden abarcar grandes áreas de terreno, coordinar ataques desde múltiples ángulos y ofrecer una redundancia que garantiza que una misión pueda completarse incluso si uno o más drones fallan [14]. Estas tecnologías se basan en sistemas de comunicación avanzados y algoritmos de toma de decisiones colaborativos que permiten a los drones ajustarse a las condiciones cambiantes del campo de batalla sin intervención humana.

Mejoras en sigilo y defensa contra la detección

A medida que los adversarios desarrollan sistemas de defensa aérea más avanzados, los drones militares están siendo diseñados con capacidades furtivas mejoradas. Estas características incluyen la reducción de las firmas de radar y térmicas, lo que permite que los drones evadan la detección y penetren en territorios fuertemente defendidos [15]. Esta capacidad de sigilo es crucial para misiones de reconocimiento profundo y ataques en áreas con defensas antiaéreas avanzadas. Además, se ha investigado el uso de materiales absorbentes de radar y estructuras aerodinámicas que minimizan las emisiones detectables por sensores adversarios.

Extensión del alcance y la autonomía

Otro aspecto clave en la investigación de drones militares es el desarrollo de tecnologías para aumentar el rango operativo y la duración de las misiones [16]. Los avances en sistemas de propulsión y tecnologías energéticas, como la recolección de energía mediante paneles solares o sistemas de recuperación de energía cinética, están permitiendo a los drones operar durante períodos más largos y cubrir distancias mayores sin necesidad de reabastecimiento constante [2]. Esto es especialmente importante para misiones de vigilancia prolongada y operaciones en áreas de difícil acceso donde el apoyo logístico es limitado.

Ciberseguridad y contramedidas

Dado el aumento en el uso de drones, la ciberseguridad se ha convertido en un área crítica de investigación [17]. Los drones militares son vulnerables a los intentos de hackeo y manipulación por parte de adversarios, lo que ha llevado al desarrollo de sistemas de seguridad cibernética robustos para proteger los enlaces de comunicación y los sistemas de control [18]. Además, la investigación también se ha centrado en desarrollar contramedidas antidron para proteger a las fuerzas militares de las amenazas de drones hostiles. Estas incluyen sistemas de interferencia y destrucción de drones no autorizados que puedan representar un peligro para las operaciones militares. La investigación sobre drones militares abarca una amplia gama de áreas tecnológicas que incluyen IA, tecnología de enjambres, sigilo, extensión del alcance y ciberseguridad. Estos avances están transformando las capacidades militares y redefiniendo las tácticas en el campo de batalla moderno [19].

Ventajas del uso de drones militares

La Figura 3 presenta de manera gráfica las ventajas del uso de drones militares en múltiples aspectos relacionado con las actividades militares. El empleo de drones impacta de forma directa de manera positiva en múltiples procesos optimizando el uso de recursos, tiempo y eficacia y ampliando el alcance en los resultados obtenidos.

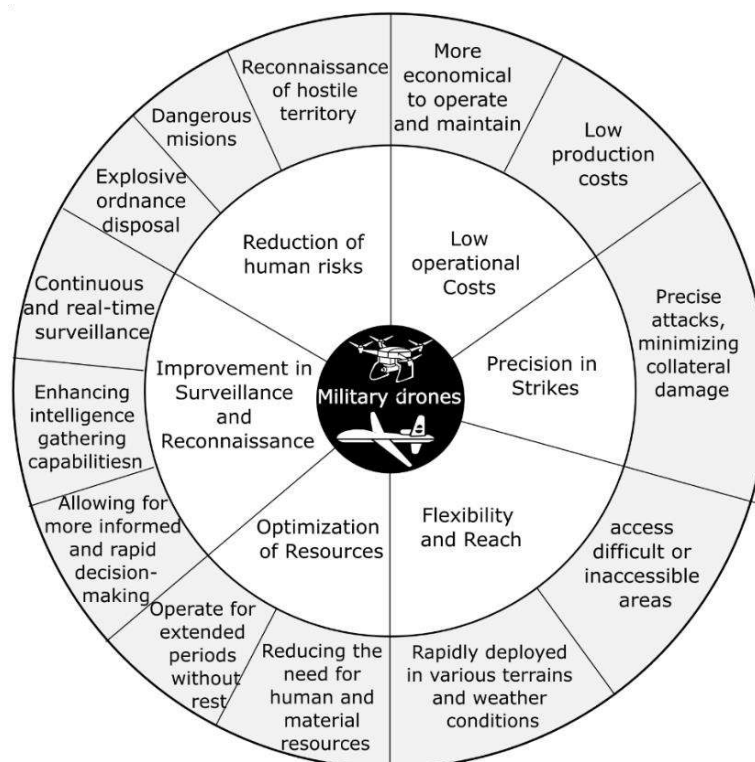


Fig. 3. Ventajas del uso de Drones militares.

B. Clasificaciones de los tipos de drones

Las tecnologías abordadas en la sección A junto a las ventajas presentadas en la Figura 3, se han aprovechado a múltiples aplicaciones para los drones militares y que se pueden clasificar de forma extensa en la figura 4 en la que se ha subcategorizado los tipos de drones considerando criterios de función, tamaño, tipo de plataforma, nivel de autonomía, rol específico y tecnologías de detección. Con respecto a las funciones desempeñadas por los drones se ha identificado el uso de drones para fines de guerra electrónica, apoyo logístico, vigilancia, ataque y reconocimiento.

El tamaño del dron (Figura 4) se ha considerado en tres categorías Grandes, tamaño medio, microdrones. Evidentemente los drones de mayor tamaño son susceptibles de una mayor capacidad de carga, lo que los vuelve adecuados para su empleo en misiones como Ataque o asalto, en tanto que, los drones de tamaño medio a menudo son utilizados en operaciones de vigilancia y ataques breves. Los microdrones son más empleados en operaciones de reconocimiento y espionaje táctico.

La plataforma empleada en los drones permite clasificarlos en drones de ala fija, multirrotores e híbridos. La ventaja de los drones de ala fija es un mayor aprovechamiento de la energía lo cual le permite vuelos de reconocimiento de largo alcance (mapeo y topografía). Los drones multirrotores aparte de las tareas que realizan los drones de ala fija, también se han empleado en operaciones de ataque. Finalmente, los drones híbridos han resultado más adecuados para misiones de reconocimiento y ataques. El nivel de autonomía es un criterio muy importante en el desempeño de los drones militares, existen tres categorías fundamentales: Controlados remotamente, autónomos y semiautónomos.



Fig. 4. Clasificación de los tipos de drones según múltiples criterios.

C. Aspectos éticos sobre el uso de dron de militares

El uso de drones militares plantea importantes cuestiones éticas, derivadas de su capacidad para realizar misiones de vigilancia y ataques letales a distancia. Uno de los principios clave en su uso es la proporcionalidad, que exige que la fuerza utilizada en las operaciones sea proporcional a la amenaza enfrentada. Los drones han sido defendidos como herramientas que permiten reducir el daño colateral debido a su precisión, sin embargo, los errores en la identificación de objetivos han generado críticas por las bajas civiles que han provocado. Estos sistemas son más efectivos en la distinción entre combatientes y no combatientes, pero la incertidumbre en tiempo real sobre la información recopilada puede comprometer estos principios éticos.

La deshumanización del conflicto es uno de los puntos más polémicos del uso de drones. Debido a que los operadores de drones no están físicamente presentes en el campo de batalla, existe una desconexión emocional entre las acciones militares y las consecuencias humanas. Algunos argumentan que esta distancia reduce la responsabilidad moral de los operadores, y facilita la aceptación de la violencia militar por parte de los gobiernos y la opinión pública, ya que se reduce el riesgo para los soldados. No obstante, los defensores de los drones sostienen que su uso permite decisiones más objetivas, ya que los operadores no están sometidos al estrés del combate. Este dilema entre la despersonalización de la guerra y la eficiencia operativa sigue siendo un tema central en el debate ético.

Otro desafío importante es el uso de drones autónomos. Con los avances en inteligencia artificial, se ha planteado la posibilidad de que los drones puedan tomar decisiones letales sin intervención humana directa, lo que genera profundas preocupaciones éticas. Aunque las máquinas pueden tomar decisiones basadas en datos, la delegación de la capacidad de matar a un sistema autónomo plantea preguntas sobre la responsabilidad y las consecuencias en caso de errores. La falta de capacidad moral en las máquinas y la posibilidad de fallos técnicos son cuestiones críticas que deben abordarse antes de implementar drones completamente autónomos en escenarios de combate.

La falta de transparencia en las operaciones con drones y la supervisión legal inadecuada son factores que agravan los dilemas éticos. Las decisiones sobre los objetivos y los resultados de las misiones a menudo se mantienen en secreto, lo que socava la rendición de cuentas y la confianza pública. La ausencia de regulaciones internacionales claras sobre el uso de drones militares aumenta el riesgo de abusos. Por tanto, para garantizar un uso ético de los drones, es fundamental que se establezcan normas globales y mecanismos de supervisión robustos que protejan los derechos humanos y limiten el uso desproporcionado de la fuerza.

D. Discusión

Los drones militares están experimentando avances tecnológicos significativos que prometen transformar el panorama de la guerra moderna. La integración de inteligencia artificial avanzada permitirá una autonomía mayor, facilitando decisiones en tiempo real y aumentando la precisión de las misiones. Además, la tecnología de enjambre permitirá a múltiples drones operar de manera coordinada para realizar tareas complejas con mayor eficiencia. Los avances en sensores, como los de alta resolución y multispectrales, mejorarán la recolección de datos en condiciones adversas, mientras que los nuevos materiales y diseños harán a los drones más ligeros, duraderos y sigilosos. Las innovaciones en energía, incluyendo baterías eficientes y fuentes alternativas como la solar, extenderán el rango y la duración de las operaciones de los drones.

Sin embargo, estos avances también conllevan desafíos significativos. La creciente autonomía y conectividad de los drones intensificarán las preocupaciones sobre la seguridad cibernética, haciendo esencial proteger contra hackeos y guerra electrónica. Además, el uso de drones en operaciones letales plantea cuestiones éticas y legales sobre la toma de decisiones autónoma y su conformidad con el derecho humanitario. Aunque la precisión mejorada podría reducir las bajas civiles, también es crucial considerar el impacto humanitario de los drones, tanto en conflictos como en misiones de ayuda. A medida que la tecnología de drones sigue avanzando, es vital abordar estos desafíos para asegurar que los beneficios sean maximizados y los riesgos minimizados.

CONCLUSIONES

Los avances en los drones militares han mejorado significativamente la eficiencia y precisión de las operaciones militares, permitiendo la ejecución de misiones complejas con menores riesgos para los soldados y un uso más controlado de la fuerza. Estos sistemas no tripulados, apoyados por tecnologías de inteligencia artificial (IA) y sensores avanzados, pueden realizar tareas de vigilancia en tiempo real durante periodos prolongados sin la fatiga humana, proporcionando información detallada y en directo sobre zonas de conflicto. Esto ha permitido a los ejércitos realizar ataques quirúrgicos con una precisión sin precedentes, reduciendo los daños colaterales y minimizando las bajas civiles. Además, la capacidad de integrar IA para el análisis de datos masivos obtenidos por estos drones ha incrementado exponencialmente la velocidad y exactitud con que se procesan las imágenes y otros tipos de inteligencia, mejorando la capacidad de respuesta frente a amenazas en tiempo real. El desarrollo de drones autónomos, equipados con sistemas de autoaprendizaje y capacidad para tomar decisiones tácticas, representa un salto cualitativo hacia la futura guerra automatizada, donde los seres humanos podrían desempeñar un rol más distante en la toma de decisiones.

A pesar de los avances tecnológicos que los drones militares han alcanzado, su despliegue en el campo de batalla ha planteado numerosos desafíos éticos y legales que siguen siendo objeto de debate en la comunidad internacional. Uno de los principales problemas es la falta de regulación clara sobre el uso de drones en situaciones de guerra, lo que abre la puerta a la posibilidad de abusos de poder y violaciones de los derechos humanos. Las operaciones no tripuladas, aunque eficaces desde el punto de vista militar, pueden deshumanizar el conflicto, donde las decisiones de vida o muerte se toman desde una distancia segura, lo que podría reducir la responsabilidad moral de los actores implicados. El uso de drones armados en ataques a objetivos terroristas ha suscitado controversia por la falta de transparencia en los criterios para seleccionar blancos y la falta de supervisión judicial o política. A medida que los drones se vuelven más autónomos, la cuestión de si las máquinas deben tener la capacidad de tomar decisiones letales sin intervención humana plantea preocupaciones profundas sobre la responsabilidad y las leyes de la guerra. Por último, existe el riesgo de que estas tecnologías sean accesibles para actores no estatales o grupos terroristas, lo que podría desestabilizar aún más las relaciones internacionales y aumentar el riesgo de conflictos armados no convencionales.

REFERENCIAS

- [1] H. Han, «Analysis of the Status of Basic Industries in Military Drone», *The journal of the convergence on culture technology*, vol. 6, n.º 4, pp. 493-498, nov. 2020, doi: 10.17703/JCCT.2020.6.4.493.
- [2] «The Future of Military Drones: Advancements and Innovations - Defence Agenda». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://defenceagenda.com/the-future-of-military-drones/>
- [3] R. Steen, N. Håheim-Saers, y G. Aukland, «Military unmanned aerial vehicle operations through the lens of a high-reliability system: Challenges and opportunities», *Risk Hazard & Crisis Pub Pol*, vol. 15, n.º 3, pp. 347-373, sep. 2024, doi: 10.1002/rhc3.12279.

- [4] I. Marzaki, A. A. Supriyadi, y S. Arief, «Leveraging drone technology for advancements in photogrammetry, remote sensing, and military intelligence: a review», *RSTDE*, vol. 1, n.º 1, pp. 1-9, feb. 2024, doi: 10.61511/rstde.v1i1.2024.840.
- [5] M. J. Guitton, «Fighting the Locusts: Implementing Military Countermeasures Against Drones and Drone Swarms», *Scandinavian Journal of Military Studies*, vol. 4, n.º 1, pp. 26-36, ene. 2021, doi: 10.31374/sjms.53.
- [6] A. Jackman, «'Manning' the 'unmanned': Reapproaching the military drone through learning the/to drone», *Political Geography*, vol. 104, p. 102894, jun. 2023, doi: 10.1016/j.polgeo.2023.102894.
- [7] A. Jackman, «Drone sensing volumes», *Geographical Journal*, vol. 189, n.º 3, pp. 501-513, sep. 2023, doi: 10.1111/geoj.12517.
- [8] P. Burt, «Out of Sight, Out of Mind? Ethical Issues Relating to the Use of Autonomous Armed Drones in Promotional Videos», *Journal of War & Culture Studies*, vol. 15, n.º 4, pp. 388-407, oct. 2022, doi: 10.1080/17526272.2022.2119662.
- [9] J. D. Schnepf, «Military Technologies and Human Labor», *American Literature*, vol. 95, n.º 2, pp. 351-363, jun. 2023, doi: 10.1215/00029831-10575134.
- [10] «Drone Survival Guide». Accedido: 18 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.dronesurvivalguide.org/>
- [11] D. Caballero-Martin, J. M. Lopez-Guede, J. Estevez, y M. Graña, «Artificial Intelligence Applied to Drone Control: A State of the Art», *Drones*, vol. 8, n.º 7, p. 296, jul. 2024, doi: 10.3390/drones8070296.
- [12] I. Jeelani y M. Gheisari, «Safety Challenges of Human-Drone Interactions on Construction Jobsites», en *Automation and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry*, H. Jebelli, M. Habibnezhad, S. Shayesteh, S. Asadi, y S. Lee, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 143-164. doi: 10.1007/978-3-030-77163-8_7.
- [13] Z. Xiaoning, «Analysis of military application of UAV swarm technology», en *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, Harbin, China: IEEE, nov. 2020, pp. 1200-1204. doi: 10.1109/ICUS50048.2020.9274974.
- [14] G. S. Kim, S. Lee, T. Woo, y S. Park, «Cooperative Reinforcement Learning for Military Drones over Large-Scale Battlefields», *IEEE Trans. Intell. Veh.*, pp. 1-11, 2024, doi: 10.1109/TIV.2024.3472213.
- [15] H. Wang, Q. Shen, Z. Deng, Y. Guo, y S. Zhang, «A Joint Detection Method for Military Targets and Their Key Parts for UAV Images», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1-15, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3460951.
- [16] C. Oliveros-Aya, «Artificial intelligence in drones and robots for war purposes: a biolegal problem», *JANUS NET*, vol. 14, n.º 2, nov. 2023, doi: 10.26619/1647-7251.14.2.5.
- [17] A. E. Omolara, M. Alawida, y O. I. Abiodun, «Drone cybersecurity issues, solutions, trend insights and future perspectives: a survey», *Neural Comput & Applic*, vol. 35, n.º 31, pp. 23063-23101, nov. 2023, doi: 10.1007/s00521-023-08857-7.
- [18] W. F. Lawless, «Risk determination vs risk perception: From hate speech, an erroneous drone attack, and military nuclear wastes to human-machine autonomy», en *Putting AI in the Critical Loop*, Elsevier, 2024, pp. 21-40. doi: 10.1016/B978-0-443-15988-6.00001-7.
- [19] M. Ünsaldı, «The Future of Military Drones: Advancements and Innovations», *Defence Agenda*. Accedido: 23 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://defenceagenda.com/the-future-of-military-drones/>

LOS AUTORES



Paul Balladares, Mayor e Ingeniero Militar de la Brigada No. 17 "PASTAZA", Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo, Licenciado en Ciencias Militares de la Universidad del Fuerzas Armadas ESPE, Magíster en Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional EPN, Diplomado en Modelación Hidráulica e Hidrológica por CIDHMA Capacitación Perú.



Angélica Bustos-Estrella es Licenciada en Criminalística por el Instituto Universitario de la Ciudad, ubicado en Buenos Aires, Argentina. Además, posee el título de Técnica Superior en Criminalística de Campo y Escopometría, obtenido en el Instituto Superior de Seguridad Pública de Buenos Aires. Es también Perita en Papiloscopía, formación que completó en el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina. Asimismo, ha obtenido el título de Técnica Universitaria en Balística y Armas Portátiles, en el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina, también en Buenos Aires, Argentina.



Geovanny Rolando Albuja Ruales, Mayor de Infantería comandante de la Base de Movilización "Oriental" del CC.FF.AA. Licenciado en Ciencias Militares Escuela Superior Politécnica del Ejército Ecuador. Cursante Maestría en Gestión de TT. HH, Universidad Yacambú Venezuela. Curso de Liderazgo EE UU. Área de investigación: sistema de inteligencia militar, pedagogía, idiomas y recursos humanos.



Diego Miguel Alarcón Salazar, Capitán de Artillería. Licenciado en Ciencias Militares Escuela Superior Militar Eloy Alfaro Ecuador. Máster en Gerencia de Seguridad y Riesgos Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Diplomado en Gestión del Riesgo Organizacional Colombia. Diplomado de Liderazgo y Productividad Colombia. Curso de Reconocimiento de Largo Alcance Ecuador. Área de investigación: Seguridad Física, Personal y Prospectiva, Geopolítica, Estrategia y Tecnología Militar.

Tipo de artículo: artículo de investigación

Diagnosis of low insulation fault in the starting transient of squirrel cage rotor induction motors using wavelet analysis

Alfredo Marot

<https://orcid.org/0000-0002-8829-4124>

aamarotgu@estudiante.unexpo.com

Universidad de Oriente núcleo Anzoátegui

Barcelona, Venezuela

Sergio Velásquez

<https://orcid.org/0000-0002-3516-4430>

velasquez@unexpo.edu.ve

UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz

Puerto Ordaz, Venezuela

Correspondence author: aamarotgu@estudiante.unexpo.com

Received (12/07/2024), Accepted (15/09/2024)

Abstract. - The objective of this work was to diagnose faults in squirrel-cage induction motors during the startup transient, by analyzing the stator current signal. To achieve this, low- and medium-voltage motors were modeled in Simulink using MATLAB. Previously, the fault due to low insulation was diagnosed through a static test. It was demonstrated that, during the startup transient, the low insulation fault manifests through a Daubechies wavelet analysis at level 8 of the current signal. The fault was identified in the detail levels 1, 2, 5, 6, 7, and 8, for both low-voltage and medium-voltage motors.

Keywords: wavelet, daubechies, isolation.

Diagnóstico de falla de bajo aislamiento en el transitorio de arranque de motores de inducción con rotor jaula de ardilla mediante análisis de wavelet

Resumen: El objetivo de este trabajo fue diagnosticar fallas en motores de inducción con rotor de tipo jaula de ardilla durante el transitorio de arranque, mediante el análisis de la señal de corriente del estator. Para ello, se modelaron motores de baja y media tensión en Simulink, utilizando MATLAB. Previamente, la falla por bajo aislamiento fue diagnosticada mediante prueba estática. Se demostró que, durante el transitorio de arranque, la falla de bajo aislamiento se manifiesta a través de un análisis de wavelet Daubechies de nivel 8 aplicado a la señal de corriente. La falla se evidenció en los niveles de detalle 1, 2, 5, 6, 7 y 8, tanto en motores de baja tensión como en motores de media tensión.

Palabras clave: wavelet, daubechies, aislamiento.

I. INTRODUCTION

Induction Motors (IMs), with capacities ranging from a few watts to megawatts, are employed as prime movers and play a fundamental role in today's industries [1]. Due to their robustness, reliability, and low maintenance costs, IMs have received increasing attention in the automotive industry, electric vehicle traction, and power conversion systems [1]. Induction machines are gaining popularity in renewable energy applications, which demands constant research on their performance. The lack of regulation of failures in processes causes considerable economic losses and degrades process performance [2]. Induction motors are put to the test in a variety of circumstances and environments. Motor failure implies unwanted downtime, costly repairs, and in some cases, can even lead to casualties [3].

Motor current analysis is a valuable tool for the detection and diagnosis of faults in induction motors. This technique allows to prevent breakdowns, reduce maintenance costs, and improve the safety of facilities. Motor current signature analysis (MCSA) is considered the most common technique for fault analysis [4]. The phase current signal contains components that depend on the motor's operation, a product of the rotating flux. The appearance of faults causes changes in the supply current with specific harmonic content that depend on the type of fault. The MCSA technique uses stator current measurements to detect these harmonics, and although they are not desired, they are used for fault analysis. MCSA provides current spectra with information to detect electrical and mechanical faults. Current measurements in a three-phase induction motor can only be performed at specific times. The usual approach is to measure the current during motor operation, as it is the simplest way to do so and provides input data of sufficient quality. This technique is used by most condition monitoring methods. On-line current measurements can be divided into two types: with load and without load. Another convenient time for current signal monitoring is within the startup window [5].

Starting currents can offer better options for motor condition analysis, as they are measured at higher motor slip and with a higher signal-to-noise ratio. This facilitates the detection and evaluation of the spectral components of the signal. The most frequent causes of induction motor failures are winding and insulation problems, accounting for between 30% and 40% of total failures [6]. Insulation failures are responsible for 80 to 90% of this percentage. For medium voltage drives [7]. Stator inter-turn short circuit (ITSC), present in approximately 40% of induction motor (IM) failures, is a common defect in these machines. While a few shorted turns do not usually show any noticeable physical signs, they can cause considerable damage to the insulation in a short period of time [8]. Early detection of this fault can minimize further damage to adjacent turns and the stator core, which would reduce maintenance costs and motor downtime [9]. Most insulation faults affecting induction motors occur between phase and ground. Common practices for assessing insulation condition require the motor to be stopped and cannot provide information about the degrading agent affecting the motor [10].

An ITSC fault creates harmonic frequency components in the motor current. The magnitude and frequency of these harmonics change continuously with load variations. To accurately identify faults in induction motors (IMs), cutting-edge techniques have been developed that extract telltale features from current signals. Among the most notable tools are; Fast Fourier Transform (FFT): This technique decomposes the current signal into its frequency components, revealing unique patterns associated with different types of faults; Short Time Fourier Transform (STFT): Unlike FFT, STFT analyzes the current signal in shorter segments, providing a more detailed view of how faults evolve over time; Power Spectral Density (PSD): This technique quantifies the distribution of energy in the frequency spectrum, allowing the presence and severity of faults to be identified with greater precision. Traditional fault diagnosis techniques in induction motors, based on steady-state current, have limitations such as sensitivity to operating conditions and difficulty in detecting incipient faults. One of the most important analysis tools in both the frequency and time domains is the wavelet.

Multiresolution analysis and good time localization make wavelets very attractive for fault diagnosis research. Wavelets are localized in both the time and frequency domains because they have limited time duration and frequency bandwidth [11].

II. DEVELOPMENT

A. Mathematical model of the induction motor in the reference frame fixed to the rotor.

The Simulink block used in this study, implements equations that are expressed in a stationary rotor (dq) reference frame. The d axis is aligned with an axis. All quantities in the rotor reference frame are referred to the stator [12].

Equations to calculate electrical speed (ω_{em}) and sliding speed (ω_{slip}).

$$\omega_{em} = P\omega_m \quad (1)$$

$$\omega_{slip} = \omega_{sym} - \omega_{em} \quad (2)$$

To calculate the electrical speed of the rotor dq with respect to the rotor axis A (dA), the difference between the speed of the shaft and the stator is used (da) and sliding speed:

$$\omega_{dA} = \omega_{da} - \omega_{em} \quad (3)$$

o simplifies the equations for flux, voltage and current transformations, the block uses a stationary reference frame:

$$\omega_{da} = 0 \quad (4)$$

$$\omega_{dA} = -\omega_{em} \quad (5)$$

Flow

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \\ \lambda_{rd} \\ \lambda_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Current

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{L_m^2 - L_r L_s} \right) \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \\ \lambda_{rd} \\ \lambda_{rq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Inductance

$$\begin{aligned} L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{rs} + L_m \end{aligned} \quad (8)$$

Electromagnetic torque

$$T_e = PL_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \quad (9)$$

Invariant power dq transformation to ensure dq and three-phase powers are equal

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}) & \cos\left(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{da}) & -\sin\left(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}) & -\sin(\theta_{da}) \\ \cos\left(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

The equations use these variables

ω_m : Rotor angular speed (rad/s)
 ω_{em} : Electric rotor speed (rad/s)
 ω_{slip} : Electric rotor sliding speed (rad/s)
 ω_{syn} : Synchronous rotor speed (rad/s)
 ω_{da} : dq electrical speed of the stator with respect to the axis a of the rotor (rad/s)
 ω_{dA} : dq electrical speed of the stator with respect to the rotor axis A (rad/s)
 Θ_{da} : dq electrical angle of the stator with respect to the a axis of the rotor (rad)
 Θ_{dA} : dq electrical angle of the stator with respect to the A axis of the rotor (rad)
 L_q, L_d : Inductances of the q and d axes (H)
 L_s : stator inductance (H)
 L_r : rotor inductance (H)
 L_m : Magnetizing inductance (H)
 L_{ls} : Stator leakage inductance (H)
 L_{lr} : Rotor leakage inductance (H)
 v_{sq}, v_{sd} : Stator voltages on the q and d axes (V)
 i_{sq}, i_{sd} : Stator currents in the q and d axes (A)
 $\lambda_{sq}, \lambda_{sd}$: Stator flow in the q and d axes (Wb)
 i_{rq}, i_{rd} : Rotor currents in the q and d axes (A)
 $\lambda_{rq}, \lambda_{rd}$: Rotor q and d axis flow (Wb)
 v_a, v_b, v_c : Stator voltage phases a, b, c (V)
 i_a, i_b, i_c : Stator currents phases a, b, c (A)
 R_s : Resistance of stator windings (Ohm)
 R_r : Rotor winding resistance (Ohm)
 P : Number of pole pairs
 T_e : electromagnetic torque (Nm)

A. Wavelet transforms

The wavelet transform (WT) is a signal analysis technique that solves the time-frequency resolution problems of the Fourier transform. The WT is based on a function called the wavelet mother function, which is used to decompose the signal into sub-bands. Wavelet functions can be classified into families, and the choice of the appropriate family depends on the characteristics of the signal to be studied. The most used wavelet functions are Daubechies, coiflet, simlet, biorthogonal and discrete Meyer. [13].

Identification of the fault can be done in two ways: by analyzing the coefficients resulting from the decomposition of the signal or by studying the high-level wavelet signals. High-level wavelet signals are those that contain information about the nature of the failure. The integral wavelet transforms of a function $f(t) \in L^2$ with respect to a wavelet analyzer ψ is defined as [14]:

$$W_\psi f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{b,a}(t) dt \quad (11)$$

Where

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad a > 0 \quad (12)$$

The parameters b and a are called translation and dilation parameters respectively. Normalization factor is included $\sqrt{a}$ so that $\|\psi_{b,a}\| = \|\psi\|$

The expression for the inverse wavelet transform is

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} db \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} [W_\psi f(b, a)] \psi_{b,a}(t) da \quad (13)$$

Where C_ψ is a constant that depends on the choice of the wavelet and is given by:

$$C_\psi = \int \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (14)$$

The coefficients constitute the results of a regression of the original signal carried out on the wavelets. A graph can be generated with the x-axis representing the position along the signal (time), the y-axis representing the scale, and the color at the x-y point representing the magnitude of the wavelet coefficient C . These coefficient plots are generated with graphic tools.

A. Discrete Wavelet Transform (DWT)

The discrete wavelet transform performs the decomposition of a signal $x[n]$ in an approximation coefficient at a given level of decomposition k , $A_k[n]$, and k detail signs $d_j[n]$ con $j = 1 \dots k$ [15].

$$x[n] = A_k[n] + \sum_{j=1}^k d_j[n] = \sum_i \Phi_i^k[n] + \sum_{j=1}^k \sum_i d_i^j \Psi_i^j[n] \quad (15)$$

Where Φ^k y Ψ^j They are the scaling function at level k and the wavelet function at level j respectively. On the other hand, the coefficients a_i^k y d_i^j se calculan utilizando el algoritmo de codificación por sub-bandas [16].

$$\text{Discrete Wavelet Coiflet} \quad B_k = (-1)^k C_{N-1-k} \quad (16)$$

$$\text{Wavelet Cohen Daubechies} \quad B_k = (-1)^k C_{N-1-k} \quad (17)$$

$$\text{Wavelet Daubechies} \quad B_k = (-1)^k C_{N-1-k} \quad (18)$$

$$\text{Binomial-quadrature mirror filter (QMF)} \quad h(n) = \sum_{r=0}^{n-2/2} \theta_r X_r(n) \quad (19)$$

$$\text{Wavelet Haar} \quad \psi_{n,k} = \psi(2^n t - k) \quad (20)$$

$$\text{Wavelet Mathieu} \quad H_v(\omega) = -e^{-jv\omega/2} \frac{ce_v(\omega/2, q)}{ce_v(0, q)} \quad (21)$$

$$\text{Wavelet Legendre} \quad H_v(\omega) = 1/\sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h^v e^{-j\omega k} \quad (22)$$

III. METHODOLOGY

In this work we start from the fact that we have proposed the following hypothesis:

Hypothesis: The hypothesis posits that Wavelet analysis using Daubechies wavelets applied to squirrel-cage induction motors will effectively detect and diagnose insulation faults, considering the specific motor properties that influence the dynamics of these faults. A significant relationship is expected between the individual characteristics of the studied motors and the Wavelet analysis' ability to accurately and timely identify existing insulation faults, which will contribute to improving predictive maintenance practices in industrial machinery.

Study Population and Sample: The study population consisted of 477 electric motors from a petrochemical plant with a history of low insulation problems in some motors. A sample of 20 motors with data from previous static insulation tests was available. The objective was to employ wavelet analysis to evaluate these motors and demonstrate its ability to diagnose low insulation faults.

Motor Simulations: In this scenario, 20 squirrel-cage induction motors were simulated in Simulink. For this study, one low-voltage and one medium-voltage motor were selected. The low-voltage motor belonged to a process fluid pump in the Urea plant, and the medium-voltage motor belonged to a pump in the plant's cooling water system. These motors were chosen because the low-voltage motor was the most recent one subjected to a static insulation test, and the insulation resistance value obtained was less than 200 k Ω , which is below the value established in IEEE Standard 43-2013 (5 M Ω between phases and ground and between phases for low-voltage motors). The medium-voltage motor was selected because it was one of the highest-power motors in the population, allowing the proposed methodology to be validated for medium-voltage motors as well.

Taking into consideration that if a ground fault is introduced in phase C of the motors, modeling the insulation resistance of the winding. Starting from the fact that; You can emulate the insulation resistance to ground by connecting a resistor to ground for each coil [17]. So to emulate insulation deterioration, a capacitor is added, which increases the insulation capacitance.

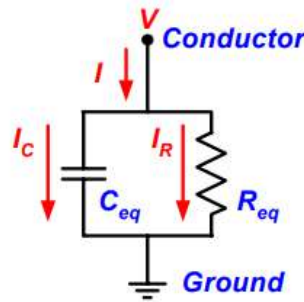


Fig. 1. Equivalent circuit of electrical insulation system [18].

Modeling the circuit in figure 1

$$I_c(t) + I_R(t) = I(t) \quad (23)$$

$$\frac{C_{eq} dv(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R_{eq}} = I(t) \quad (24)$$

This approach was chosen because an aged insulating material would also cause a similar increase in capacitance. The severity of insulation degradation can be varied depending on the capacitance of the inserted capacitor. Phase to ground capacitances are between 1.5 nF and 21 nF [19]. The "3-phase induction motor" block from the Simscape Electrical library in Simulink was used. To model each engine individually. The parameters of each engine were configured according to the actual specifications or available reference data. In which we can obtain the data required by the software, below we show the data of the low voltage model motor.

Nominal Voltage (Vn) = 460;
Nominal frequency (fn) = 60;
Rated Current (In) = 18.25;
Nominal Torque (Tn) = 49,8;
Maximum speed (Ns) = 1800;
Nominal speed (Nn) = 1750;
Starting Current to Rated Current Ratio (Ist/In) = 6;
Starting Torque to Nominal Torque Ratio (Tst/Tn) = 2.5;

Breaking Torque to Nominal Torque Ratio (T_{br}/T_n) = 3;
power factor (pf) = 0.8;

With these data we introduce them into the parameter estimation block;

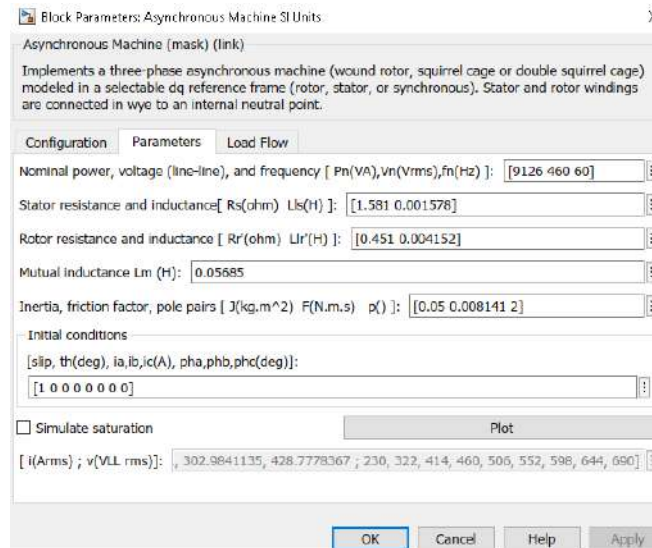


Fig. 2. Parameters of Low Voltage Motor 460 V, 11 KW; simulated in simulink.

The C phase current signal is extracted and brought into MATLAB to perform a wavelet analysis. Using the "3-Phase Induction Motor" block from the Simscape Electrical library in Simulink to model each motor.

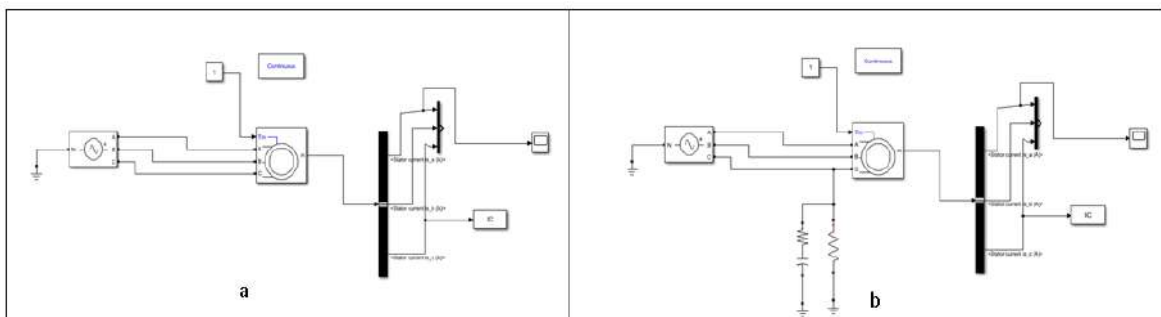


Fig. 3. Low and medium squirrel cage motor simulation; healthy state (a). Low and medium squirrel cage motor simulation; Insulation failure (b)

The simulation of the start-up of the two induction machines in a healthy state was carried out. Subsequently, the current signal of the start transient of phase C was extracted, with the Simulink Workspace block into Matlab, for the healthy and failed cases. The signal was transferred from the Simulink workspace to MATLAB for wavelet analysis using the level 8 Daubechies parent function.

IV. RESULTS

The results of the simulation of the start-up of the induction machines revealed a change in the signal at all levels of detail; but more pronounced at the level of detail 1, 2, 5, 7 and 8; from Daubechies wavelet analysis. In the spectrum, the modification of both signals can be observed for both the medium voltage motor and the low voltage motor. Figure 5 shows the decomposition of the wavelet signal at level 8 in the healthy state of the engine.

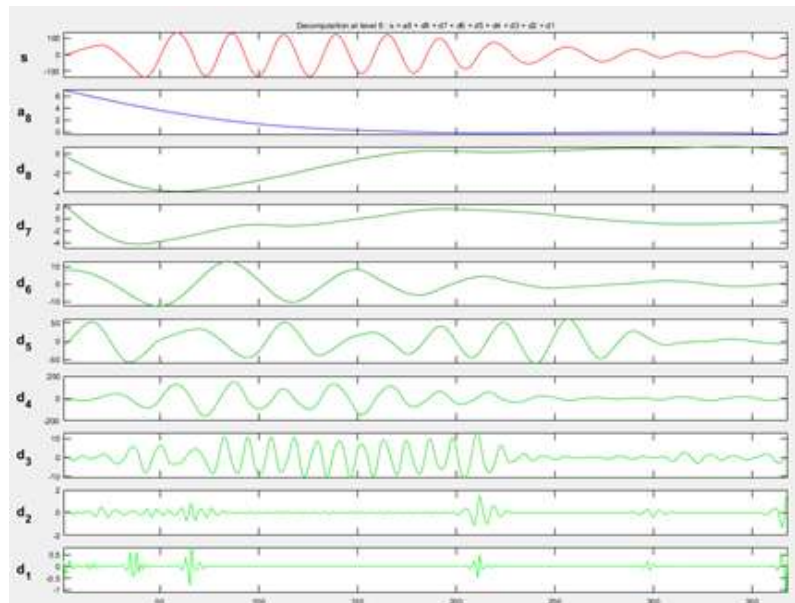


Fig. 4. Wavelet Daubechies Level 8 Low Voltage Motor 460 V, 11 KW; shows the spectrum of the engine in healthy state.

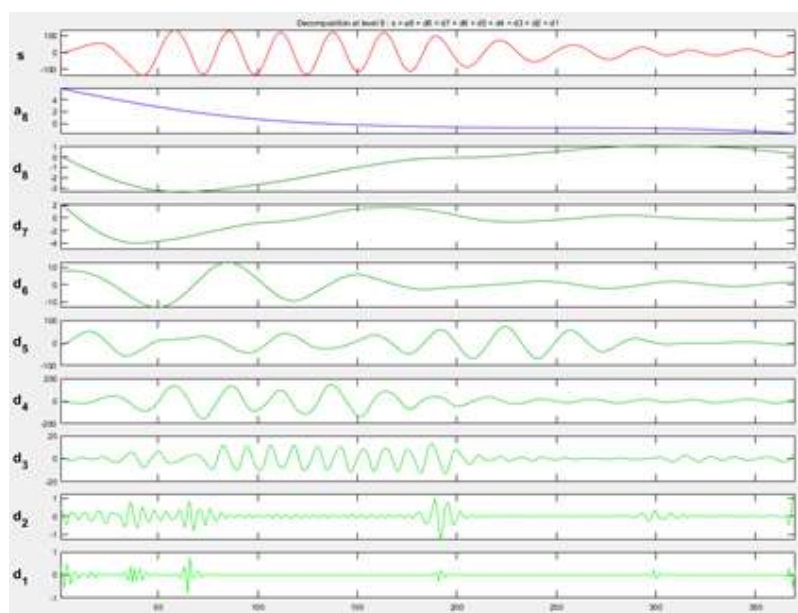


Fig. 5. Wavelet Daubechies Level 8 Low Voltage Motor 460 V, 11 KW; shows the spectrum of the motor in the fault state with low insulation.

Figure 4 shows the decomposition of the wavelet signal at level 8 in the healthy state of the engine. When viewing both spectra, we can observe the difference that exists with respect to figure 5 at the level of detail Daubechies 1, 2, 3, 5, 7 and 8; how the signal changes when a 200k Ω low insulation fault is introduced.



Fig. 6. Wavelet Daubechies Level 8 Medium Voltage Motor 13800 V, 3 MVA; shows the spectrum of the engine in healthy state.



Fig. 7. Wavelet Daubechies Level 8 Medium Voltage Motor 13800 V, 3 MVA; shows the spectrum of the motor with insulation failure for 200kΩ.

Figure 7. Wavelet Daubechies Level 8 Medium Voltage Motor 13800 V, 3 MVA; simulated in simulink; shows the spectrum of the engine in healthy state. Figure 8; Wavelet Daubechies Level 8 Medium Voltage Motor; We can observe the difference with respect to figure 7 in the level of detail Daubechies 8, 7 and 6 in this case as the signal changes when a low insulation fault of 200kΩ is introduced.

Next we analyze wavelet histograms which can show how wavelet coefficients are distributed at different scales. In this case, they are used to analyze the health status of low and medium voltage motors, both in healthy conditions and with failure due to low insulation.

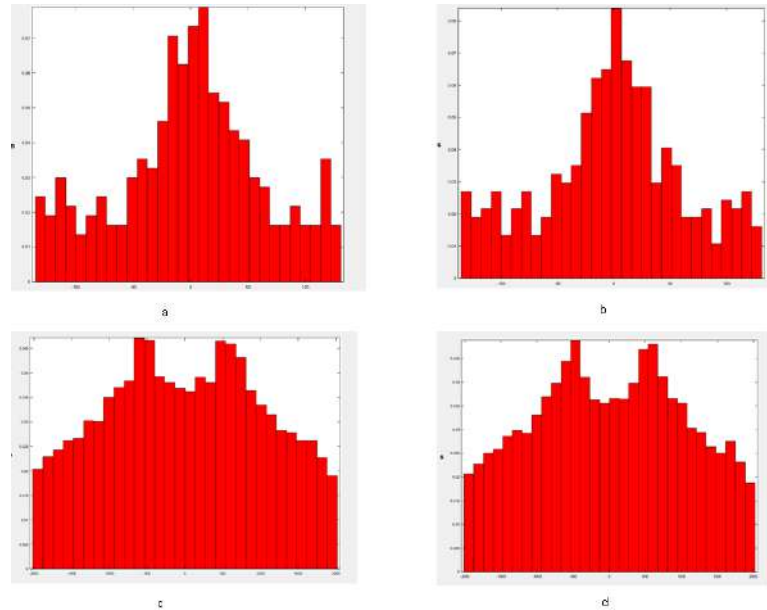


Fig. 9. Histograms. Wavelet Daubechies Level 8 Medium and low voltage motor.

Figure 9 shows Histograms. Wavelet Daubechies Level 8 Medium and low voltage motor. The first top left histogram (a) belongs to the low voltage motor in healthy state, the second top right side histogram (b) belongs to the motor in failed state with low insulation. The lower left side histogram (c) belongs to the medium voltage motor in healthy state. The lower right-side histogram (c) belongs to the failed medium voltage motor with low insulation. The histograms of the low voltage motor represent a significant difference in the distribution of energy levels, both have a unimodal distribution, but the one in the failed state is more asymmetric than that of the motor in the healthy state, with a longer tail to the right. . This may indicate a greater tendency towards higher wavelet coefficient values, which could be related to low insulation failure. The histograms of the medium voltage motor present a bimodal distribution, and a difference is made in terms of the peaks on the left side with two almost uniform bands in the case of the healthy motor. The medium voltage healthy state histogram is slightly asymmetric to the right, similar to that of the low voltage motor in healthy state.

In the case of the low voltage motor, we have then simulated 2 low insulation scenarios; in which it could be detected that as the insulation degrades at 20 k Ω and 2 k Ω ; You can continue to observe the changes in the levels of detail of the wavelet spectrum, in addition to the energy distribution changing in the signal; In Table 1 we can observe the changes in the statistics of the signal energy distribution for each scenario, motor in healthy state, failed motor with 200 k Ω , 20 k Ω and 2 k Ω ;

Table 1. the statistics of the signal energy distribution.

Statistical	Healthy	Isolation 200k	Isolation 20k	Isolation 2k
mean	-0,3463	-1,011	-0,7334	-0,7312
median	2,347	0,8336	1,93	1,966
mixmap	131,2	131,5	131,4	131,4
minimum	-135,6	-135,3	-135,6	-135,6
range	266,9	266,9	267	167
standard dev	63,46	63,4	63,24	63,24
median abs dev	36,6	39,91	38,96	39,89
mean abs dev	49,62	49,47	49,41	49,42
l1 norm	1,83E+04	1,83E+04	1,82E+04	1,82E+04
L2 norm	1216	1220	1215	1215
max norm	135,6	135,3	135,6	135,6

IEEE Standard 493 provides valuable information on expected failure rates for high-power electric motors. According to this standard, a differentiation in failure rates is observed depending on the operating voltage and the type of motor: Motores de inducción:

Less than 1000 Volts: The estimated failure rate is 0.0824. From 1000 to 5000 Volts: The estimated failure rate is 0.0714 [20]. Taking this reference for our population at this failure rate, it is likely that in a year we will have 32 low voltage motors and 7 medium voltage motors. Therefore, it would be estimated that of the 31 low voltage motors, taking the reference mentioned above, 40% of the failures will be due to winding problems. We include in these problems generated by insulation failures; With this probability, 13 low voltage motors and 7 medium voltage motors would fail, so to validate the tests we carried out simulations taking these samples as a reference.

We wish to evaluate whether the diagnosis of failure due to low insulation of electric motors using Daubuchies 8 wavelet transform signal analysis at level 8 is effective to identify failures in low voltage motors. There is data from a sample of 13 low voltage motors, where 12 motors were correctly diagnosed as failed. The failure rate of low voltage motors provided by the IEEE (0.0824) and the EPRI estimate of the proportion of failures due to insulation problems (40%) are taken as a reference. Hipótesis:

Null hypothesis (H0): Diagnosis by wavelet transform has no effect on the identification of faults due to low isolation, that is, the probability of a correct diagnosis is not different from the random probability.

Alternative hypothesis (H1): Diagnosis by wavelet transform does have an effect on the identification of faults due to low isolation, that is, the probability of a correct diagnosis is greater than the random probability. (We work under the assumption that this hypothesis is correct).

Statistical test selection:

Since we are trying to evaluate the proportion of correct diagnoses in a small sample ($n < 30$), the student's t test for a single sample can be used.

Calculation of the test statistic:

Number of successes (X): 12 engines diagnosed as failed (of 13 engines in the sample).
Population means under the null hypothesis (μ_0): 0.4, since it is estimated that 40% of the motors are failed due to low insulation.

Sample standard deviation (s): It is calculated using the formula:

$$s = \sqrt{\frac{(\sum x_i - \mu_0)^2}{(n - 1)}} \quad (25)$$

In this case, $s = 0.241$.

test statistic t:

$$t = \frac{(X - \mu_0)}{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)} = \frac{(12 - 0.4)}{\left(\frac{0.241}{\sqrt{12}}\right)} = 2.49 \quad (26)$$

Degrees of freedom:

$$gl = n - 1 = 13 - 1 = 12 \quad (27)$$

Significance level:

A significance level (α) of 0.05 is established.

Calculation of p value:

Since this is a right-sided test, the p-value is calculated using Student's t-table with 12 degrees of freedom and finding the area in the tail of the test statistic $t = 2.49$. In this case, the p value is 1.782 in table.

$$t_{exp} > t_{tab}$$

The null hypothesis is rejected and the alternative hypothesis is accepted. This means that there is sufficient evidence to conclude that the Daubechies wavelet diagnostic method does have a significant effect on the identification of low insulation faults in low voltage electric motors.

CONCLUSIONS

Daubechies Level 8 Wavelet analysis is presented as a novel and effective tool for diagnosing low insulation faults in the stator coils of squirrel cage rotor induction motors, both at low and medium voltage. This technique, based on the analysis of the stator current signal during the start-up transient, allows low insulation faults to be accurately identified through characteristic changes in the wave spectrum and energy distribution of the current signals. Levels of detail 8, 7, 6 and 5 are particularly relevant for the detection of these faults. The detail curve patterns vary significantly in the failed engine with respect to the healthy engine. The wavelet histograms show a difference in the distribution of energy levels between the healthy and the failed motor, indicating a greater tendency towards higher wavelet coefficient values in the failed motor. The student's t test for a single sample demonstrates that wavelet transform diagnosis does have a significant effect on the identification of faults due to low insulation in low voltage electric motors. Unlike traditional static-state insulation testing, Daubechies Level 8 Wavelet Analysis offers early and accurate fault detection, even in the presence of low insulation values. This capability opens a promising path for the implementation of the method in condition monitoring systems, improving predictive maintenance practices and reducing the incidence of catastrophic failures in electric motors. This study provides strong evidence supporting Daubechies Level 8 wavelet analysis as a valuable tool for the diagnosis and prevention of low insulation faults in induction motors.

REFERENCES

- [1] A. Almounajjed, A. Sahoo y M. Kumar, «Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor: An experimental analysis,» de In 2021 7th Int. Conf. on Electrical . In 2021 7th Int. Conf. on Electrical, 2021.
- [2] X. Liang, M. Z. Ali y H. Zhang, «Induction Motors Fault Diagnosis Using Finite Element Method: A Review,» in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, nº 2, pp. 1205-1217, 2020.
- [3] P. Zitha y B. A. Thango, «On the Study of Induction Motor Fault Identification using Support Vector Machine Algorithms,» de 2023 SAUPEC Conference, Johannesburg, South Africa, 2023.
- [4] A. Sharma, L. Mathew y S. Chatterji, «Analysis of Broken Rotor bar Fault Diagnosis for Induction Motor. In Proceedings of the,» de IEEE International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI),, Greater Noida, 2017.
- [5] M. R. Mehrjou, N. Mariun, M. H. Marhaban y N. Misron, «Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review,» Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 25, nº 8, pp. 2827-2848, 2011.
- [6] M. Z. Ali, S. M. N. S. K, X. Liang y H. Y. Zhang and T, «Machine Learning-Based Fault Diagnosis for Single- and Multi-Faults in Induction Motors Using Measured Stator Currents and Vibration Signals,» in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 5, nº 3, pp. 2378-2391, 2019.
- [7] S. Lee, J. Yang, K. Younsi y R. Bharadwaj, «An On-line Groundwall and Phase to Phase Insulation Quality Assessment Technique for AC Machine Stator Windings,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, p. 946–957, 2006.

- [8] Y. Wang, L. Yang, J. Xiang y e. al, «A hybrid approach to fault diagnosis of roller bearings under variable speed conditions,» *Measurement Science and Technology*, vol. 28, nº 12, 2017.
- [9] G. H. Bazan, P. R. Scalassara, W. Endo y e. al, «Stator short-circuit diagnosis in induction motors using mutual information and intelligent systems,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, nº 4, pp. 3237-3246, 2018.
- [10] A.S.Guedes y S.M.Silva, «Insulation Protection and Online Stress Agent Identification for Electric Machines using Artificial Intelligence,» *ET Electric Power Applications*, vol. 13, nº 4, pp. 559-570 , 2019.
- [11] G. Mathew, «Fault Detection in an Induction Motor Drive Using Discrete Wavelet Packet Transform,» *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, vol. 12, nº 2, pp. 1-6, 2017.
- [12] N. Mohan, *Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling Using Simulink*. Minneapolis, Minneapolis: MNPERE, 2001.
- [13] J. Antonino-Daviu, M.-F. J. Riera-Guasp, F. Martínez-Giménez y A. Peris, «Application and optimization of the discrete wavelet transform for the detection of broken rotor bars in induction machines,» *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 21, nº 2, pp. 268-279, 2006.
- [14] J. Cusidó y J. Romeral, «Transient Analysis and Motor Fault Detection using the Wavelet Transform,» *MCIA Group, Technical University of Catalonia*, pp. 43-60, 2011.
- [15] J. Walker, CRC press, 2008.
- [16] R. Gopinath y G. H.ta, *Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer*, Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1997.
- [17] M. Samiullah, H. Ali y A. A. Shehryar Zahoor, «Fault Diagnosis on Induction Motor using Machine Learning and Signal Processing,» *School of Electrical Engineering and Computer Science, (SEECS), National University of Sciences and Technology*, pp. 1-6, 2024.
- [18] K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Y. Zhou, J. Krahn y K. Weeber, «On-line Capacitance and Dissipation Factor Monitoring of AC Stator Insulation,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* , vol. 17, nº 5, pp. 1441-1451, 2010.
- [19] P. Nussbaumer, M. A. Vogelsberger y T. M. Wolbank, «Induction Machine Insulation Health State Monitoring Based on Online Switching Transient Exploitation,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 62, nº 3, pp. 1835- 1845, 2015.
- [20] I. o. E. a. E. E. (IEEE), *IEEE 493-2020: Recommended Practice for the Design of Relays for Electric Power Systems.*, 2020.

THE AUTHORS



Alfredo Alejandro Marot Guevara; Electrical/Electronic Engineer, specialist in Industrial Automation and Computing; University professor for 18 years. Currently professor of Dynamic Systems at the Universidad de Oriente, advisor at MDJ Technology. c.a; and SJT Industrial Equipment and Services, residing in the city of Barcelona, Anzoátegui. Venezuela.



Sergio Rafael Velásquez Guzmán - Coauthor, received the B.S. degree in Electronic Engineering, from the UNEXPO, in 2008. M.S. degree in Education from UPEL in 2011, an M.S. degree in Electronic Engineering from UNEXPO, in 2012, an MBA degree from UNY in 2014, a Doctor of Education degree in 2015 from UPEL, and a Doctor of Engineering Sciences from UNEXPO in 2019. He is a type B Research Professor accredited by the MINCYT in Venezuela. Currently, he is in charge of the Research and Postgraduate Department of the UNEXPO Vice-Rectorate, Puerto Ordaz, Venezuela.

Tipo de artículo: artículo de investigación

Estrategias para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes

Ángel Lezama

<https://orcid.org/0009-0000-4300-7825>

a2lez@hotmail.com

Investigador independiente

Quito-Ecuador

Correspondence author: a2lez@hotmail.com

Received (20/07/2024), Accepted (6/10/2024)

Resumen: En este artículo se analiza el uso de tecnologías emergentes y enfoques de gestión para reducir el consumo energético en edificios inteligentes, focalizados en Latinoamérica. Se examinan estrategias basadas en el Internet de las Cosas (IdC, IoT), sistemas de automatización, y modelos predictivos de energía, con ejemplos de implementación en distintos contextos urbanos de la región. Además, se discuten los beneficios ambientales, sociales y económicos derivados de estas prácticas. El análisis energético, para los casos concretos estudiados, muestra que el enfoque sostenible combina las condiciones bioclimáticas de la región con el empleo general de diversas aproximaciones tecnológicas.

Palabras clave: IdC, sistemas de automatización, modelos predictivos de energía.

Strategies to optimize energy consumption in smart buildings

Abstract: This article analyzes emerging technologies and management approaches to reduce energy consumption in smart buildings, focusing on Latin America. Strategies based on the Internet of Things (IoT), automation systems, and predictive energy models are examined, with implementation examples in different regional urban contexts. In addition, the environmental, social, and economic benefits derived from these practices are discussed. The energy analysis, for the specific cases studied, shows that the sustainable approach combines bioclimatic conditions to the region with the general use of various technological approaches.

Keywords: IoT, automation systems, predictive energy models.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se estima que el 55% de la población reside en áreas urbanas, y se prevé que para el año 2050 la misma alcance un 70% [1]. Debido a estas proyecciones, se requerirán espacios habitacionales que cubran dicha demanda y que tengan los sistemas necesarios para un uso eficiente de la energía. Es en este escenario que los edificios inteligentes emergen como una solución fundamental para abordar los retos del cambio climático y la eficiencia energética. La eficiencia energética en edificios es responsable de aproximadamente del 30% al 40% del consumo global de energía, lo que resalta la necesidad de soluciones tecnológicas avanzadas para mitigar este impacto [2].

Al integrar tecnologías avanzadas como sensores, redes IoT y sistemas de automatización, estos edificios pueden monitorear y gestionar el consumo energético de manera eficiente. Por ejemplo, los sensores IoT permiten recopilar datos en tiempo real, lo que facilita una gestión proactiva del consumo [3]. Los sistemas de automatización centralizada, como los Sistemas de Gestión de Edificios (Building Management Systems, BMS, por sus siglas en inglés), también contribuyen significativamente a reducir desperdicios energéticos mediante el control coordinado de subsistemas como HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) e iluminación [4].

Este artículo tiene como objetivo explorar estrategias innovadoras que permitan optimizar el uso de energía en edificios inteligentes en Latinoamérica, así como sus implicaciones para la sostenibilidad. La implementación de estrategias que combinan tecnologías emergentes con fuentes de energía renovable, como sistemas solares y eólicos, también ha demostrado ser crucial para reducir la huella de carbono de estos edificios [5]. Además, la adopción de modelos predictivos basados en inteligencia artificial ofrece nuevas oportunidades para anticipar patrones de consumo y mejorar la toma de decisiones en tiempo real [6]. En este contexto abordaremos las soluciones más adecuadas para poblaciones ubicadas en zonas tropicales dentro del espacio regional latinoamericano y escenarios climáticos similares. Este trabajo consta de una breve Introducción, de un apartado de Desarrollo donde se aborda las tecnologías y estrategias más importantes para la gestión de la eficiencia energética. Una sección de Metodología que explica cómo se abordó la problemática desde el punto de vista investigativo, para pasar a la sección de Resultados de la investigación y sus Conclusiones.

II. DESARROLLO

Tecnologías clave para la gestión energética

A. *Sistemas IoT*

El Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en una de las tecnologías más revolucionarias en el ámbito de los edificios inteligentes, permitiendo una optimización integral del consumo energético. Su impacto radica en la capacidad de conectar dispositivos y sensores en una red distribuida que recopila y analiza datos en tiempo real, proporcionando una visión detallada y dinámica de las condiciones del edificio.

Infraestructura IoT en edificios inteligentes

La infraestructura IoT en edificios inteligentes consta de una red de sensores distribuidos estratégicamente, que recopilan información sobre variables críticas como temperatura, ocupación, humedad, niveles de luz natural y calidad del aire. Estos sensores están diseñados para trabajar de manera autónoma y en conjunto, permitiendo una gestión eficiente de los recursos energéticos. Sensores de temperatura y humedad: Permiten regular automáticamente sistemas HVAC, ajustando el flujo de aire, la temperatura y el nivel de deshumidificación según las condiciones internas y externas del edificio.

Este enfoque dinámico evita el sobrecalentamiento o enfriamiento excesivo, logrando ahorros energéticos significativos. Los sensores de ocupación detectan la presencia de personas en diferentes áreas del edificio, activando sistemas de iluminación o climatización solo cuando es necesario. En espacios con baja ocupación, como oficinas fuera de horario laboral, estos sensores contribuyen a evitar el desperdicio de energía. Por otro lado, los sensores de luz natural miden la intensidad lumínica externa y ajustan la iluminación interna automáticamente, favoreciendo el uso de luz natural durante el día.

Beneficios técnicos y económicos

La implementación de IoT en edificios inteligentes proporciona ventajas técnicas y económicas que justifican su adopción:

- **Eficiencia energética:** Estudios han demostrado que la integración de IoT puede reducir el consumo energético en un 20-30% al eliminar desperdicios y optimizar el uso de recursos [7].
- **Mantenimiento predictivo:** Los datos recopilados permiten identificar fallas potenciales en equipos críticos, como sistemas HVAC, antes de que ocurran, reduciendo los costos de reparación y evitando interrupciones.
- **Escalabilidad y modularidad:** Las soluciones IoT pueden implementarse de forma gradual, adaptándose a las necesidades específicas del edificio y permitiendo actualizaciones tecnológicas futuras.

Retos de Implementación

Aunque la implementación de sistemas IoT posee ventajas evidentes, enfrenta algunos desafíos, como lo son:

- **Costos iniciales:** La instalación de sensores y plataformas de gestión puede requerir una inversión significativa, especialmente en edificios de gran tamaño.
- **Interoperabilidad:** Es necesario garantizar que los dispositivos de diferentes fabricantes sean compatibles entre sí para lograr una integración fluida.
- **Seguridad de datos:** La protección de la información recopilada por los sensores es crucial para evitar vulnerabilidades que puedan comprometer la operación del edificio.

B. Sistemas de Gestión de Edificios (BMS)

Los Sistemas de Gestión de Edificios (BMS) desempeñan un papel central en la optimización del consumo energético en edificios inteligentes al ofrecer una plataforma unificada que permite la integración y el control de múltiples subsistemas, tales como climatización (HVAC), iluminación, seguridad y gestión energética. Estas plataformas facilitan la toma de decisiones automatizadas en tiempo real, basándose tanto en parámetros predefinidos como en condiciones dinámicas del entorno, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y a reducir los costos operativos.

Monitoreo y control en tiempo real

El BMS utiliza una red de sensores y actuadores distribuidos (IoT) por toda la infraestructura del edificio para recopilar datos sobre factores críticos como temperatura, ocupación, humedad y niveles de iluminación. Por ejemplo, si se detecta a través de *sensores de ocupación* que una sala o espacio no está siendo utilizado, el sistema puede realizar ajustes de manera automática, como los siguientes:

- **Apagar las luces:** para evitar los gastos de energía asociados a la iluminación innecesaria.
- **Ajustar el termostato:** permitiendo al sistema de climatización elevar o reducir la temperatura a un nivel óptimo de acuerdo con la demanda existente.

Esta funcionalidad no solo minimiza el consumo energético, sino que prolonga la vida útil de los equipos al evitar sobrecargas innecesarias. Estudios recientes han demostrado que el uso de un BMS eficiente puede reducir el consumo energético hasta en un 30% en edificios comerciales [8].

Modelos predictivos y análisis de datos

Las técnicas de inteligencia artificial (IA) aplicadas al análisis de datos energéticos han revolucionado la gestión en edificios inteligentes. Los modelos predictivos, entrenados con grandes volúmenes de datos históricos, pueden anticipar las demandas energéticas basándose en patrones climáticos, horarios de ocupación y actividades planificadas. Estas predicciones permiten a los administradores de edificios tomar decisiones informadas sobre el uso de recursos, logrando ahorros energéticos sustanciales y reduciendo los costos operativos [9].

Automatización basada en algoritmos predictivos

Además del control en tiempo real, los BMS avanzados incorporan modelos predictivos y algoritmos de aprendizaje automático que permiten anticipar patrones de uso energético y planificar el funcionamiento de los sistemas de manera óptima. Por ejemplo:

- Programación de la climatización: Basándose en datos históricos de ocupación y condiciones meteorológicas, el BMS puede activar el sistema HVAC unos minutos antes de la llegada de los ocupantes y desactivarlo cuando se prevé que la sala quede vacía.
- Iluminación adaptativa: La intensidad de las luces puede ajustarse automáticamente en función de la iluminación natural disponible, reduciendo así el consumo energético en horas diurnas.

Estos algoritmos no solo garantizan un uso eficiente de la energía, sino que también facilitan la adaptación del edificio a condiciones cambiantes, optimizando su rendimiento.

Mantenimiento Predictivo

Una de las ventajas más importantes de los BMS es su capacidad para implementar estrategias de mantenimiento predictivo. A través del análisis continuo de los datos obtenidos de los equipos, como sistemas HVAC, ascensores o iluminación, el BMS puede:

- Identificar patrones de desgaste o fallos incipientes en los equipos.
- Programar intervenciones de mantenimiento antes de que los problemas escalen y generen un mayor gasto energético o daños significativos.

Por ejemplo, si el sistema detecta una disminución en el rendimiento de un equipo HVAC, puede notificar automáticamente al personal de mantenimiento, evitando así consumos ineficientes y optimizando la disponibilidad de los sistemas.

Integración con energías renovables

Los BMS también son capaces de integrar sistemas de energías renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, en su operación. Pueden gestionar la distribución de la energía generada y almacenarla en baterías cuando la demanda es baja. En momentos de mayor consumo, el sistema prioriza el uso de energía almacenada o renovable, reduciendo la dependencia de fuentes convencionales.

Beneficios técnicos y económicos

La implementación de un BMS ofrece múltiples beneficios tanto en el ámbito técnico como en el económico:

- Eficiencia energética: Reducción del consumo eléctrico gracias a ajustes dinámicos.
- Optimización de costos: Menor gasto operativo debido a la automatización y mantenimiento predictivo.
- Sostenibilidad: Reducción de las emisiones de carbono mediante la integración con tecnologías de energía renovable y gestión eficiente.
- Confort de los usuarios: Mejora en las condiciones ambientales internas, como temperatura, iluminación y calidad del aire.

C. Estrategias de Implementación

Optimización de Iluminación

El diseño de sistemas de iluminación que integren tecnologías LED, sensores de movimiento y controladores de luz natural representa un enfoque eficiente para reducir el consumo energético. Por ejemplo, en oficinas o edificios comerciales, los sensores pueden ajustar automáticamente la intensidad de la luz artificial según la cantidad de luz natural disponible [10]. Además, las luminarias inteligentes pueden programarse para apagarse automáticamente fuera del horario laboral.

Climatización Eficiente

Los sistemas de climatización son responsables de una proporción significativa del consumo energético en edificios. Las estrategias eficientes incluyen el uso de termostatos inteligentes y sistemas de ventilación controlados por demanda, los cuales ajustan el flujo de aire según la ocupación y la calidad del aire interior. Estudios recientes muestran que estas prácticas pueden reducir el consumo energético relacionado con el HVAC en hasta un 30% [10]. Además, los sistemas de zonificación permiten controlar la climatización en áreas específicas, evitando el desperdicio en espacios desocupados.

Gestión de Energía Renovable

La incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, se está convirtiendo en un estándar en edificios inteligentes. Estos sistemas, combinados con baterías de almacenamiento, permiten que el edificio utilice energía limpia y reduzca su dependencia de la red eléctrica. Un caso de estudio reciente mostró que la instalación de un sistema fotovoltaico en un edificio comercial redujo las emisiones de carbono en un 40% y generó ahorros significativos en costos operativos [5].

III. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para este estudio se estructuró en cuatro etapas clave. Primero, se realizó una revisión bibliográfica para recopilar información actualizada sobre tecnologías y estrategias aplicables a edificios inteligentes con características climáticas, sociales y económicas similares a las encontradas en Latinoamérica. Posteriormente, se analizaron ejemplos de implementación de edificios inteligentes en diferentes contextos urbanos, tanto dentro como fuera de la región latinoamericana. El estudio de casos incluyó la selección de proyectos residenciales y comerciales que hayan integrado tecnologías de monitoreo, automatización y energías renovables para optimizar su consumo energético. Se recopilaron datos sobre los resultados obtenidos en términos de ahorro energético, costos de implementación y retorno de inversión, lo que permitió identificar buenas prácticas aplicables a la región. Se priorizaron ejemplos en países en desarrollo con desafíos económicos similares.

En una tercera etapa, se realizaron simulaciones que permitieron evaluar la efectividad de diferentes estrategias de eficiencia energética en escenarios representativos de edificios inteligentes en Latinoamérica. Las variables consideradas incluyeron el clima, la disponibilidad de recursos energéticos, el tamaño de los edificios y los patrones de ocupación. Se compararon diferentes configuraciones tecnológicas, como el uso de sensores IoT para iluminación y climatización, sistemas BMS centralizados y la integración de energías renovables, con el objetivo de determinar las combinaciones más eficientes y rentables. Finalmente, se consultaron opiniones de expertos en energías renovables, eficiencia energética y gestión de edificios inteligentes cuyo objetivo fue validar los hallazgos de las etapas anteriores y obtener perspectivas adicionales sobre los desafíos y oportunidades específicos para Latinoamérica. Se recopilieron recomendaciones sobre políticas de incentivo, formación técnica y estrategias de implementación adaptadas a las condiciones económicas, climáticas y sociales de la región.

IV. RESULTADOS

Se realizó una búsqueda en Internet de fuentes asociadas a los criterios de búsqueda establecidos en esta investigación y se seleccionaron los trabajos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de estrategias tecnológicas y resultados.

Autores	Título/Fuente	Tipo de Recursos	Contenido Principal	Tecnologías/Enfoques Destacados
A. Vintimilla, P. Mera, J. Carrillo	Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador (ResearchGate, 2019)	Artículo de investigación	Análisis de medidas de eficiencia energética en viviendas residenciales en Cuenca, Ecuador, destacando patrones de consumo y estrategias de reducción de costos.	Monitoreo energético, climatización eficiente.
CEPAL	Eficiencia Energética en la Transición Sostenible e Inclusiva de América Latina y el Caribe (2021)	Informe	Propuestas de políticas y estrategias para integrar eficiencia energética en modelos sostenibles en América Latina y el Caribe.	Integración política, estrategias sostenibles.
R. Martínez	Eficiencia Energética en Edificios: desafíos en América Latina (Revista Expofrío, 2023)	Artículo técnico	Identificación de desafíos y soluciones prácticas para mejorar la eficiencia energética en edificios en América Latina.	Sistemas HVAC avanzados, energía solar.
BID	Las redes inteligentes de energía y su implementación en ciudades sostenibles (2020)	Informe	Evaluación del uso de redes inteligentes en la sostenibilidad energética urbana.	Redes inteligentes, gestión de energía urbana.
M. A. López et al.	La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios: análisis de casos (2018)	Tesis doctoral	Estudio comparativo de edificios universitarios en Brasil y España, destacando medidas de eficiencia energética implementadas.	Comparación internacional, diseño energético.
H. P. Das et al.	Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings (arXiv, 2022)	Artículo científico	Uso de aprendizaje automático para optimizar el consumo de energía en edificios inteligentes.	Aprendizaje automático, optimización de HVAC.
B. Setz et al.	Energy Smart Buildings: Parallel Uniform Cost-Search (arXiv, 2022)	Artículo científico	Propuesta de un enfoque de programación para la gestión operativa de edificios inteligentes con almacenamiento y generación de energía local.	Búsqueda de costo uniforme, generación local.
C. Perry et al.	Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings (ACEEE, 2017)	Informe	Análisis de cómo la tecnología inteligente puede mejorar la eficiencia energética en edificios existentes.	HVAC inteligente, iluminación conectada.
S. Kiliccote et al.	Improving Energy Efficiency via Smart Building Energy Systems (Energy Efficiency Journal, 2016)	Artículo científico	Comparación de sistemas de gestión energética y medidas políticas para mejorar la eficiencia energética en edificios inteligentes.	Gestión energética, políticas comparativas.
A. Tarantola	How AI Is Making Buildings More Energy-Efficient (Time Magazine, 2024)	Artículo de divulgación	Exploración del uso de inteligencia artificial para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono en edificios.	Inteligencia artificial, optimización de sistemas HVAC.

La eficiencia energética en edificios inteligentes es fundamental para promover la sostenibilidad en América Latina, donde los desafíos socio-ambientales y económicos exigen soluciones innovadoras. El análisis de los estudios revisados revela un panorama de integración de enfoques y tecnologías que pueden aplicarse en la región. Por ejemplo, en el trabajo de Vintimilla, Mera y Carrillo [11] se resalta cómo el análisis local del consumo energético en viviendas de Cuenca, Ecuador, permite diseñar estrategias personalizadas para optimizar recursos, evidenciando el impacto de contextualizar las medidas de eficiencia en entornos urbanos específicos.

La CEPAL [12] destaca el papel crucial de las iniciativas gubernamentales en la transición hacia modelos más sostenibles donde se resalta la necesidad de desarrollar marcos normativos sólidos que permitan escalar las soluciones tecnológicas propuestas. En el ámbito de los edificios, Martínez [13] aborda directamente los desafíos técnicos en América Latina, destacando la integración de sistemas HVAC avanzados y energía solar como soluciones clave. Esta perspectiva técnica es complementada por el análisis del BID [14], que introduce el concepto de redes inteligentes como un componente fundamental para transformar la gestión energética en entornos urbanos, resaltando su aplicabilidad en ciudades sostenibles. Por otro lado, y partiendo de una perspectiva internacional, López et al. [15] comparan los enfoques de eficiencia energética en edificios universitarios en Brasil y España, ofreciendo un modelo que combina buenas prácticas y adaptabilidad a distintos contextos. Bajo este propósito, Das et al. [16] examinan la capacidad para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes mediante algoritmos avanzados, mientras que Setz et al. [17] proponen métodos innovadores para la gestión operativa y la optimización energética, respectivamente. Aunque prometedores, estos enfoques enfrentan desafíos de implementación relacionados con la infraestructura y la capacitación tecnológica en la región para implementar energías renovables como la energía eólica o solar. Siguiendo esta misma preocupación, la reutilización de datos también juega un rol fundamental en la eficiencia energética, como lo resalta Perry et al. [18] cuando analizan cómo mejorar la eficiencia energética en edificios existentes mediante tecnologías inteligentes, un aspecto crucial para una región con un parque inmobiliario predominantemente antiguo. Por último, la influencia de las políticas públicas queda claramente evidenciada en el estudio de Kiliccote et al. [19], que compara la efectividad de los sistemas de gestión energética con las medidas normativas. Este trabajo enfatiza la necesidad de un equilibrio entre regulación e innovación para maximizar los beneficios en términos de ahorro energético. Finalmente, Tarantola [20] explora el papel de la inteligencia artificial como catalizador de eficiencia energética, subrayando su capacidad para reducir tanto el consumo energético como las emisiones de carbono.

Casos de Estudio

Para entender mejor la aplicación práctica de los conceptos de eficiencia energética en edificios inteligentes en Latinoamérica, es crucial analizar casos reales que se hayan ejecutado en la región. Al hilvanar el razonamiento anterior con ejemplos concretos, se pueden evidenciar los aspectos clave que se toman en cuenta para su implementación, como el clima, el uso de materiales renovables y autóctonos, y la integración de energías renovables.

En la Ciudad de México, el edificio corporativo Torre Reforma se ha convertido en un modelo de eficiencia energética en América Latina. Este edificio combina tecnologías de monitoreo avanzado, como sensores IoT que miden el consumo energético en tiempo real, con sistemas de automatización centralizados para regular la climatización y la iluminación. Además, la estructura cuenta con un diseño arquitectónico que maximiza la entrada de luz natural, reduciendo la necesidad de iluminación artificial durante el día. Torre Reforma también aprovecha fuentes renovables al incorporar paneles solares en su sistema energético, logrando así una reducción del 25% en el consumo eléctrico general. Aunque los costos iniciales de implementación fueron elevados, estimados en aproximadamente un 15% más que una construcción tradicional, los beneficios económicos y ambientales, incluyendo un retorno de inversión en menos de cinco años, han establecido un referente para otros proyectos en contextos urbanos similares [21].

En Johannesburgo, Sudáfrica, el 82 Grayston Drive es un ejemplo sobresaliente de edificio comercial sostenible en un país en desarrollo. Este proyecto ha integrado sistemas de automatización avanzada que ajustan automáticamente el aire acondicionado y la iluminación según la ocupación de los espacios. Además, el edificio utiliza una combinación de tecnologías IoT para monitorear el consumo energético y paneles solares que generan hasta el 20% de su energía. Estas innovaciones, junto con sistemas de gestión de agua para reciclaje y reutilización, han reducido los costos operativos en un 30% anual. Aunque el costo inicial de instalación fue alto, el periodo de amortización de seis años y los incentivos fiscales ofrecidos por el gobierno sudafricano han contribuido a popularizar este enfoque en otras ciudades del país [22].

En Bangalore, India, el Sobha Habitat es un complejo residencial que demuestra cómo las tecnologías emergentes pueden integrarse eficazmente en contextos económicos desafiantes. Este proyecto incorpora un sistema IoT interconectado que regula el consumo de agua y energía en tiempo real. Asimismo, cuenta con sensores de ocupación para ajustar automáticamente la iluminación y la climatización, y utiliza una combinación de paneles solares y sistemas de almacenamiento de energía para garantizar un suministro sostenible. Gracias a estas tecnologías, el Sobha Habitat ha logrado una reducción del 22% en el consumo energético y un ahorro significativo en las facturas mensuales de servicios básicos para los residentes. A pesar de los desafíos iniciales de financiamiento, el proyecto ha demostrado que este tipo de iniciativas pueden ser viables y efectivas en regiones con características similares a las de América Latina [23]. En Latinoamérica, una de las principales consideraciones para el diseño de edificios inteligentes y eficientes es la amplia diversidad climática de la región, que abarca desde climas cálidos y húmedos, como en la Amazonía, hasta climas áridos, como el del norte de Chile. Esta variedad climática demanda estrategias adaptadas a las condiciones locales, donde el diseño bioclimático desempeña un papel crucial al aprovechar las condiciones climáticas naturales para reducir el consumo energético. Un ejemplo destacado es el edificio CONTREE "Las Palmas" en Medellín, Colombia, una ciudad con clima cálido y húmedo. Este edificio utiliza estrategias de ventilación cruzada natural, protecciones solares y cubiertas verdes para reducir la ganancia de calor, disminuyendo así la necesidad de aire acondicionado. Estas iniciativas se alinean con los estudios anteriormente citados [11], que explora la optimización de sistemas HVAC en climas tropicales, evidenciando el impacto positivo del diseño bioclimático.

Por otro lado, la implementación de Sistemas de Gestión Energética (BMS) y tecnologías de automatización en edificios permite un control eficiente en tiempo real de sistemas como iluminación y climatización, ajustándose automáticamente a las necesidades de los ocupantes y las condiciones ambientales. Un ejemplo sobresaliente es la "Torre Titanium" en Santiago de Chile, que integra un sistema BMS para optimizar su consumo energético y mejorar el confort de los usuarios. Este caso también destaca la importancia de la inteligencia artificial y los modelos predictivos, aspectos estudiados ampliamente por investigadores como Das et al. [16], quienes subrayan su rol en la optimización energética de edificios inteligentes.

Estos casos resaltan algunos aspectos clave para la implementación de edificios inteligentes en Latinoamérica. El diseño bioclimático es esencial para aprovechar las condiciones naturales y reducir el consumo energético. Además, el uso de materiales locales y renovables no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también mejora el confort térmico y reduce costos. La integración de energías renovables, especialmente la solar, presenta un gran potencial en la región. Asimismo, la incorporación de sistemas de gestión energética como los BMS permite optimizar recursos en tiempo real, mientras que las consideraciones económicas y la demostración de la viabilidad financiera de estas tecnologías son cruciales para su adopción. Por último, es necesario desarrollar marcos regulatorios y políticas públicas que incentiven la construcción sostenible en la región. Con estas estrategias y el aprendizaje derivado de ejemplos reales, Latinoamérica puede avanzar hacia la construcción de edificios más sostenibles, eficientes y adaptados a las necesidades de su entorno diverso.

Con los resultados obtenidos de la información bibliográfica y de los casos de estudio anteriormente vistos, se pueden aplicar simulaciones que tomen en consideración los bioclimas presentes en la Latinoamérica para modelar aspectos relacionados con la eficiencia energética, como la sostenibilidad del consumo eléctrico, los recursos destinados a ventilación y calefacción como aquellos relacionados con la iluminación eficiente de espacios.

*Desarrollo de simulaciones con variables características de la región latinoamericana**A. Simulación para un clima tropical (Medellín, Colombia)*

En Medellín, Colombia, un edificio residencial fue modelado considerando un clima cálido y húmedo, caracterizado por temperaturas promedio que oscilan entre 18 y 28 °C. La configuración tecnológica incluye sensores IoT que gestionan la iluminación y la climatización, un sistema de gestión de energía (BMS) que optimiza estos recursos en función de la ocupación y las condiciones climáticas externas, y la integración de paneles solares para reducir la dependencia de la red eléctrica. El edificio, de tamaño medio y cinco pisos, tiene un patrón de ocupación moderado, con mayor presencia de sus ocupantes durante la noche. Los resultados de la simulación indicaron una reducción del consumo energético en iluminación y climatización de al menos un 25% en comparación con edificios convencionales, lo que se traduce en un ahorro financiero anual del 15% en la factura energética. El retorno de la inversión para la implementación de paneles solares se estima en seis años, convirtiendo esta estrategia en una solución rentable para el contexto tropical.

1) Simulación para un clima árido (Santiago de Chile)

En Santiago de Chile, se simuló un edificio comercial en un clima árido y extremo, con temperaturas que varían entre 0 y 35 °C dependiendo de la estación. El modelo tecnológico implementa un sistema BMS centralizado que controla la climatización, iluminación y los equipos de oficina. Además, combina ventilación mecánica con diseño bioclimático mediante protecciones solares pasivas, y utiliza paneles solares con acumuladores para la generación y almacenamiento de energía renovable.

El edificio, de gran tamaño con diez pisos, presenta un patrón de ocupación alto durante el día y actividad mínima en la noche. Los resultados de la simulación muestran una reducción del consumo energético total de al menos un 30%, mientras que la dependencia de la red eléctrica se reduce al 50% gracias al uso de energía solar. Aunque el costo inicial de los acumuladores de energía prolonga el retorno de inversión a ocho años, los beneficios en términos de sostenibilidad y reducción de costos energéticos a largo plazo son significativos.

2) Simulación para un clima subtropical (Ciudad de México, México)

En Ciudad de México, se evaluó un edificio de usos mixtos, combinando espacios comerciales y residenciales, bajo un clima subtropical con temperaturas promedio de 7 a 27 °C y una estacionalidad moderada. La configuración tecnológica incluye sensores IoT integrados para la iluminación en áreas comunes y climatización en oficinas, un sistema BMS descentralizado que adapta el consumo energético a patrones de ocupación por áreas específicas, y un sistema de energía solar e híbrida con almacenamiento para maximizar la eficiencia energética.

El edificio, de tamaño medio, tiene un patrón de ocupación mixto, con alta actividad diurna en oficinas y mayor ocupación residencial durante la noche. La simulación arrojó una reducción del consumo energético en un 20-25%, con una notable disminución de los costos operativos gracias a la automatización en áreas de baja ocupación. El retorno de inversión se estima en siete años, mientras que las mejoras en confort y productividad de los ocupantes destacan como beneficios adicionales de esta configuración.

La tabla 2 se realiza una comparativa entre el clima y las estrategias utilizadas en cada caso particular.

Tabla 2. Comparación de estrategias tecnológicas y resultados.

Estrategia	Clima tropical	Clima árido	Clima subtropical
Sensores IoT	25% de reducción	20% de reducción	20-25% de reducción
BMS	20% de optimización	30% de optimización	20% de optimización
Energía solar	40% de generación	50% de generación	30-40% de generación
Retorno de inversión (años)	6	8	7

Los resultados mostrados además en la figura 1, refuerzan el hecho que las configuraciones más rentables y eficientes combinan sensores IoT para control dinámico, BMS para gestión centralizada o descentralizada según el contexto, y generación de energía renovable como los paneles solares. Los resultados muestran que los climas tropicales y subtropicales pueden beneficiarse ampliamente de estrategias de ventilación natural y optimización del uso de iluminación, mientras que en climas áridos es clave la integración de energías renovables y acumuladores. En última instancia, y dado los resultados, se destaca la opinión de algunos entes regionales y expertos con respecto a los hallazgos encontrados en esta investigación.

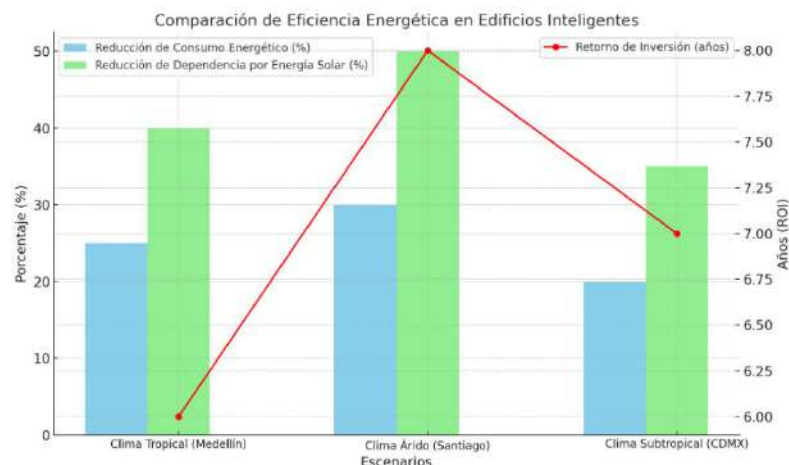


Fig. 1. Comparativa de la eficiencia energética según el escenario establecido.

Opiniones de expertos

La eficiencia energética en edificios inteligentes es una prioridad global, con organismos como el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) [11] en Ecuador promoviendo el uso responsable de la energía mediante programas y guías prácticas que fomentan el consumo eficiente y el uso de fuentes renovables. En este sentido, el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) ha analizado la gestión energética en edificios públicos a través del proyecto "Sistema de Información Energética para Edificios en Ecuador", destacando la necesidad de mejorar la eficiencia en estos espacios. Además, estudios de la Universidad Técnica de Cotopaxi han identificado problemas eléctricos en edificios, lo que refuerza la importancia de integrar tecnologías para optimizar el consumo de energía en las infraestructuras públicas.

A nivel regional, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [12] ha subrayado la importancia de fortalecer los marcos regulatorios y las políticas públicas para promover la eficiencia energética en América Latina. En su informe sobre la situación y perspectivas de la eficiencia energética en la región, la CEPAL resalta los avances y desafíos para implementar políticas que favorezcan el uso más eficiente de los recursos energéticos en los edificios. Estas iniciativas se alinean con las metas globales de sostenibilidad, en las que el sector de la construcción juega un papel fundamental en la reducción de emisiones.

En el ámbito internacional, organismos como la Agencia Internacional de Energía (IEA) [1] han destacado que los edificios representan una parte significativa del consumo mundial de energía, y su eficiencia energética es clave para mitigar el cambio climático. La IEA recomienda la adopción de normativas estrictas y el uso de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial, para mejorar la gestión energética en los edificios inteligentes. Estas tecnologías emergentes permiten optimizar el consumo energético de manera dinámica y eficiente, impulsando un futuro más sostenible.

CONCLUSIONES

Los casos analizados resaltan la importancia del diseño bioclimático como una herramienta esencial para reducir el consumo energético y maximizar los recursos naturales disponibles en Latinoamérica. Futuras investigaciones podrían enfocarse en el desarrollo de simulaciones avanzadas que consideren los diversos bioclimas de la región, permitiendo modelar el impacto de estrategias específicas en el consumo eléctrico, ventilación, calefacción e iluminación eficiente. Asimismo, la integración de materiales locales y renovables no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también promueve el desarrollo económico y social en las comunidades locales. En este sentido, se propone explorar nuevos materiales sostenibles disponibles en América Latina, evaluando su eficiencia térmica, costos y capacidad de adaptación a diferentes climas de la región.

La incorporación de fuentes de energía renovable, especialmente la solar, se presenta como una solución viable para cubrir la demanda energética de los edificios inteligentes. En este ámbito, estudios futuros podrían investigar cómo combinar energías renovables con sistemas de almacenamiento y gestión energética avanzada para aumentar la resiliencia y autonomía de los edificios en diferentes escenarios. Paralelamente, los sistemas de gestión energética como los Building Management Systems (BMS) ofrecen una oportunidad significativa para optimizar recursos en tiempo real. Investigaciones adicionales deberían enfocarse en cómo personalizar estas tecnologías para las necesidades específicas de los edificios en América Latina, incluyendo la capacitación de profesionales locales para maximizar su implementación efectiva.

Los avances destacados por organismos como la CEPAL subrayan la necesidad de políticas públicas robustas que incentiven la construcción sostenible. Una línea investigativa pertinente sería el análisis de los impactos a largo plazo de estas políticas en diferentes países de la región, proponiendo ajustes basados en resultados medibles. Además, tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial tienen un gran potencial para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes, como lo sugiere la Agencia Internacional de Energía (IEA). Investigaciones futuras podría explorar cómo estas tecnologías pueden ser adaptadas y escaladas en contextos de bajos recursos, además de abordar desafíos relacionados con la conectividad y la seguridad de los datos.

Los proyectos impulsados por el MAATE y el IIGE en Ecuador demuestran que existe un amplio margen para mejorar la eficiencia energética en edificios públicos. En este contexto, se recomienda investigar estrategias específicas para modernizar infraestructuras antiguas, optimizando el uso de recursos y evaluando la viabilidad de modelos de financiación público-privada. A nivel global, las normativas promovidas por organismos como la IEA sirven como referencia para avanzar en eficiencia energética. Una propuesta investigativa sería analizar cómo las normativas internacionales pueden ser adaptadas al contexto latinoamericano, identificando buenas prácticas que puedan ser replicadas localmente.

Los avances tecnológicos permiten el uso de simulaciones para evaluar escenarios futuros en el consumo energético de edificios inteligentes. Nuevas investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial que integren datos climáticos, económicos y sociales de la región. Finalmente, se destaca la necesidad de fomentar la colaboración regional e internacional para compartir conocimientos y recursos. Las redes colaborativas entre universidades, gobiernos y el sector privado podrían facilitar el desarrollo e implementación de soluciones más efectivas y sostenibles. Con estas conclusiones y propuestas, se establece un marco para continuar avanzando en el estudio y la práctica de la eficiencia energética en edificios inteligentes, promoviendo la sostenibilidad, la innovación y la equidad en América Latina.

REFERENCIAS

- [1] United Nations, "Sustainable Cities and Communities," [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [2] International Energy Agency (IEA), Tracking Buildings 2021, IEA, Paris, 2021. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9c30109f-38a7-4a0b-b159-47f00d65e5be/EnergyEfficiency2021.pdf021>. [Accessed: Oct. 18, 2024].
- [3] V. Marinakis and H. Doukas, "An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 610, 2018, doi: 10.3390/s18020610.
- [4] G. Hayduk, P. Kwasnowski, and Z. Mikoś, "Building management system architecture for large building automation systems," in 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), May 2016, pp. 232–235.
- [5] M. R. Abid, R. Lghoul and D. Benhaddou, "ICT for renewable energy integration into smart buildings: IoT and big data approach," 2017 IEEE AFRICON, Cape Town, South Africa, 2017, pp. 856–861, doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095594.
- [6] D. M. T. E. Ali, V. Motuzienė, and R. Džiugaitė-Tumėnienė, "AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4277, 2024, doi: 10.3390/en17174277.
- [7] A. W. Mahmoud, R. Abdulla, M. E. Rana and H. K. Tripathy, "IoT Based Energy Management Solution for Smart Green Buildings," 2022 International Conference on Advancements in Smart, Secure and Intelligent Computing (ASSIC), Bhubaneswar, India, 2022, pp. 1–7, doi: 10.1109/ASSIC55218.2022.10088306.
- [8] B. Mostafa, S. Ahmed, T. Ghoniemy, and A. Al-Sakkaf, "Towards the Enhancement of Buildings' Sustainability: IoT-Based Building Management Systems (IoT-BMS)," in IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 1396, Cairo, Egypt, May 21–23, 2024, Art. no. 012020, doi: 10.1088/1755-1315/1396/1/012020.
- [9] H. Farzaneh, L. Malehmirchegini, A. Bejan, T. Afolabi, A. Mulumba, and P. P. Daka, "Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 763, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11020763>.
- [10] G. P. R. Filho, L. A. Villas, V. P. Gonçalves, G. Pessin, A. A. F. Loureiro, and J. Ueyama, "Energy-efficient smart home systems: Infrastructure and decision-making process," *Internet of Things*, 1 vol. 8, pp. 153–167, 2019, doi: 10.1016/j.iot.2018.12.004. [10] A. Rossi and G. Martelli, "HVAC efficiency in smart infrastructures," *Journal of Building Energy Research*, vol. 18, pp. 72–85, 2022.
- [11] A. Vintimilla, P. Mera y J. Carrillo, "Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador," ResearchGate, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332089223_Eficiencia_energetica_en_el_sector_residencial_de_la_Ciudad_de_Cuenca_Ecuador. [Accedido: 21-oct-2024].
- [12] CEPAL, "Eficiencia Energética en la Transición Sostenible e Inclusiva de América Latina y el Caribe," Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/estudio_eficiencia_energetica_alc_cepal.pdf. [Accedido: 13-ago-2024].
- [13] R. Martínez, "Eficiencia Energética en Edificios: desafíos en América Latina," *Revista Expofrío y Climatización*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistaexpofrio.com/eficiencia-energetica-en-edificios-desafios-en-america-latina/>. [Accedido: 16-sep-2024].
- [14] BID, "Las redes inteligentes de energía y su implementación en ciudades sostenibles," Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2020. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Las-redes-inteligentes-de-energ%C3%ADa-y-su-implementaci%C3%B3n-en-ciudades-sostenibles-RG-T2058.pdf>. [Accedido: 15-ago-2024].
- [15] M. A. López et al., "La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios: análisis de casos en Brasil y España," Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis Doctoral, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113995/TMALE1de2.pdf>. [Accedido: 15-ago-2024].
- [16] H. P. Das et al., "Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings," arXiv preprint, arXiv:2211.14889, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2211.14889>.

-
- [17] B. Setz et al., "Energy Smart Buildings: Parallel Uniform Cost-Search with Energy Storage and Generation," arXiv preprint, arXiv:2211.08969, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2211.08969>.
- [18] C. Perry et al., "Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings," American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2017. [Online]. Available: <https://www.aceee.org/research-report/a1701>.
- [19] S. Kiliccote et al., "Improving Energy Efficiency via Smart Building Energy Management Systems: A Comparison with Policy Measures," Energy Efficiency Journal, vol. 9, pp. 243-256, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/273192528_Improving_energy_efficiency_via_smart_building_energy_management_systems_A_comparison_with_policy_measures.
- [20] A. Tarantola, "How AI Is Making Buildings More Energy-Efficient," Time Magazine, 2024. [Online]. Available: <https://time.com/7201501/ai-buildings-energy-efficiency/>.
- [21] Acero Verde, "Torre Reforma: Ciudad de México", [Online]. Available: <https://acero-verde.com/torre-reforma-ciudad-de-mexico>. [Accedido: 05-ago-2024].
- [22] Officespace Online, "82 Grayston Drive, Sandton," [Online]. Available: https://www.officespaceonline.co.za/Basket/Building/1542?utm_source=chatgpt.com, [Accedido: 18-sep-2024].
- [23] Sobha Habitat en Bangalore, India," Informe sobre proyectos sostenibles, [Online]. Available: <https://www.sobha.com>, [Accedido: 18-sep-2024].

Ondas gravitacionales: ecos del universo en movimiento

Adrian David Hauser
<https://orcid.org/0000-0001-6579-0099>
adriankrakhauser@gmail.com
Investigador independiente
Alberta-Canadá

Correspondence author: adriankrakhauser@gmail.com

Received (23/08/2024), Accepted (17/10/2024)

Resumen: En este trabajo se presenta un ensayo científico sobre las ondas gravitacionales y su participación en la comprensión de fenómenos fundamentales del universo. Se analiza su descubrimiento, basado en las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein, y el impacto que han tenido en la astronomía moderna. Además, se abordan los avances tecnológicos que han permitido su detección, como los interferómetros LIGO y Virgo, destacando su papel crucial en el desarrollo de una nueva era en la observación del cosmos. Este ensayo también se reflexiona sobre las implicaciones científicas, tecnológicas y filosóficas de las ondas gravitacionales, así como su potencial para transformar nuestro conocimiento sobre agujeros negros, colisiones cósmicas y la estructura del espacio-tiempo. Finalmente, se explora cómo estas investigaciones abren la puerta a preguntas más profundas sobre el origen y la evolución del universo.

Palabras clave: detección de ondas, teoría de la relatividad, agujeros negros

Gravitational Waves: echoes of the universe in motion

Abstract: This paper presents a scientific essay on gravitational waves and their participation in the understanding of fundamental phenomena of the universe. Their discovery, based on the predictions of Einstein's theory of general relativity, and the impact they have had on modern astronomy are analyzed. In addition, the technological advances that have allowed its detection, such as the LIGO and Virgo interferometers, are addressed, highlighting its crucial role in the development of a new era in the observation of the cosmos. This essay also reflects on the scientific, technological, and philosophical implications of gravitational waves, as well as their potential to transform our knowledge about black holes, cosmic collisions, and the structure of space-time. Finally, it explores how this research opens the door to deeper questions about the origin and evolution of the universe.

Keywords: wave detection, theory of relativity, black holes.

I. INTRODUCCIÓN

Las ondas gravitacionales representan uno de los avances más significativos en la ciencia moderna, abriendo nuevas ventanas para la exploración del cosmos [1]. Predichas hace más de un siglo por Albert Einstein en su teoría de la relatividad general, estas ondulaciones en el tejido del espacio-tiempo son generadas por eventos cósmicos de extrema violencia, como colisiones de agujeros negros, fusiones de estrellas de neutrones o explosiones de supernovas. Durante décadas, su existencia fue una hipótesis teórica debido a la complejidad inherente de su detección, ya que los efectos que producen son increíblemente diminutos. No fue hasta el 14 de septiembre de 2015 que se logró la primera detección directa de ondas gravitacionales por el Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO), marcando un momento histórico en la astronomía y confirmando las predicciones de Einstein con precisión asombrosa [2].

Estas ondas no solo corroboraron una de las piezas fundamentales de la relatividad general, sino que también inauguraron una nueva era en la astronomía observacional. Antes de su detección, la observación del universo dependía casi exclusivamente de las ondas electromagnéticas, como la luz visible, las ondas de radio y los rayos X. Sin embargo, las ondas gravitacionales han permitido a los científicos "escuchar" el universo de una manera completamente novedosa, brindando acceso a eventos y regiones del cosmos que antes eran inaccesibles [3]. Este cambio de paradigma amplió significativamente la capacidad de los astrónomos para estudiar fenómenos oscuros y energéticos que no emiten luz, como los agujeros negros. El desarrollo de la tecnología necesaria para detectar ondas gravitacionales ha sido un hito en la ingeniería y la física moderna. Los detectores como LIGO en los Estados Unidos y Virgo en Italia utilizan interferometría láser para medir desplazamientos infinitesimales en la distancia entre espejos situados a kilómetros de distancia [4]. Estas instalaciones detectan cambios del orden de una fracción del diámetro de un protón, una hazaña que resalta la precisión y sofisticación tecnológica alcanzada. Además, proyectos como KAGRA en Japón y el observatorio espacial LISA, previsto para lanzarse en la próxima década, prometen ampliar aún más nuestra capacidad para detectar estas ondulaciones y explorar fenómenos gravitacionales en escalas aún mayores.

El impacto de las ondas gravitacionales va más allá de la física teórica y la astronomía. Su descubrimiento ha inspirado debates filosóficos sobre la naturaleza del espacio y el tiempo, así como sobre el lugar del ser humano en el universo [5]. También ha fomentado la colaboración internacional en la investigación científica, con equipos de todo el mundo trabajando en conjunto para interpretar los datos y explorar nuevas fronteras del conocimiento. Además, la detección de ondas gravitacionales ha estimulado el interés público en la ciencia, capturando la imaginación de las personas y destacando la importancia de la inversión en investigación básica.

A medida que las tecnologías de detección se perfeccionan y se implementan nuevas estrategias para analizar datos, las ondas gravitacionales están comenzando a revelar una imagen más rica y compleja del universo [6]. Este ensayo se centra en explorar los fundamentos teóricos, los avances tecnológicos y las implicaciones científicas de las ondas gravitacionales, así como su relevancia para futuras investigaciones que prometen desentrañar los misterios más profundos del cosmos. La comprensión de estas ondas no solo amplía nuestra perspectiva cósmica, sino que también resalta el ingenio humano para explorar los límites de lo desconocido.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las ondas gravitacionales se encuentran arraigadas en la teoría de la relatividad general, formulada por Albert Einstein en 1915 [7]. Esta teoría revolucionó la comprensión de la gravedad, al conceptualizarla no como una fuerza tradicional, sino como una curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de masa y energía. Según este marco teórico, los objetos masivos deforman el tejido del espacio-tiempo, y esta deformación determina cómo se mueven otros objetos y la luz a su alrededor. Este planteamiento reemplazó la visión newtoniana de la gravedad como una fuerza que actúa instantáneamente a distancia, y estableció una base para explorar fenómenos gravitacionales con un nivel de detalle sin precedentes.

En este contexto, las ondas gravitacionales son ondulaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz [8]. Estas se producen cuando un sistema de masas sufre cambios acelerados de forma no simétrica, como en el caso de la fusión de dos agujeros negros o estrellas de neutrones, eventos que liberan cantidades inmensas de energía en un periodo de tiempo extremadamente corto. Las ondas gravitacionales llevan consigo información directa sobre estos eventos catastróficos y las propiedades de los objetos que los generan, como sus masas, velocidades de rotación y distancias. En esencia, las ondas gravitacionales actúan como "mensajeros cósmicos" que transportan datos desde regiones del universo que, de otro modo, permanecerían inobservables.

El concepto de ondas gravitacionales surgió como una solución matemática a las ecuaciones de campo de Einstein, que describen cómo la energía y la materia influyen en la curvatura del espacio-tiempo. Einstein mismo predijo en 1916 la existencia de estas ondas, pero también reconoció la dificultad extrema de detectarlas, debido a su débil interacción con la materia. Las ondas gravitacionales causan deformaciones minúsculas en las distancias entre objetos; por ejemplo, en la Tierra, estas deformaciones pueden ser del orden de una millonésima de un átomo. Este reto técnico hizo que la búsqueda de ondas gravitacionales se pospusiera durante décadas, hasta que los avances tecnológicos en la interferometría láser permitieron su detección directa en el siglo XXI [9].

Uno de los pilares teóricos clave es que las ondas gravitacionales transportan energía en forma de radiación gravitacional, un fenómeno que afecta la dinámica de los sistemas astronómicos que las producen. Por ejemplo, los pulsos gravitacionales emitidos por un sistema binario de estrellas de neutrones hacen que las órbitas de estas estrellas se encojan con el tiempo, una predicción que fue confirmada indirectamente en 1974 con la observación del púlsar binario PSR B1913+16 por Russell Hulse y Joseph Taylor, quienes ganaron el Premio Nobel de Física en 1993 por este trabajo. Este hallazgo proporcionó una validación indirecta de las ondas gravitacionales antes de su detección directa [10].

Otro aspecto teórico fundamental es cómo las ondas gravitacionales interactúan con el espacio-tiempo. En un universo dominado por la relatividad general, estas ondas pueden alterar la geometría del espacio a medida que pasan, estirándolo y comprimiéndolo perpendicularmente a su dirección de propagación. Esta propiedad se describe mediante los "modos" de polarización de las ondas gravitacionales, conocidos como modos "+" y "x", que son una característica única de las ondas gravitacionales y que las distinguen de otras formas de radiación, como las ondas electromagnéticas [11].

Además, la relatividad general predice que las ondas gravitacionales pueden generarse en cualquier escala, desde procesos cósmicos masivos hasta fluctuaciones cuánticas en el espacio-tiempo. Esto ha dado lugar a teorías que combinan la relatividad general con la mecánica cuántica para explorar cómo las ondas gravitacionales pueden surgir de fenómenos a escalas subatómicas, lo que representa un terreno aún inexplorado y lleno de potencial para la física moderna.

Las teorías asociadas a las ondas gravitacionales no solo consolidan la relatividad general como una teoría integral de la gravedad, sino que también extienden su alcance hacia nuevos dominios de investigación. Estos principios subyacen en el diseño de detectores avanzados como LIGO, Virgo y futuros observatorios espaciales, y proporcionan las herramientas matemáticas y conceptuales para interpretar los datos que estos instrumentos recogen. Así, las ondas gravitacionales no solo validan el genio de Einstein, sino que también expanden nuestra capacidad para comprender el universo en sus escalas más extremas

A. Características de las ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales son perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo que se propagan como ondas a la velocidad de la luz, producidas por movimientos acelerados de grandes masas, especialmente en sistemas astrofísicos extremos [12]. Estas ondas llevan consigo información única sobre los fenómenos que las generan y presentan características fundamentales que las hacen un fenómeno singular dentro de la física moderna.

Propagación y naturaleza de las ondas gravitacionales

A diferencia de las ondas electromagnéticas, que se propagan en el espacio-tiempo, las ondas gravitacionales son ondulaciones del propio tejido del espacio-tiempo. Estas deformaciones se propagan en dos "modos de polarización", conocidos como modos "+" y "x", que describen cómo las ondas estiran y comprimen el espacio-tiempo en direcciones perpendiculares entre sí. La propagación de las ondas gravitacionales está gobernada por las ecuaciones de campo de Einstein en su forma linealizada. En regiones donde la curvatura del espacio-tiempo es débil, las perturbaciones gravitacionales $\bar{h}_{\mu\nu}$ cumplen con una ecuación de onda descrita en (1)

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0, \quad (1)$$

donde $\square$ es el operador d'Alembertiano, definido como se describe en (2)

$$\square = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \quad (2)$$

Esta ecuación indica que las ondas gravitacionales se propagan como ondas armónicas a la velocidad de la luz en el vacío.

Intensidad y amplitud

La amplitud de las ondas gravitacionales disminuye con la distancia al sistema que las genera [13], siguiendo una relación inversamente proporcional a la distancia, $1/r$. Esto implica que la intensidad detectada de las ondas es extremadamente débil a escalas cósmicas, lo que hace que su detección requiera instrumentos de altísima precisión. De esta manera, la deformación causada por una onda gravitacional en un sistema se describe mediante el tensor de perturbación gravitacional $h_{\mu\nu}$, que cuantifica los cambios relativos en las distancias entre puntos en el espacio. Esta deformación, conocida como "tensión gravitacional", es tan pequeña que incluso las ondas gravitacionales más intensas generan variaciones del orden de 10^{-21} , lo que equivale a cambios en una distancia de un millón de kilómetros que no superan el tamaño de un protón.

Fuentes de ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales se producen en situaciones donde existen aceleraciones masivas asimétricas. Algunas de las fuentes más comunes incluyen [15]:

- Sistemas binarios compactos: Fusión de agujeros negros, estrellas de neutrones o combinaciones de ambos.
- Supernovas: Explosiones estelares asimétricas.
- Rotación de estrellas de neutrones deformadas: Pulsares con irregularidades en su estructura generan ondas gravitacionales continuas.
- Inflación cósmica: Oscilaciones en el espacio-tiempo durante los primeros instantes del universo podrían haber generado ondas gravitacionales primordiales.

Polarización y efectos en el espacio-tiempo

Las ondas gravitacionales tienen polarizaciones únicas, que se reflejan en su capacidad para estirar y comprimir distancias de forma alternada en direcciones ortogonales [16]. Esto es una característica distintiva que las separa de otros tipos de ondas como las electromagnéticas. Por ejemplo, si una onda gravitacional pasa a través de un conjunto de puntos dispuestos en un círculo, estos se deformarán en un patrón que alterna entre las formas de "+" y "x".

Relación con la energía y la dinámica orbital

Las ondas gravitacionales transportan energía en forma de radiación gravitacional, lo que afecta la dinámica de los sistemas binarios que las producen [17]. La pérdida de energía debido a la emisión de ondas gravitacionales provoca que las órbitas de los cuerpos binarios se reduzcan progresivamente, lo cual fue confirmado con la observación del púlsar binario PSR B1913+16. La energía emitida por un sistema binario en forma de ondas gravitacionales puede describirse mediante la ecuación (3)

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{(m_1 m_2)^2 (m_1 + m_2)}{r^5} \quad (3)$$

donde G es la constante gravitacional, c la velocidad de la luz, m_1 y m_2 las masas de los cuerpos, y r la separación orbital.

Detección de ondas gravitacionales

La detección directa de ondas gravitacionales se logró por primera vez en 2015 por los observatorios LIGO y Virgo, con la observación de la fusión de dos agujeros negros [18]. Los detectores utilizan interferometría láser para medir las diminutas deformaciones causadas por las ondas al pasar por la Tierra. La precisión de estos instrumentos es tal que pueden detectar cambios en longitudes equivalentes a una fracción del tamaño de un protón.

Características únicas y relevancia científica

Las ondas gravitacionales pueden atravesar regiones opacas a las ondas electromagnéticas, lo que permite estudiar fenómenos ocultos como los interiores de las supernovas o la dinámica de los agujeros negros. Además, proporcionan datos sin interacción con la materia intermedia, lo que las convierte en una herramienta limpia para estudiar eventos cósmicos [19]. También es importante destacar que, en conjunto con observaciones electromagnéticas, las ondas gravitacionales forman parte de la astronomía multimensajero, una nueva era en la exploración del cosmos. De manera que, las ondas gravitacionales representan una ventana única hacia los eventos más extremos del universo, permitiendo a los científicos explorar fenómenos que antes eran inalcanzables. Su estudio no solo valida la teoría de la relatividad general, sino que también abre nuevas preguntas sobre la naturaleza de la gravedad y su integración con otras fuerzas fundamentales del universo.

B. Los avances tecnológicos y las implicaciones científicas de las ondas gravitacionales

Los avances tecnológicos y las implicaciones científicas de las ondas gravitacionales han transformado la forma en que entendemos el universo, marcando el inicio de una nueva era en la astrofísica y la cosmología. Desde su detección en 2015 por los observatorios LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) y Virgo, las ondas gravitacionales se han convertido en una herramienta revolucionaria para explorar fenómenos cósmicos extremos y validar teorías fundamentales de la física.

Interferometría láser de alta precisión:

Los detectores LIGO y Virgo utilizan tecnología de interferometría láser para medir deformaciones minúsculas en el espacio-tiempo, causadas por ondas gravitacionales al pasar por la Tierra. Estos detectores son capaces de registrar cambios en distancias menores que el diámetro de un protón, gracias a brazos de varios kilómetros de longitud que reflejan haces láser repetidamente para aumentar la sensibilidad.

Sistemas de aislamiento sísmico:

Los detectores están diseñados para minimizar el ruido sísmico y ambiental, utilizando sistemas avanzados de aislamiento que permiten distinguir las señales de las ondas gravitacionales de las vibraciones terrestres.

Algoritmos de procesamiento de datos:

La identificación de ondas gravitacionales requiere la comparación de las señales registradas con modelos teóricos generados mediante simulaciones computacionales. Los avances en inteligencia artificial y aprendizaje automático han mejorado significativamente la detección y análisis de estas señales.

Colaboración global:

Los observatorios LIGO y Virgo, junto con el detector japonés KAGRA, forman una red global que permite una mayor precisión en la localización de fuentes de ondas gravitacionales. Esto ha sido crucial para realizar observaciones coordinadas con telescopios ópticos, de rayos X y de radio, inaugurando la astronomía multimensajero.

Desarrollo de futuros detectores:

Se están diseñando detectores más avanzados, como el observatorio espacial LISA (Laser Interferometer Space Antenna), que estudiará ondas gravitacionales de frecuencias más bajas, y el Einstein Telescope, un detector terrestre de tercera generación que será más sensible y abarcará un rango más amplio de eventos cósmicos.

C. Implicaciones científicas

La detección de ondas gravitacionales ha proporcionado una confirmación directa de una predicción clave de la teoría de la relatividad general de Einstein, consolidando su posición como una de las teorías más robustas de la física. Además, han permitido estudiar eventos como la fusión de agujeros negros y estrellas de neutrones, que antes eran inobservables mediante ondas electromagnéticas. Estos fenómenos ofrecen información crucial sobre la dinámica de los sistemas binarios y los procesos de colapso gravitacional.

Las ondas gravitacionales primordiales, generadas durante la inflación cósmica, podrían ofrecer pistas sobre los primeros instantes del universo y las propiedades fundamentales del espacio-tiempo. La detección de estas ondas abriría una ventana única al universo temprano. También proporcionan una nueva forma de medir parámetros cosmológicos, como la constante de Hubble, con un nivel de precisión que complementa las mediciones tradicionales basadas en observaciones electromagnéticas. La observación simultánea de ondas gravitacionales y señales electromagnéticas ha revolucionado la astrofísica, permitiendo estudios más completos de eventos como la fusión de estrellas de neutrones, que generan ondas gravitacionales, rayos gamma y otros tipos de radiación.

La comparación de las observaciones con las predicciones de la relatividad general permite buscar desviaciones que podrían revelar nuevas teorías de la gravedad o indicios de física más allá del modelo estándar. Los avances tecnológicos y científicos en el estudio de las ondas gravitacionales han impulsado innovaciones en áreas como la óptica, la mecánica cuántica, la ciencia de materiales y el procesamiento de datos.

El futuro del estudio de las ondas gravitacionales es prometedor. Con el desarrollo de detectores más avanzados y colaboraciones globales más amplias, se espera descubrir nuevos tipos de fuentes gravitacionales, como supernovas asimétricas o el fondo de ondas gravitacionales estocásticas generado por eventos cósmicos colectivos. Además, la integración de estas observaciones con datos electromagnéticos y de neutrinos permitirá una comprensión más completa del universo.

CONCLUSIONES

Las ondas gravitacionales representan uno de los avances más significativos en la comprensión del universo, ya que nos ofrecen una nueva forma de observar fenómenos cósmicos que antes eran inalcanzables. Su detección válida de manera directa la predicción de la teoría de la relatividad general de Einstein, mostrando cómo las distorsiones en el tejido espacio-temporal pueden propagarse como ondas desde eventos de alta energía, como fusiones de agujeros negros o colisiones de estrellas de neutrones. Este descubrimiento no solo reafirma nuestra comprensión de las leyes fundamentales de la física, sino que también abre caminos para explorar dinámicas cósmicas extremas con una precisión sin precedentes.

Los avances tecnológicos asociados a la detección de ondas gravitacionales han impulsado una revolución en la instrumentación científica. La capacidad de los interferómetros láser, como LIGO y Virgo, para detectar cambios minúsculos en distancias a escala subatómica refleja una ingeniería de precisión extraordinaria. Estas innovaciones no solo benefician a la astronomía, sino que también tienen aplicaciones en áreas como la óptica, la computación de alta capacidad y la inteligencia artificial, generando impactos interdisciplinarios que trascienden la astrofísica.

El impacto de las ondas gravitacionales se extiende al ámbito cosmológico, donde ofrecen una herramienta única para estudiar los primeros instantes del universo. Las ondas gravitacionales primordiales, generadas durante la inflación cósmica, tienen el potencial de proporcionar evidencia directa sobre los eventos iniciales del Big Bang y las propiedades fundamentales del espacio-tiempo. Este enfoque complementa las observaciones electromagnéticas, permitiendo una visión más completa y detallada del origen y evolución del cosmos.

El estudio de las ondas gravitacionales también ha fomentado la colaboración científica global. Redes de detectores en diferentes continentes, como LIGO, Virgo y KAGRA, trabajan de manera conjunta para aumentar la precisión de las detecciones y la localización de fuentes. Esta cooperación internacional no solo mejora la calidad de los datos obtenidos, sino que también fortalece las relaciones entre comunidades científicas de todo el mundo, promoviendo una ciencia más inclusiva y colectiva.

Las ondas gravitacionales representan una oportunidad única para explorar preguntas fundamentales sobre la naturaleza del universo y su estructura. Al integrar las observaciones de ondas gravitacionales con datos de otras fuentes, como la radiación electromagnética y los neutrinos, los científicos pueden abordar problemas complejos que requieren múltiples perspectivas. Este enfoque multimensajero está transformando nuestra capacidad de interpretar los fenómenos cósmicos, consolidando a las ondas gravitacionales como una herramienta indispensable en la búsqueda del conocimiento universal.

REFERENCIAS

- [1] C. Moreno, R. García-Salcedo, A. Lara, y J. Ramírez, "Introducción a las ondas gravitacionales," *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 2, no. 3, p. 28, 2008.
- [2] G. González y A. Sintés, "Ondas gravitacionales: mensajeras del universo," *Revista Española de Física*, vol. 29, no. 4, pp. 14-18, 2015.
- [3] A. M. S. Olives y B. Sorazu, "La observación de ondas gravitacionales con LIGO," *Investigación y Ciencia*, no. 485, pp. 16-26, 2017.
- [4] M. Pitkin, S. Reid, S. Rowan, y J. Hough, "Gravitational wave detection by interferometry (ground and space)," *Living Reviews in Relativity*, vol. 14, pp. 1-75, 2011.
- [5] Y. Gong, J. Luo, y B. Wang, "Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects," *Nature Astronomy*, vol. 5, no. 9, pp. 881-889, 2021.
- [6] L. Ju, D. G. Blair, y C. Zhao, "Detection of gravitational waves," *Reports on Progress in Physics*, vol. 63, no. 9, pp. 1317, 2000.
- [7] K. Riles, "Gravitational waves: Sources, detectors and searches," *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 68, pp. 1-54, 2013.
- [8] B. F. Schutz, "Networks of gravitational wave detectors and three figures of merit," *Classical and Quantum Gravity*, vol. 28, no. 12, art. no. 125023, 2011.
- [9] S. Rowan y J. Hough, "Gravitational wave detection by interferometry (ground and space)," *Living Reviews in Relativity*, vol. 3, no. 1, art. no. 3, 2000.
- [10] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, M. R. Abernathy, K. Ackley, C. Adams, ... y R. T. DeRosa, "Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors," *Classical and Quantum Gravity*, vol. 34, no. 4, art. no. 044001, 2017.
- [11] J. Weber, "Detection and generation of gravitational waves," *Physical Review*, vol. 117, no. 1, pp. 306, 1960.
- [12] W. Zhao y Y. Zhang, "Relic gravitational waves and their detection," *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, vol. 74, no. 4, art. no. 043503, 2006.
- [13] S. Dimopoulos, P. W. Graham, J. M. Hogan, M. A. Kasevich, y S. Rajendran, "Gravitational wave detection with atom interferometry," *Physics Letters B*, vol. 678, no. 1, pp. 37-40, 2009.
- [14] C. Bond, D. Brown, A. Freise, y K. A. Strain, "Interferometer techniques for gravitational-wave detection," *Living Reviews in Relativity*, vol. 19, pp. 1-217, 2016.
- [15] A. Królak y M. Patil, "The first detection of gravitational waves," *Universe*, vol. 3, no. 3, art. no. 59, 2017.
- [16] W. T. Ni, "Space gravitational wave detection: Progress and outlook," *arXiv preprint arXiv:2409.00927*, 2024.
- [17] K. Goda, O. Miyakawa, E. E. Mikhailov, S. Saraf, R. Adhikari, K. McKenzie, ... y N. Mavalvala, "A quantum-enhanced prototype gravitational-wave detector," *Nature Physics*, vol. 4, no. 6, pp. 472-476, 2008.
- [18] C. Cutler, "Angular resolution of the LISA gravitational wave detector," *Physical Review D*, vol. 57, no. 12, pp. 7089-7102, 1998.
- [19] S. L. Danilishin y F. Y. Khalili, "Quantum measurement theory in gravitational-wave detectors," *Living Reviews in Relativity*, vol. 15, pp. 1-147, 2012.

El papel de los materiales avanzados en la electrónica flexible

Omar Flor

<https://orcid.org/0000-0002-3455-5982>

omar.flor@udla.edu.ec

Universidad de las Américas

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Quito-Ecuador

Correspondence author: omar.flor@udla.edu.ec

Received (23/08/2024), Accepted (17/10/2024)

Resumen: La electrónica flexible ha emergido como una de las áreas de mayor interés en la ciencia de materiales y tecnología debido a su potencial para revolucionar sectores como la salud, la energía, y la electrónica de consumo. Este artículo explora el papel crucial que desempeñan los materiales avanzados en el desarrollo de esta tecnología, incluyendo polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas. Además, se analizan las propiedades clave que deben cumplir estos materiales, así como las aplicaciones actuales y futuras de la electrónica flexible. La investigación utiliza una revisión sistemática de literatura y propone simulaciones computacionales para evaluar las capacidades de materiales seleccionados de estudio.

Palabras clave: nanomateriales, polímeros conductores, películas delgadas.

The role of advanced materials in flexible electronics

Abstract: Flexible electronics has emerged as one of the most promising areas in materials science and technology due to its potential to revolutionize healthcare, energy, and consumer electronics. This article explores the critical role of advanced materials, including conductive polymers, nanomaterials, and thin films, in developing flexible electronics. Key material properties, as well as current and future applications, are discussed. The research employs a systematic literature review and proposes computational simulations to evaluate the capabilities of selected materials.

Keywords: nanomaterials, conductive polymers, thin films.

I. INTRODUCCIÓN

La transición de la electrónica rígida a la flexible es esencial para aplicaciones emergentes en energías renovables, biomedicina y dispositivos como pantallas plegables. La rigidez de los componentes electrónicos tradicionales limita su integración en superficies curvas o dinámicas, restringiendo su uso en tecnologías portátiles y en sistemas que requieren adaptabilidad. En el ámbito de las energías renovables, la incorporación de materiales avanzados como el grafeno ha permitido el desarrollo de paneles solares flexibles y transparentes, mejorando la eficiencia y versatilidad de la captación de energía solar [1][2].

Otra área en que la flexibilidad de los dispositivos electrónicos es crucial, es en la biomedicina. Allí, se requieren para crear sensores que se adapten a la piel o a tejidos internos, permitiendo una monitorización más precisa y menos invasiva. Asimismo, en la industria de las pantallas, la demanda de dispositivos más compactos y versátiles ha impulsado la investigación en materiales que permitan la fabricación de pantallas plegables y enrollables, ofreciendo nuevas posibilidades en el diseño de dispositivos electrónicos [2].

La nanotecnología desempeña un papel fundamental en esta transición, permitiendo la manipulación de materiales a escala nanométrica para desarrollar componentes electrónicos más pequeños, eficientes y flexibles [3]. Sin embargo, la integración de estos materiales en sistemas electrónicos plantea desafíos significativos, como la necesidad de garantizar la estabilidad y durabilidad de los dispositivos flexibles, así como la compatibilidad con los procesos de fabricación existentes. A pesar de estos retos, los avances en materiales avanzados y nanotecnología continúan impulsando el desarrollo de la electrónica flexible, abriendo nuevas oportunidades en diversas aplicaciones tecnológicas.

II. MATERIALES AVANZADOS EN LA ELECTRÓNICA FLEXIBLE

A. *Polímeros Conductores*

Los polímeros conductores han demostrado ser fundamentales para el desarrollo de la electrónica flexible gracias a su capacidad de combinar propiedades mecánicas, eléctricas y químicas únicas. El poliacetileno (PA), por ejemplo, destaca como el precursor de los polímeros conductores debido a su alta conductividad eléctrica obtenida mediante dopaje. Sin embargo, su baja estabilidad ambiental limita su uso práctico en aplicaciones a largo plazo [4]. De manera similar, el poli(tiofeno) (PTh) combina estabilidad térmica y ambiental con propiedades ópticas y electrónicas ajustables, lo que lo convierte en un material clave para supercapacitores, sensores y celdas solares. No obstante, sus costos de producción elevados dificultan su escalabilidad [5].

Otro polímero prominente es la polianilina (PANI), conocida por su flexibilidad mecánica, buena conductividad y estabilidad térmica. Esto la hace ideal para aplicaciones en sensores y recubrimientos anticorrosivos, aunque su baja solubilidad en solventes comunes representa un obstáculo significativo [6]. Por su parte, el polipirrol (PPy) ofrece alta estabilidad redox y facilidad de síntesis, siendo ampliamente utilizado en biosensores y recubrimientos conductores. Sin embargo, su baja estabilidad mecánica y sensibilidad a la humedad limitan su durabilidad en ciertas aplicaciones [7].

En el caso del poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), su alta transparencia óptica y bajo potencial redox lo hacen indispensable en electrodos transparentes, dispositivos OLED y textiles conductores. No obstante, los costos asociados a su síntesis y las limitaciones en su funcionalización requieren atención en investigaciones futuras [8]. Asimismo, el poli (fenileno vinileno) (PPV) se destaca por sus propiedades de electroluminiscencia y estabilidad ambiental, siendo usado en OLEDs y celdas solares orgánicas. A pesar de estas ventajas, su baja eficiencia cuántica y susceptibilidad a la degradación por luz ultravioleta restringen su rendimiento [9].

El poli(fenileno) y el poli(parafenileno) (PPP) ofrecen alta cristalinidad y estabilidad química, características valiosas para dispositivos electrónicos. Sin embargo, su alta rigidez y complejidad en el procesamiento representan desafíos técnicos que deben superarse [10]. Estas limitaciones generales de los polímeros conductores resaltan la necesidad de seguir investigando formulaciones híbridas y nuevas técnicas de fabricación que optimicen su rendimiento y viabilidad económica en aplicaciones prácticas.

El PEDOT: PSS (poli(3,4-etilenodioxitiofeno) polisulfonato de estireno) es un polímero conductor ampliamente estudiado y utilizado debido a su combinación única de propiedades. Se compone de dos polielectrolitos: el PEDOT, que fue citado anteriormente y que proporciona la conductividad eléctrica; y el PSS, que actúa como un dopante y facilita la procesabilidad en solución acuosa [11]. Esta combinación resulta en un material transparente, flexible y con una conductividad eléctrica moderada, lo que lo hace atractivo para diversas aplicaciones. Entre sus potencialidades destaca su capacidad para formar películas delgadas y uniformes mediante técnicas de recubrimiento sencillas como el spin-coating o la impresión por inyección de tinta, lo que abarata su producción y facilita su integración en dispositivos. Además, su relativa estabilidad ambiental y su biocompatibilidad (aunque con ciertas reservas) amplían aún más su abanico de aplicaciones. El PEDOT: PSS ha encontrado uso en diversas áreas, incluyendo pantallas táctiles, dispositivos electrocrómicos, células solares orgánicas, biosensores y electrónica flexible. Su capacidad para reemplazar al óxido de indio y estaño (ITO), un material frágil y costoso, en ciertas aplicaciones de electrodos transparentes es una de sus ventajas más significativas [11].

Sin embargo, el PEDOT: PSS también presenta limitaciones importantes. Su conductividad, aunque adecuada para muchas aplicaciones, es generalmente inferior a la de los metales conductores tradicionales. Además, la presencia del PSS puede afectar negativamente la estabilidad a largo plazo del material, especialmente en ambientes húmedos, debido a su higroscopicidad. La morfología del PEDOT: PSS, que consiste en una mezcla compleja de dominios ricos en PEDOT y PSS, influye significativamente en sus propiedades eléctricas y mecánicas, y su control preciso es un desafío. Otro aspecto crucial es la biocompatibilidad. Si bien se considera biocompatible en ciertas aplicaciones, estudios han demostrado que la presencia del PSS puede inducir respuestas inflamatorias en algunos sistemas biológicos, lo que limita su uso en implantes a largo plazo o aplicaciones que requieran contacto directo con tejidos vivos. Por lo tanto, la modificación del PEDOT: PSS, mediante la adición de aditivos, el postratamiento o la síntesis de nuevos copolímeros, es un área de investigación activa para superar estas limitaciones y explotar al máximo su potencial.

B. Nanomateriales

Los nanomateriales, definidos como estructuras con al menos una dimensión entre 1 y 100 nanómetros [12], han revolucionado el campo de la ciencia de materiales debido a sus propiedades únicas. Aunque sus orígenes se remontan a aplicaciones antiguas como los vidrios coloreados romanos, el concepto moderno de nanotecnología fue propuesto por Richard Feynman en 1959, seguido por importantes descubrimientos como los fullerenos (1985), nanotubos de carbono (1991) y el grafeno (2004). Estas estructuras exhiben características excepcionales, como una superficie específica extremadamente alta, propiedades electrónicas y ópticas dependientes del tamaño, y comportamientos únicos en términos de resistencia mecánica y conductividad térmica [13].

En la actualidad, los avances en nanomateriales han permitido desarrollos significativos en múltiples campos, aunque su producción enfrenta desafíos importantes. Los nanotubos de carbono, el grafeno y los emergentes MXenes han demostrado aplicaciones prometedoras en electrónica flexible, sensores y almacenamiento de energía [14]. Sin embargo, la industria aún lucha con obstáculos como la producción de estructuras libres de defectos a escala industrial, la escalabilidad de métodos de síntesis y la sostenibilidad de los procesos de fabricación, lo que ha impulsado la búsqueda de técnicas más económicas y ecológicas.

Las aplicaciones de los nanomateriales son vastas y continúan expandiéndose, abarcando desde el almacenamiento de energía hasta la medicina. Se utilizan en baterías y supercapacitores para mejorar la densidad energética, en tratamiento ambiental como catalizadores, en electrónica para crear transistores más eficientes, y en medicina para la liberación controlada de fármacos. El futuro del campo se orienta hacia la creación de materiales híbridos multifuncionales y aplicaciones sostenibles, como celdas solares mejoradas y materiales para captura de carbono, aunque superar las barreras económicas y técnicas mediante la automatización y métodos de fabricación ecológicos sigue siendo un objetivo crucial para expandir su impacto en tecnologías futuras [15].

C. Películas Delgadas

Las películas delgadas, tanto de óxidos metálicos como de materiales orgánicos, lideran la evolución de dispositivos electrónicos avanzados debido a su capacidad para combinar propiedades ópticas y eléctricas en una estructura ultrafina. Los óxidos metálicos como el óxido de indio y estaño (ITO) son especialmente valorados en la industria tecnológica por su alta transparencia en el rango visible del espectro electromagnético y su excelente conductividad eléctrica. Estas características los convierten en componentes clave para pantallas táctiles, paneles OLED y celdas solares flexibles [16]. En el caso de los materiales orgánicos, como los derivados del poli(fenileno vinileno) y los materiales basados en fullereno, las películas delgadas han permitido la integración de tecnologías más sostenibles y económicas. Estas películas pueden ser procesadas a bajas temperaturas y depositadas sobre sustratos flexibles, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de dispositivos portátiles y ligeros. Además, los avances en técnicas de deposición, como la evaporación térmica y el recubrimiento por rotación, han mejorado significativamente la uniformidad y el rendimiento de estas capas ultrafinas [17].

La combinación de transparencia óptica y conductividad eléctrica que ofrecen estas películas es esencial para aplicaciones como las pantallas OLED. En estos dispositivos, las películas delgadas permiten el paso de la luz emitida por las capas emisoras internas, mientras que las capas conductoras facilitan la inyección eficiente de carga. Asimismo, en las celdas solares flexibles, estas películas no solo maximizan la captura de luz, sino que también optimizan el transporte de carga, lo que resulta en una mayor eficiencia energética [18]. A pesar de estas ventajas, las películas delgadas enfrentan desafíos como la degradación en condiciones ambientales adversas y la dependencia de materiales como el indio, que es costoso y tiene reservas limitadas. Las investigaciones actuales están explorando alternativas basadas en óxidos metálicos dopados y materiales híbridos orgánico-inorgánicos para superar estas limitaciones y mejorar la sostenibilidad de estas tecnologías [19].

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque de revisión sistemática de literatura para examinar el papel de los materiales avanzados, como polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas, en el desarrollo de la electrónica flexible. La revisión abarca artículos recientes sobre las propiedades clave que deben cumplir estos materiales, tales como conductividad, flexibilidad y durabilidad, y las aplicaciones actuales y emergentes de esta tecnología. Adicionalmente, se realizarán simulaciones computacionales para evaluar el rendimiento de los materiales seleccionados. Estas simulaciones se llevarán a cabo utilizando modelos computacionales avanzados, con el objetivo de predecir el comportamiento de los materiales en condiciones operativas reales y proporcionar una base para futuras investigaciones experimentales.

IV. RESULTADOS

La selección bibliográfica realizada para este estudio se llevó a cabo mediante un proceso riguroso que garantizó la relevancia, calidad y actualidad de las fuentes consultadas. En primer lugar, se empleó una revisión sistemática de literatura que abarcó artículos científicos, libros y recursos en línea especializados, con el fin de identificar las investigaciones más relevantes y actuales sobre los materiales avanzados en electrónica flexible, específicamente los polímeros conductores, nanomateriales y películas delgadas.

El proceso comenzó con una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar. Se utilizaron términos clave como "conductive polymers", "nanomaterials in flexible electronics", "thin films for flexible devices", "MXenes", "graphene", y "PEDOT:PSS", entre otros, para asegurar la cobertura de los aspectos fundamentales del tema. A partir de esta búsqueda, se seleccionaron aquellos artículos que presentaban estudios experimentales, revisiones críticas o avances significativos en la comprensión de las propiedades y aplicaciones de los materiales avanzados en electrónica flexible. Se prestó especial atención a la calidad de las publicaciones, priorizando artículos revisados por pares y de alto impacto en revistas especializadas. Además, se incluyeron investigaciones que abordaran tanto las aplicaciones prácticas de estos materiales como los desafíos técnicos y económicos que enfrentan en la fabricación y escalabilidad de las tecnologías. La selección también consideró la diversidad de fuentes, abarcando desde estudios de laboratorio hasta aplicaciones industriales, para proporcionar una visión completa y balanceada del estado actual y las perspectivas futuras de estos materiales.

El proceso de selección también contempló el análisis de la relevancia temporal de las publicaciones, priorizando aquellas que fueron publicadas en los últimos cinco años, dado el ritmo acelerado de la innovación en el campo de la electrónica flexible. Finalmente, se integraron recursos de fuentes confiables en línea para complementar la información científica, asegurando que la revisión bibliográfica estuviera alineada con las tendencias más recientes y las necesidades tecnológicas emergentes en el ámbito de la electrónica flexible.

De lo anterior se puede indicar que los polímeros conductores han emergido como materiales clave en el desarrollo de la electrónica flexible, debido a su capacidad para integrar propiedades mecánicas, eléctricas y químicas únicas. El poliacetileno, precursor destacado en este campo, es conocido por su alta conductividad eléctrica, lograda a través del dopaje, aunque su baja estabilidad ambiental limita su uso a largo plazo. En un contexto similar, el poli(tiofeno) sobresale por su estabilidad térmica y ambiental, junto con propiedades ópticas y electrónicas ajustables, lo que lo convierte en un material fundamental en aplicaciones como supercapacitores, sensores y celdas solares. Sin embargo, sus costos de producción elevados representan una barrera para su implementación a gran escala. Otros polímeros como la polianilina, conocida por su flexibilidad mecánica y estabilidad térmica, y el polipirrol, valorado por su estabilidad redox, también presentan aplicaciones prometedoras, aunque sus limitaciones como la baja solubilidad en solventes y la sensibilidad a la humedad aún deben ser superadas para una adopción más amplia. Asimismo, el poli(3,4-etilendioxitiofeno), ampliamente utilizado en electrodos transparentes y dispositivos OLED, enfrenta desafíos en términos de costos de síntesis y funcionalización. A pesar de los avances en estos materiales, sigue siendo necesario continuar con la investigación para superar sus limitaciones y mejorar su rendimiento y viabilidad económica.

Por otro lado, los nanomateriales han revolucionado el campo de la ciencia de materiales gracias a sus propiedades excepcionales, como su alta superficie específica y sus comportamientos únicos en términos de resistencia mecánica y conductividad térmica. Estos materiales, como los nanotubos de carbono, grafeno y los emergentes MXenes, han demostrado ser prometedores en aplicaciones de electrónica flexible, sensores y almacenamiento de energía. No obstante, la producción de estructuras libres de defectos a escala industrial sigue siendo un desafío significativo, y la escalabilidad de los métodos de síntesis continúa siendo un obstáculo. A pesar de ello, los avances recientes en nanotecnología han permitido desarrollos importantes, con aplicaciones que abarcan desde la mejora en la densidad energética de baterías y supercondensadores hasta su uso en la medicina, como en la liberación controlada de fármacos. En este sentido, el futuro de los nanomateriales apunta a la creación de materiales híbridos multifuncionales y sostenibles, a la par que se busca superar las barreras económicas y técnicas a través de la automatización y métodos de fabricación más ecológicos.

En cuanto a las películas delgadas, estas han emergido como componentes esenciales en la evolución de dispositivos electrónicos avanzados, gracias a su capacidad para integrar propiedades ópticas y eléctricas en una estructura ultrafina. Los óxidos metálicos, como el óxido de indio y estaño, son particularmente valorados por su alta transparencia y excelente conductividad eléctrica, lo que los convierte en materiales clave para pantallas táctiles, paneles OLED y celdas solares flexibles. Por su parte, los materiales orgánicos, como los derivados del poli(fenileno vinileno) y los basados en fullereno, han permitido el desarrollo de tecnologías más sostenibles y económicas, ya que pueden procesarse a bajas temperaturas y depositarse sobre sustratos flexibles. Sin embargo, las películas delgadas aún enfrentan desafíos, como la degradación en condiciones ambientales adversas y la dependencia de materiales costosos, como el indio. Las investigaciones actuales se concentran en encontrar alternativas basadas en óxidos metálicos dopados y materiales híbridos orgánicos-inorgánicos que mejoren la sostenibilidad de estas tecnologías y optimicen su rendimiento.

Propuestas de simulaciones

Se seleccionaron tres materiales representativos por su relevancia en las áreas de electrónica flexible, almacenamiento de energía y dispositivos optoelectrónicos, además de su potencial para superar los retos actuales en términos de costos, rendimiento y sostenibilidad. Las simulaciones se centran en entender cómo optimizar sus propiedades y mejorar la viabilidad económica y técnica de su implementación en aplicaciones de vanguardia. Estos materiales son el poli(tiofeno), debido a su estabilidad térmica y propiedades electrónicas ajustables, que pueden ser muy útiles en supercondensadores y sensores. El grafeno, con su alta conductividad y resistencia mecánica, lo que es ideal para evaluar su integración en dispositivos flexibles de alto rendimiento. Por último, se eligió el óxido de indio y estaño (ITO), el cual es fundamental para pantallas táctiles y celdas solares, a pesar de sus desafíos de costo y degradación, con el objetivo de explorar alternativas sostenibles y optimizar su rendimiento. Estas simulaciones permitirán obtener conclusiones sobre su viabilidad y comportamiento.

El procedimiento propuesto se resume en la tabla 1, donde se muestran los pasos y elementos constitutivos del experimento.

Tabla 1. Configuración y ejecución de las simulaciones para los materiales propuestos.

Elemento	Descripción
Programas de Simulación	COMSOL Multiphysics: Simula fenómenos físicos de materiales conductores, semiconductores y ópticos. Se utilizará para estudiar conductividad, estabilidad térmica y propiedades ópticas.
	Materials Studio: Simula y analiza materiales a nivel atómico, centrado en estructura molecular, interacciones y propiedades mecánicas.
	ANSYS: Simula mecánicas y térmicas, evaluando la integridad estructural y resistencia de los materiales.
	Gaussian: Software de química computacional para estudiar propiedades electrónicas mediante DFT.
Parámetros a Considerar	Conductividad eléctrica: Medición de la capacidad del material para conducir electricidad, bajo diferentes condiciones de dopaje.
	Estabilidad térmica: Evaluación de la respuesta del material a variaciones de temperatura, observando la degradación de propiedades.
	Propiedades ópticas: Absorción, reflexión y transmisión de luz, particularmente en poli(tiofeno) y ITO.
	Propiedades mecánicas: Comportamiento bajo esfuerzo, incluyendo flexibilidad, resistencia a la tracción y deformación.
	Resistencia a la humedad y degradación: Evaluación de la durabilidad, especialmente en poliacetileno, bajo condiciones ambientales extremas.
Condiciones y Limitantes	Condiciones ambientales: Simulaciones a 25°C y 50% de humedad relativa, salvo indicación contraria.
	Tamaño de la muestra: Muestras representativas a escala nanométrica o microscópica.
	Límites de costo: Consideración de costos, especialmente en materiales como el ITO, evaluando alternativas más económicas.
	Limitación de tiempo: Simulaciones con ciclos no superiores a 24 horas para cada conjunto de condiciones.
	Recursos computacionales: Simulaciones en estaciones de trabajo con GPUs de alto rendimiento o clusters de computación.
Procedimiento	Preparación de los materiales: Importación de las estructuras atómicas de los tres materiales en los programas, optimización de la geometría molecular.
	Configuración de condiciones iniciales: Definición de temperatura, humedad y esfuerzo para cada material.
	Ejecución de simulaciones: Simulación de propiedades electrónicas y térmicas en poli(tiofeno), mecánicas y eléctricas en grafeno, y transmisión de luz en ITO.
	Análisis de resultados: Comparación de resultados con expectativas teóricas y literatura, identificación de patrones de comportamiento y áreas de mejora.
	Optimización: Ajuste de parámetros para optimizar rendimiento, estabilidad y viabilidad económica.
	Validación: Realización de simulaciones adicionales para validar resultados y confirmar conclusiones.

CONCLUSIONES

Las investigaciones sobre materiales avanzados han mostrado un potencial significativo en el ámbito de la electrónica flexible, destacándose por su capacidad para integrar propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas de manera innovadora. Estos materiales no solo permiten la fabricación de dispositivos más eficientes y adaptables, sino que también abren la puerta a soluciones más sostenibles en diversas aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, a pesar de los avances conseguidos, la integración de estos materiales en aplicaciones comerciales enfrenta retos importantes, como la mejora de la estabilidad a largo plazo, la optimización de su desempeño y la reducción de los costos asociados a su producción. Para hacer frente a estas limitaciones, es necesario continuar con la investigación para perfeccionar los procesos de fabricación y fomentar la producción a gran escala sin comprometer las propiedades esenciales de los materiales.

En este contexto, las investigaciones futuras deben orientarse hacia el desarrollo de materiales híbridos que aprovechen las propiedades complementarias de los polímeros y los nanomateriales. Estos materiales híbridos pueden ofrecer una mejor combinación de flexibilidad, conductividad y estabilidad, abriendo nuevas posibilidades para su aplicación en dispositivos más versátiles y económicos. Asimismo, la optimización de las técnicas de fabricación, incluyendo la mejora de los procesos de dopaje, la deposición y la escalabilidad de la producción, es crucial para reducir los costos y aumentar la viabilidad comercial de los dispositivos fabricados con estos materiales. Un desafío adicional es la evaluación del impacto ambiental de estos materiales, ya que su implementación a gran escala debe ser sostenible y no comprometer los recursos naturales ni generar efectos adversos a largo plazo. En conjunto, estos esfuerzos contribuirán a un futuro más prometedor para la electrónica flexible, garantizando que los avances en este campo sean tanto innovadores como sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] D. Corzo, G. Tostado-Blázquez, y D. Baran, "Flexible Electronics: Status, Challenges and Opportunities," *Frontiers in Electronics*, vol. 1, 2020. doi: 10.3389/felec.2020.594003.
- [2] J. M. González-Domínguez, "Grafeno: Propiedades y Aplicaciones en Ingeniería," Universidad de Valladolid, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/70796/1/TFG-I-3160.pdf>. [Accedido: 20-dic-2024].
- [3] C. Hernández Gervacio y D. Quiroz Ceballos, "Grafeno: Estado del Arte," Repositorio CIMAV, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/607/1/-Tesis%20Claudia%20Hernández%20Gervacio%2C%20Dalia%20Quiroz%20Ceballos.pdf>. [Accedido: 20-dic-2024].
- [4] M. Choy, "Polímeros conductores como alternativa tecnológica en la electrónica," *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 4, no. 1, pp. 23-34, 2003.
- [5] "Polímeros conductores: su impacto en la tecnología de dispositivos electrónicos," *Quimisor*, 2023. [Online]. Available: <https://quimisor.com.mx/polimeros-conductores-su-impacto-en-la-tecnologia-de-dispositivos-electronicos/>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [6] "Polímeros inherentemente conductores," *Plástico*, 2004. [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/polimeros-inherentemente-conductores>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [7] "Polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos," *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 35, no. 2, pp. 45-56, 2019.
- [8] "Desarrollo de polímeros conductores para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos," Facultad de Ciencias, UNAM, 2021.
- [9] D. Battezzatore y A. Fina, "Flexible and highly conductive composites by impregnation of polydimethylsiloxane in graphite nanoplates paper," *arXiv preprint arXiv:2101.11721*, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.11721>.
- [10] P. Cataldi et al., "Graphene-Polyurethane Coatings for Deformable Conductors and Electromagnetic Interference Shielding," *arXiv preprint arXiv:2004.11613*, 2020, <https://doi.org/10.1002/aelm.202000429>.

-
- [11] L. V. Kayser and D. J. Lipomi, "Stretchable Conductive Polymers and Composites Based on PEDOT and PEDOT:PSS," *Advanced Materials*, Art. no. 1806133, 2019, doi: 10.1002/adma.201806133.
- [12] N. Baig, I. Kammakakam, y W. Falath, "Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges," *Materials Advances*, vol. 2, no. 6, pp. 1821–1871, 2021. doi: 10.1039/d0ma00807a.
- [13] K. Ramesh, *Nanomaterials*, Springer, Boston, MA, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-0 [4]
- [14] J. Jiang, S. Bai, J. Zou, et al., "Improving stability of MXenes," *Nano Research*, vol. 15, pp. 6551–6567, 2022. doi: 10.1007/s12274-022-4312-8. 9783-1_1.
- [15] L. A. Kolahalam, I. V. Kasi Viswanath, B. S. Diwakar, B. Govindh, V. Reddy, y Y. L. N. Murthy, "Review on nanomaterials: Synthesis and applications," *Materials Today: Proceedings*, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.371.
- [16] R. A. Afre, N. Sharma, M. Sharon and M. Sharon, "Transparent Conducting Oxide Films for Various Applications: A Review," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 53, no. 1, pp. 79-89, 2018, doi: 10.1515/rams-2018-0006.
- [17] F. So and D. Kondakov, "Degradation Mechanisms in Small-Molecule and Polymer Organic Light-Emitting Diodes," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 34, pp. 3762-3777, 2010, doi: 10.1002/adma.200902624.
- [18] V. R. Supradeepa, C. M. Long, R. Wu, F. Ferdous, E. Hamidi, D. E. Leaird and A. M. Weiner, "Comb-based radiofrequency photonic filters with rapid tunability and high selectivity," *Nature Photonics*, vol. 6, no. 3, pp. 186-194, 2012, doi: 10.1038/nphoton.2011.350.
- [19] Z. Liu, B. Yu, y J. Yu, "Advances in indium tin oxide alternatives for transparent conducting electrodes: conductive polymers and metal nanowire networks," *Nano Energy*, vol. 89, pp. 106308, 2021. doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106308.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

Published by:

