ISSN: 2992-7447

Año 6. Vol. 4 Núm. 2 Julio - Diciembre 2026

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México



Diseño y validación de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva para drones multirrotor

Diseño y desarrollo preliminar de un exoesqueleto biomecánico para rehabilitación del brazo y la mano

Cifrado de imágenes con análisis de fluctuacione s sin tendencia

Implementación de MobileNetV2 para detección de cáncer de pulmón mediante la inteligencia artificial para el cómputo móvil

Adaptación de una cámara RGB para la visualización relativa del espectro UV cercano mediante filtro ZWB3

Simulación de la separación de isoamil acetato, de baja concentración, de una mezcla acuosa

Universidad Autónoma del Estado de México

Consejo Editorial

Directora editorial

Dra. Rosa María Valdovinos Rosas

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0001-9954-0653

Editoras científicas

Dra. Angélica Guzmán Ponce

Universidad Católica de Murcia, España. ORCID 0000-0002-7844-1266.

Dra. Laura Cleofas Sánchez,

Tecnológico Nacional de México campus Tianguistenco. ORCID 0000-0002-6666-0461

Editores técnicos

Dra. Mireya Salgado Gallegos

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0003-2675-9456

Dr. Javier Salas García

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID 0000-0002-1297-7893

M.C. Miguel Ángel López Pérez

Tecnológico Nacional de México, México. ORCID 0000-0002-3424-8704

Editor invitado

Dr. Ignacio Herrera Aguilar

Tecnológico Nacional de México, ORCID 0000-0001-6980-5163

Comité Científico

Ingeniería y tecnología civil y en arquitectura

Dr. Francisco Héctor Bañuelos García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-8231-6599

Dr. Héctor Rodrigo Amezcua Rivera – Facultad de Ingeniería UNAM, México ORCID 0000-0002-5991-0020

Dr. Marco Antonio Escamilla García – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México ORCID 0000-0001-5276-4369

Ingeniería y tecnología en Ciencias Computacionales e Inteligencia Artificial

Dra. Juana Canul Reich – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México ORCID 0000-0003-1893-1332

Dr. Daniel Valero Carreras – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0002-9025-9950

Dr. Antonio Jesús Banegas Luna – Centro Universitario de la Defensa de San Javier, España ORCID 0000-0003-1158-8877

Ingeniería y tecnología en Mecánica y Sistemas Energéticos

Dra. María Dolores Durán García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-7569-249X

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera – Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México ORCID 0009-0008-9460-2251

Ingeniería y tecnología en Ciencias del Agua

Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-1864-4501

Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez – Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-2559-5306

Dra. Laura Conde Baéz - Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-0250-7916

Ingeniería y tecnología en Cadena de Suministro

Dra. Lourdes Loza Hernández – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0001-5107-7110

Dr. Manuel González de la Rosa – Tecnológico Nacional Campus Toluca, México ORCID 0009-0000-6558-6493

Dr. Agustín Bustos Rosales – Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México ORCID 0000-0001-5074-0355

Dr. Rodolfo Mendoza Gómez – Tecnológico de Monterrey Campus León, México ORCID 0000-0002-9119-3412

Ingeniería y tecnología en Robótica, Mecatrónica, Industria 4.0 y Biomédica

Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-0964-4844

Dra. Nadia Vanessa García Hernández – CINVESTAV, Unidad Saltillo, México ORCID 0000-0003-1944-0519

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González – Instituto Tecnológico de Orizaba, México ORCID 0000-0002-0309-5231

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, Año 6 , Vol. 4, Núm. 2, 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000, Tels. 7222-14-08-55, https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingenieria, ideasencienciai_fi@uaemex.mx. Directora: Rosa María Valdovinos Rosas, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, C.P. 50130, Tel. 7222140855. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2023-033108322300-102, ISSN: 2992-7447, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsables de la última actualización de este número, Mireya Salgado Gallegos y Javier Salas García, Facultad de Ingeniería. Diseño de portada y Diseño Editorial, Javier Salas García. Fecha de última modificación: 30 de junio de 2026. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido aquí publicado sin fines de lucro, siempre y cuando no se modifique, se cite la fuente completa y su dirección electrónica en términos de licencia aplicable. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC).Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), 2026.

CONTENIDO

Pág.

Carta del editor 3
Dr. Ignacio Herrera Aguilar

Diseño y validación de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva para drones multirrotor 5
E. D. Casillas-Parbol, J. A. Cárdenas-Magaña

Diseño y desarrollo preliminar de un exoesqueleto biomecánico para rehabilitación del brazo y la mano 27
J. R. Gómez-Armenta, A. Mares-Castro, M. G. Moreno-Salcido

Cifrado de imágenes con análisis de fluctuaciones sin tendencia 54
E. Jiménez-López

Implementación de MobileNetV2 para detección de cáncer de pulmón mediante la inteligencia artificial para el cómputo móvil 77
O. D. Arellano-Magdaleno, M. A. Ramos-Corchado, V. Muñoz-Jiménez

Adaptación de una cámara RGB para la visualización relativa del espectro UV cercano mediante filtro ZWB3 96
G. E. Balmori-Vera, I. Herrera-Aguilar, J. P. Rodríguez-Jarquin, B. E. Gonzáles-Sánchez, G. Águila-Rodríguez

Simulación de la separación de isoamil acetato, de baja concentración, de una mezcla acuosa 110
Z. Gerónimo-Valencia, C. Conde-Mejía, L. M. Valenzuela-Gómez

Carta del editor

Dr. Ignacio Herrera Aguilar

Estimadas lectoras y estimados lectores:

Es un gusto presentar el Volumen 4, Número 2 (Julio - Diciembre 2026) de *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*. Este número reúne seis trabajos que, en conjunto, reflejan la vocación interdisciplinaria de la revista: desde el diseño de prototipos electromecánicos de bajo costo, pasando por el procesamiento de imágenes y la inteligencia artificial, hasta la simulación de procesos en ingeniería química. Los artículos se presentan organizados en tres ejes temáticos.

El número abre con dos trabajos que comparten el espíritu de hacer accesible la tecnología mediante manufactura aditiva, electrónica abierta y validación experimental.

El primer artículo, *Diseño y validación de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva para drones multirrotor*, consiste en una plataforma de recarga inalámbrica por inducción con acoplamiento magnético pasivo tipo MagSafe para vehículos aéreos no tripulados, alcanzando una eficiencia promedio del 85 % y una reducción del 15 % en el tiempo de recarga, sin comprometer la autonomía de vuelo.

A continuación, en *Diseño y desarrollo preliminar de un exoesqueleto biomecánico para rehabilitación del brazo y la mano*, se presenta un prototipo de bajo costo basado en la plataforma ESP32 e impresión 3D para asistir la flexión–extensión del codo y el agarre de la mano, demostrando su factibilidad técnica como alternativa accesible frente a los dispositivos comerciales de rehabilitación.

El segundo eje agrupa tres contribuciones que abordan la imagen como objeto de estudio, desde su cifrado y su análisis hasta su captura fuera del espectro visible.

En *Cifrado de imágenes con análisis de fluctuaciones sin tendencia* se extiende el método de Análisis de Fluctuaciones sin Tendencia a dos dimensiones para caracterizar las propiedades de escala de imágenes cifradas mediante autómatas celulares con la regla 182, mostrando un comportamiento similar al ruido 1/f.

Le sigue *Implementación de MobileNetV2 para detección de cáncer de pulmón mediante la inteligencia artificial para el cómputo móvil* en donde se adapta una red neuronal convolucional ligera para el diagnóstico asistido en dispositivos móviles, obteniendo una exactitud del 91.0 % comparable a la de arquitecturas más robustas.

Cierra este eje *Adaptación de una cámara RGB para la visualización relativa del espectro UV cercano mediante filtro ZWB3* en donde se modifica un sensor CMOS OV2710 con un filtro excitador ZWB3 para lograr, a bajo costo, una visualización relativa del ultravioleta cercano.

El número concluye con *Simulación de la separación de isoamil acetato, de baja concentración, de una mezcla acuosa,* en donde se diseña en Aspen Plus un proceso de desorción y destilación que recupera el 99.7 % del isoamil acetato evitando el uso de solventes, en línea con la búsqueda de procesos más sustentables.

Agradecemos a las autoras y autores que confiaron en esta revista para difundir sus resultados, así como al cuerpo de revisores cuya labor garantiza la calidad y el rigor de cada contribución. Confiamos en que este número sea de utilidad e inspiración para la comunidad de ciencias de la ingeniería.

Atentamente,

Dr. Ignacio Herrera Aguilar
Editor Invitado
Ideas en Ciencias de la Ingeniería

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Diseño y validación de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva para drones multirrotor

Design and validation of an inductive-charging landing platform for multirotor drones

E. D. Casillas-Parbol[1], J. A. Cárdenas-Magaña[2] *
(*Jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx)

Recibido: 17 de noviembre de 2025 Aceptado: 16 de enero de 2026

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y validación experimental de una plataforma de aterrizaje con carga inalámbrica por inducción y acoplamiento magnético pasivo para Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), orientada a mejorar la autonomía operativa y reducir la intervención humana en el proceso de recarga. La metodología adoptada, de enfoque experimental y aplicado, se estructuró en tres etapas: caracterización del sistema inductivo, diseño y manufactura de la plataforma mediante modelado 3D e impresión en PLA, e integración y evaluación funcional del prototipo mediante pruebas de vuelo y recarga. El mecanismo de centrado magnético tipo MagSafe permitió corregir desalineaciones entre bobinas durante el aterrizaje, garantizando una alineación estable y favoreciendo una transferencia energética eficiente. Los resultados experimentales muestran una reducción del 15 % en el tiempo total de recarga respecto al método convencional, con una eficiencia promedio del 85 % y variaciones térmicas inferiores a 5 °C. Asimismo, el peso adicional del sistema (≈40 g) no afectó la estabilidad ni la autonomía del VANT, manteníendose un tiempo promedio de vuelo de 5 min 30 s. Las pruebas realizadas en condiciones exteriores confirmaron la estabilidad del dron y la efectividad del acoplamiento magnético. En conjunto, los resultados validan la viabilidad del prototipo como una solución simple, funcional y de bajo costo para la automatización del aterrizaje y la recarga inalámbrica de UAVs, con potencial aplicación en agricultura de precisión, monitoreo ambiental y operaciones autónomas continuas.

Palabras clave: *plataforma de aterrizaje, carga inductiva, acoplamiento magnético, drones, autonomía energética*

[1]Departamento de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula.

[2]Departamento de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

Abstract

This paper presents the design and experimental validation of a landing platform with inductive wireless charging and passive magnetic coupling for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), aimed at improving operational autonomy and reducing human intervention during the recharging process. An experimental and applied methodology was adopted, structured into three stages: characterization of the inductive charging system, design and fabrication of the platform through 3D modeling and PLA additive manufacturing, and functional evaluation of the integrated prototype through flight and charging tests. The MagSafe-type magnetic centering mechanism effectively corrected coil misalignment during landing, ensuring stable alignment and enhancing energy transfer efficiency. Experimental results show a 15 % reduction in total charging time compared to the conventional method, with an average efficiency of 85 % and thermal variations below 5 °C. Additionally, the added system weight (≈40 g) did not negatively affect UAV stability or autonomy, maintaining an average flight time of 5 min 30 s. Outdoor tests confirmed both flight stability and the effectiveness of the magnetic coupling during landing. Overall, the results validate the proposed prototype as a simple, functional, and low-cost solution for automating UAV landing and wireless recharging processes, with strong potential for applications in precision agriculture, environmental monitoring, and continuous autonomous operations.

Keywords: *landing platform, inductive charging, magnetic coupling, drones, energy autonomy*

Introducción

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) se ha incrementado de manera significativa en aplicaciones como agricultura de precisión, monitoreo ambiental, inspección de infraestructuras y vigilancia, debido a su flexibilidad operativa y capacidad de acceso a zonas de difícil alcance. Sin embargo, la autonomía energética continúa siendo una de las principales limitaciones para la operación continua de estos sistemas, ya que la mayoría de los drones comerciales dependen de ciclos frecuentes de recarga o del reemplazo manual de baterías, lo que incrementa los tiempos muertos y la dependencia de la intervención humana. Con el objetivo de mitigar esta problemática, la literatura ha propuesto diversas estrategias para automatizar el suministro energético de los VANTs. Entre ellas destacan los sistemas de intercambio automático de baterías, como el desarrollado por Albert et al. [1], y las plataformas de aterrizaje asistido basadas en sensores y procesamiento de imágenes, capaces de guiar el descenso del dron hacia una base fija con alta precisión [2]. Si bien estas soluciones representan avances relevantes, suelen implicar una elevada complejidad mecánica o no contemplan la transferencia directa de energía al sistema eléctrico del VANT.

En este contexto, la carga inalámbrica por inducción ha emergido como una alternativa prometedora, al permitir la transferencia de energía sin contacto físico y reducir el desgaste de conectores eléctricos. Estudios previos han demostrado la viabilidad de sistemas multipunto de carga inductiva y configuraciones resonantes capaces de alcanzar altas eficiencias energéticas [3]. No obstante, uno de los principales desafíos técnicos asociados a esta tecnología es la pérdida de eficiencia causada por la desalineación lateral y axial entre las bobinas transmisora y receptora, fenómeno ampliamente documentado en la literatura [4]. Investigaciones más recientes han abordado este problema mediante arquitecturas avanzadas que integran visión computacional, control activo y mecanismos de alineación automática para maximizar la eficiencia del acoplamiento inductivo [5], [6]. Asimismo, se han propuesto soluciones que incorporan guías mecánicas o magnéticas para mejorar el centrado entre bobinas [7]. Aunque estos sistemas demuestran un alto grado de integración funcional, su implementación suele implicar mayores costos, requerimientos computacionales elevados y una complejidad que dificulta su adopción en plataformas comerciales ligeras.

A partir de este análisis, se identifica una necesidad específica de soluciones simples, pasivas y de bajo costo que permitan corregir la desalineación residual entre bobinas durante la fase final del aterrizaje, sin recurrir a sistemas activos complejos de visión o control. En este sentido, el presente trabajo se enfoca en el diseño y validación experimental de una plataforma de aterrizaje equipada con un sistema de carga inalámbrica por inducción y un mecanismo pasivo de acoplamiento magnético tipo MagSafe, orientado a mejorar el centrado entre bobinas y la eficiencia de la transferencia energética una vez que el VANT ha aterrizado sobre la base. El objetivo de esta investigación es diseñar y validar experimentalmente una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo, evaluando su impacto en la eficiencia de recarga, la estabilidad del aterrizaje y el desempeño operativo de un VANT comercial, bajo un enfoque de simplicidad estructural, bajo costo y viabilidad práctica.

DESARROLLO DEL TEMA

El desarrollo de sistemas de recarga autónoma para Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) ha adquirido creciente relevancia en la última década, impulsado por la necesidad de extender la autonomía operativa y reducir la intervención humana en aplicaciones como agricultura de precisión, monitoreo ambiental y vigilancia persistente. En este contexto, la literatura ha explorado diversas estrategias, entre las que destacan el intercambio automatizado de baterías, el aterrizaje asistido mediante visión computacional y la transferencia inalámbrica de energía.

Los sistemas de intercambio automático de baterías constituyen una de las aproximaciones más consolidadas para la recuperación rápida de la autonomía. Propuestas como la de Albert et al. [1] demuestran la viabilidad de plataformas mecatrónicas capaces de realizar este proceso de forma autónoma. No obstante, estas soluciones suelen implicar una elevada complejidad mecánica, mayores

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

costos de mantenimiento y un incremento significativo en el peso y volumen del sistema, lo que limita su aplicación en UAVs comerciales de pequeña y mediana escala.

De manera paralela, se han desarrollado plataformas de aterrizaje autónomo basadas en visión computacional, orientadas a mejorar la precisión del posicionamiento durante el descenso. Trabajos como los de Zúñiga Motato [2], Gómez Redondo [8] y Daniel et al. [9] emplean técnicas de detección visual, marcadores artificiales y redes neuronales profundas para guiar el aterrizaje del UAV con altos niveles de precisión. Sin embargo, la mayoría de estas propuestas se centra exclusivamente en la navegación y el posicionamiento, sin integrar sistemas de transferencia energética.

La carga inalámbrica por inducción ha sido ampliamente investigada como una alternativa para facilitar la automatización del suministro energético y reducir el desgaste mecánico asociado a conectores físicos. Estudios recientes reportan eficiencias superiores al 90 % mediante topologías resonantes avanzadas y diseños optimizados de bobinas [10]– [11]. No obstante, se reconoce de manera consistente que la eficiencia del acoplamiento inductivo es altamente sensible a la desalineación lateral y axial entre bobinas, lo que representa uno de los principales desafíos técnicos para su implementación práctica en UAVs [4].

Con el objetivo de mitigar este problema, diversos trabajos han propuesto sistemas de recarga autónoma altamente integrados que combinan aterrizaje asistido por visión computacional, control en lazo cerrado y mecanismos activos de alineación. Junaid et al. [5] presentan una revisión exhaustiva de estas arquitecturas, mientras que Rohan et al. [6] analizan estrategias avanzadas de alineación que permiten maximizar la eficiencia de la transferencia energética. Si bien estas soluciones demuestran un alto grado de integración funcional, su implementación suele conllevar un incremento significativo en la complejidad del sistema, los requerimientos computacionales y los costos de desarrollo, lo que dificulta su adopción en plataformas ligeras de uso comercial.

En contraste, las soluciones pasivas para la corrección de la desalineación final, basadas en principios mecánicos o magnéticos, han recibido menor atención experimental. Choi et al. [7] proponen el uso de guías magnéticas para mejorar el centrado entre bobinas en sistemas de carga inductiva para UAVs, demostrando que es posible reducir las pérdidas por desalineación sin recurrir a actuadores adicionales. Sin embargo, la evidencia experimental disponible sobre la integración de estos mecanismos pasivos en plataformas reales de aterrizaje y recarga para UAVs comerciales sigue siendo limitada.

A partir de este análisis, se identifica una necesidad específica de soluciones de integración funcional simplificada que permitan corregir la desalineación residual durante la fase final de aterrizaje y recarga inductiva, sin depender de sistemas activos complejos. En este contexto, el presente trabajo se orienta a la validación experimental de un mecanismo pasivo de acoplamiento magnético integrado en una plataforma

de aterrizaje con carga inductiva, evaluando su impacto en la eficiencia de transferencia energética y la viabilidad operativa en un UAV comercial.

La Tabla 1 presenta una síntesis comparativa de investigaciones relevantes en el ámbito del aterrizaje autónomo y la recarga inalámbrica de UAVs, permitiendo contextualizar la contribución específica de este estudio dentro del panorama actual de investigación.

Tabla 1. *Comparativa de investigaciones relevantes sobre aterrizaje autónomo y recarga inalámbrica de UAVs.*

Ref.	Enfoque del estudio	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[1]	Sistema automatizado de intercambio de baterías para UAVs multirrotor	Mecanismos electromecánicos de recambio	Incremento de la autonomía operativa sin intervención humana	Alta complejidad mecánica y costos elevados de mantenimiento
[12]	Estación de recarga para drones agrícolas basada en energía renovable	Paneles solares y transferencia inductiva	Reducción significativa del tiempo de recarga y operación sostenible	Escalabilidad limitada por la capacidad fotovoltaica
[3]	Sistema multipunto de carga inalámbrica	Transferencia inductiva simultánea	Posibilidad de carga sin contacto para múltiples dispositivos	Ausencia de mecanismos de alineación entre bobinas
[4]	Prototipo de carga inalámbrica para vehículos eléctricos	Resonancia electromagnética	Alta eficiencia bajo condiciones ideales de alineación	Pérdidas energéticas por desalineación y separación excesiva
[2]	Diseño de helipuerto autónomo para UAVs	Sensores de posición y procesamiento de imágenes	Aterrizaje autónomo con alta precisión	No integra sistemas de recarga energética
[9]	Plataforma de aterrizaje autónomo asistida por visión artificial	YOLOv8 y detección de marcadores QR	Alta precisión en la identificación de la plataforma	No aborda la transferencia de energía

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

Ref.	Enfoque del estudio	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[8]	Identificación visual de plataformas de aterrizaje	Análisis de color, forma y distancia	Detección robusta bajo distintas condiciones de iluminación	No integra recarga inalámbrica ni centrado automático
[13]	Algoritmos de visión artificial aplicados a UAVs agrícolas	Procesamiento visual y navegación asistida	Mejora en la eficiencia del aterrizaje y recopilación de datos	Dependencia de condiciones ambientales
[14]	Plataforma física de recarga para UAVs	Diseño estructural de base de aterrizaje	Aporte conceptual al diseño de estaciones de recarga	Falta de análisis experimental de alineación inductiva
[15]	Diseño de plataforma de despegue y aterrizaje para UAVs	Configuración mecánica y estructural	Mejora de la estabilidad estructural	No aborda transferencia de energía ni desalineación
[16]	Análisis de propuestas de carga inductiva para UAVs	Modelado de transferencia de energía	Evaluación teórica de la viabilidad de la carga inalámbrica	Estudios centrados en simulación sin validación física
[5]	Sistema integrado de aterrizaje y recarga inalámbrica para UAVs	Visión computacional, control activo y carga inductiva	Integración funcional completa con alta precisión de alineación	Alta complejidad del sistema y requerimientos computacionales elevados
[6]	Plataforma autónoma de aterrizaje con alineación asistida	Sensores, control activo y transferencia inductiva	Mejora del acoplamiento energético durante la recarga	Arquitectura compleja y costos de implementación

Ref.	Enfoque del estudio	Tecnologías aplicadas	Principales aportes	Limitaciones identificadas
[7]	Estación inteligente de recarga inalámbrica para UAVs	Control avanzado y acoplamiento inductivo	Alta eficiencia energética en condiciones controladas	Enfoque orientado a sistemas especializados y de mayor escala

METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental y de desarrollo tecnológico aplicado, con el objetivo de diseñar, fabricar e integrar una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo para un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), así como evaluar su desempeño energético y viabilidad operativa. El procedimiento metodológico se estructuró en etapas interrelacionadas, las cuales se describen a continuación y se resumen esquemáticamente en la Figura 1.

1. Identificación del problema y enfoque de estudio. En correspondencia con el objetivo general y el objetivo específico 1, el proceso inició con la identificación del problema de investigación, centrado en la limitada autonomía de los VANTs comerciales debido a los tiempos de recarga y la dependencia del operador. Se realizó una revisión bibliográfica sistemática de literatura académica, tesis e informes técnicos publicados entre 2020 y 2025, con el fin de identificar soluciones existentes de carga inductiva, aterrizaje asistido y acoplamiento magnético, así como delimitar el enfoque del presente estudio hacia mecanismos pasivos de alineación final.

2. Selección de materiales y componentes. Para el cumplimiento del objetivo específico 1, se seleccionaron materiales y componentes compatibles con un VANT comercial ligero. La plataforma de aterrizaje fue fabricada mediante impresión 3D utilizando material PLA, mientras que el sistema de carga inductiva estuvo conformado por un módulo tipo MagSafe, integrado por un transmisor y un receptor inductivo. Se emplearon imanes circulares para implementar el mecanismo pasivo de acoplamiento magnético, así como una fuente de alimentación regulada, cableado y elementos de fijación. Para la instrumentación experimental se utilizaron un multímetro digital, un cronómetro y el software de monitoreo del dron.

3. Diseño mecánico y modelado 3D del prototipo. En concordancia con el objetivo específico 1, el diseño estructural de la plataforma se desarrolló mediante un proceso de ingeniería inversa, tomando mediciones directas del área de aterrizaje del dron para asegurar compatibilidad geométrica.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

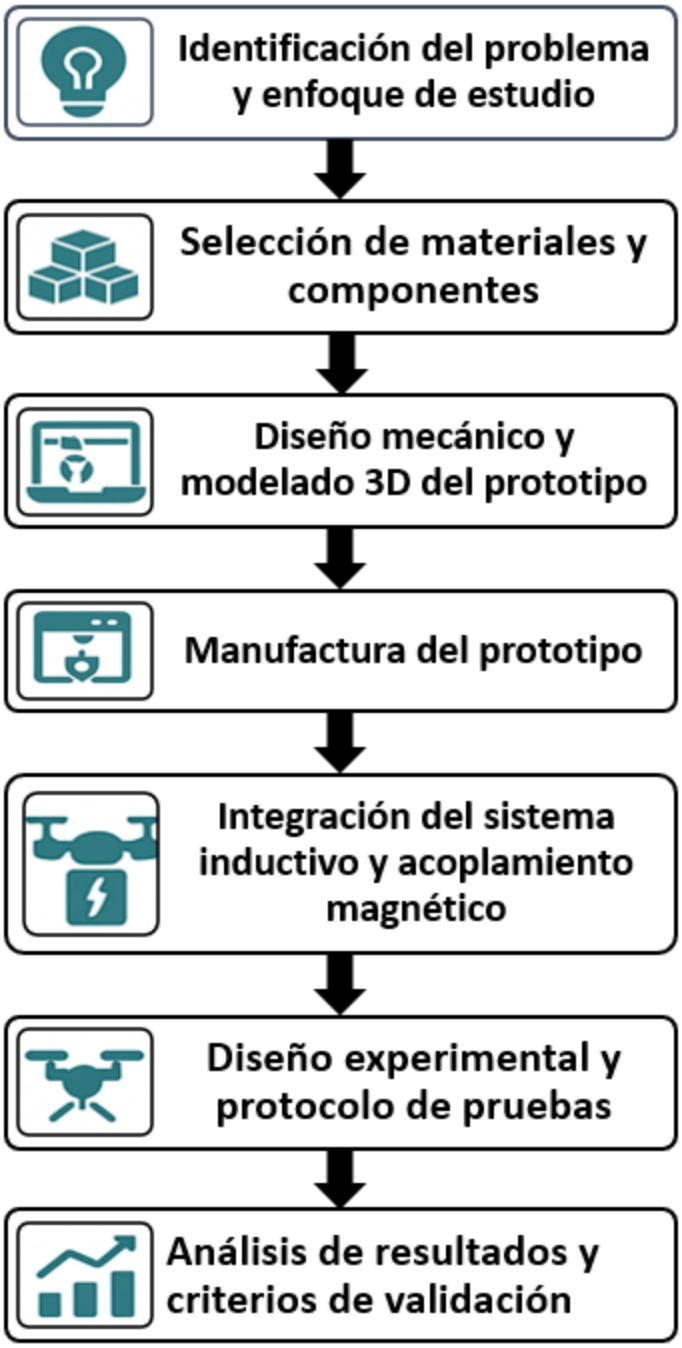


FIGURA 1. *Metodología. Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente, se realizó el modelado tridimensional de la base, el soporte de bobinas y el alojamiento de imanes utilizando Autodesk Fusion 360, optimizando la geometría para garantizar estabilidad durante el aterrizaje y una adecuada alineación entre las bobinas inductivas.

4. Manufactura del prototipo. El prototipo físico fue fabricado mediante impresión 3D utilizando una impresora Bambu Lab A1 y filamento PLA de 1.75 mm. Los parámetros de manufactura empleados se detallan en la Tabla 2 y fueron seleccionados con el fin de garantizar resistencia mecánica, estabilidad dimensional y repetibilidad del proceso. En la Figura 2 se muestran los componentes impresos que conforman la plataforma de aterrizaje.

Tabla 2. *Parámetros de impresión 3D empleados en la fabricación del prototipo.*

Parámetro	Valor
Impresora utilizada	Bambu Lab A1
Software de corte	Bambu Studio
Material	PLA, 1.75 mm
Altura de capa	0.20 mm
Altura de primera capa	0.20 mm
Perímetros	2
Capas superiores	5
Capas inferiores	3
Patrón de relleno	Rectilíneo
Densidad de relleno	15 %
Tipo de soporte	Árbol (automático)
Ángulo de generación de soporte	30°
Adhesión a la cama	Balsa automática

5. Integración del sistema inductivo y acoplamiento magnético. Para atender el objetivo específico 3, el sistema de carga inductiva fue integrado en la plataforma, fijando el transmisor en la base y el receptor en la parte inferior del dron. Se dispusieron imanes circulares alrededor de ambas bobinas para implementar el mecanismo pasivo de centrado magnético, inspirado en sistemas tipo MagSafe. Este mecanismo permite corregir desalineaciones residuales durante la fase final del aterrizaje, sin recurrir a actuadores o sistemas de control activo. Previo a las pruebas de vuelo, se verificaron las polaridades, el aislamiento eléctrico y la estabilidad de corriente, evaluando el sistema tanto en vacío como bajo carga.

6. Diseño experimental y protocolo de pruebas. En correspondencia con los objetivos específicos 2, 3 y 4, se definió un protocolo experimental para evaluar el desempeño del sistema propuesto. Las pruebas se realizaron en condiciones interiores para minimizar interferencias ambientales y consistieron en tres tipos de vuelo: vuelo mixto limitado (VLM), vuelo agresivo (VA) y vuelo de ascenso/descenso (VAD).

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

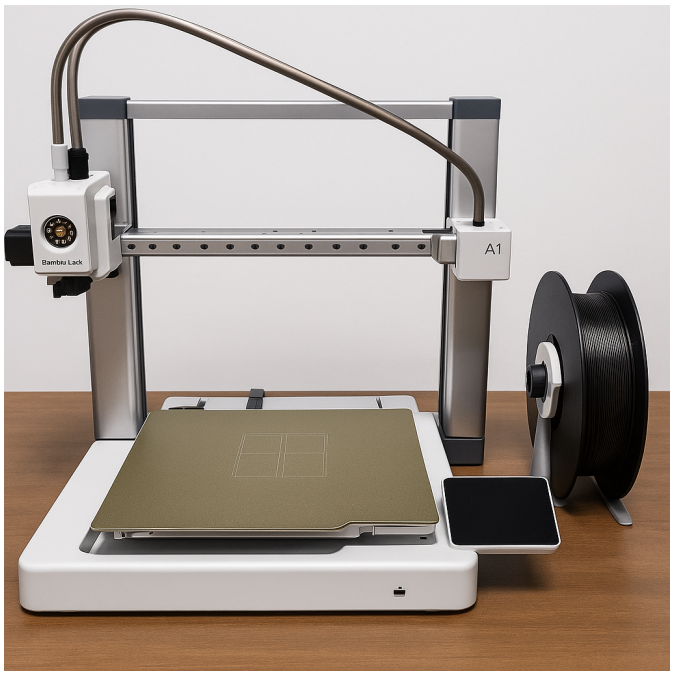


FIGURA 2. *Impresora 3D Bambu Lab A1 utilizada para la manufactura del prototipo. Fuente: Elaboración propia.*

Para cada tipo de vuelo se realizaron tres repeticiones, registrando el tiempo de autonomía, la estabilidad del aterrizaje y la efectividad del centrado magnético. La eficiencia del sistema de carga inductiva se evaluó comparando el tiempo total de recarga y la potencia transferida frente a un método convencional, definido como la recarga del VANT mediante conexión directa por cable. La eficiencia de transferencia energética se calculó mediante la Ec. (1):

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100 \tag{1}$$

Donde P_{salida} corresponde a la potencia recibida por el dron y P_{entrada} a la potencia suministrada por el transmisor. Adicionalmente, se monitoreó el comportamiento térmico del sistema, verificando que el incremento de temperatura se mantuviera por debajo de 5 °C.

7. Análisis de resultados y criterios de validación. Los datos experimentales obtenidos se procesaron mediante análisis descriptivo, calculando promedios y variaciones para cada condición de prueba. Los criterios de validación del prototipo incluyeron: estabilidad del aterrizaje con acoplamiento magnético, eficiencia de transferencia energética, tiempo de recarga en comparación con el método convencional, efecto del peso añadido en la autonomía del dron y comportamiento térmico del sistema. Los resultados

fueron interpretados en términos de la viabilidad técnica y la aplicabilidad del sistema propuesto en VANTs comerciales ligeros. Aunque el sistema fue evaluado en un único modelo de VANT, el objetivo del estudio se centra en la validación funcional del mecanismo pasivo de centrado, independientemente del modelo específico.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caracterización dimensional del sistema inductivo

Durante la etapa inicial se realizó la caracterización dimensional del módulo de carga inductiva tipo MagSafe y de su receptor, con el propósito de garantizar la correcta adaptación del diseño digital a los componentes físicos reales. Mediante el uso de un calibrador Vernier digital se midieron diámetros, espesores, alturas y tolerancias críticas del módulo transmisor, como se muestra en la Figura 3. Las dimensiones obtenidas permitieron ajustar con precisión el modelo tridimensional antes del proceso de manufactura, asegurando la compatibilidad geométrica entre el sistema inductivo, la plataforma de aterrizaje y el VANT, y reduciendo errores durante la integración mecánica.

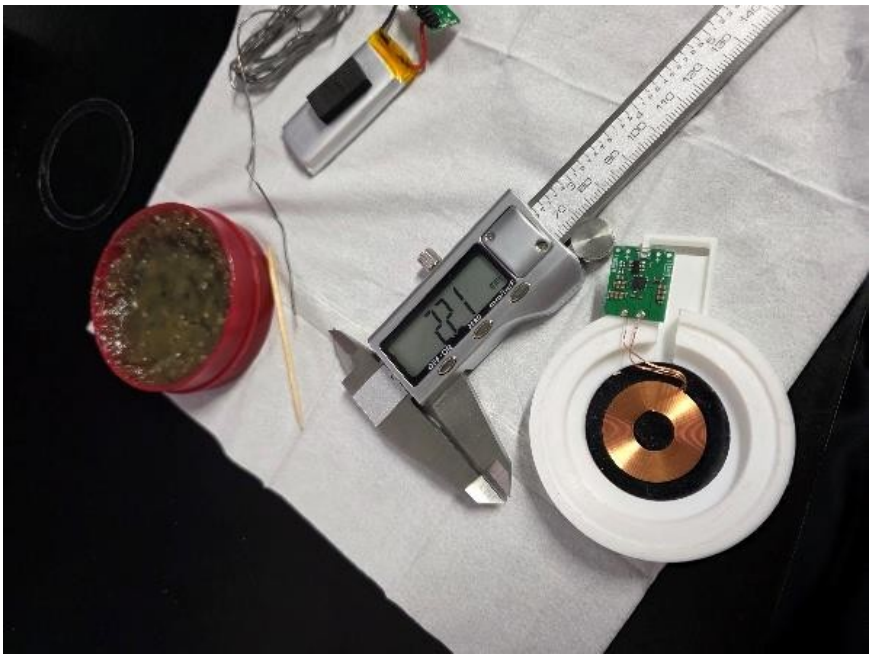


FIGURA 3. *Medición del módulo transmisor inductivo mediante calibrador Vernier digital durante la fase de ingeniería inversa. Fuente: Elaboración propia.*

Modelado 3D de la plataforma y validación del ensamble digital

Con base en las dimensiones caracterizadas, se desarrolló el modelo tridimensional de la plataforma de aterrizaje en Autodesk Fusion 360. El diseño incluyó el alojamiento de la bobina transmisora,

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

las cavidades para los imanes de centrado magnético, la estructura base del sistema y la geometría de acoplamiento con el dron. El ensamble digital completo, presentado en la Figura 4, confirmó la compatibilidad entre los componentes reales y el diseño propuesto, verificando la alineación entre las bobinas y la ausencia de interferencias estructurales, lo que validó el modelo previo a la fabricación física.

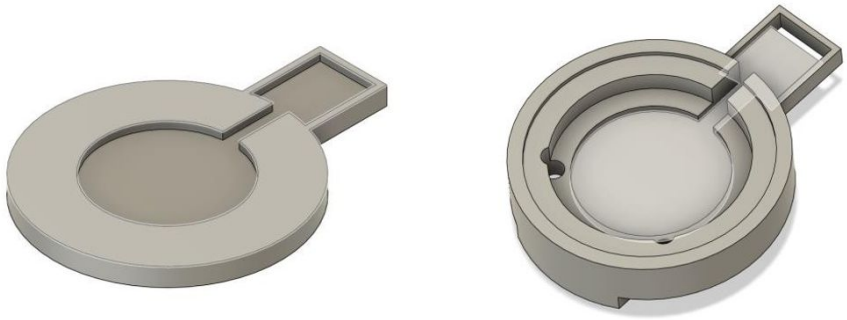


FIGURA 4. *Modelo 3D de la plataforma con alojamiento para bobina e imanes desarrollado en Fusion 360. Fuente: Elaboración propia.*

Fabricación del prototipo mediante impresión 3D

Una vez validado el diseño, las piezas de la plataforma fueron fabricadas mediante impresión 3D utilizando una impresora Bambu Lab A1 y material PLA, seleccionado por su bajo peso, rigidez y estabilidad dimensional. La Figura 5 muestra la comparación entre el modelo digital y el prototipo físico obtenido. El peso total de la estructura impresa fue de 33.9 g, valor que se mantiene dentro de los límites de carga admisibles del VANT, garantizando que la plataforma no compromete la maniobrabilidad ni la autonomía del sistema durante el vuelo.

Integración funcional del sistema inductivo en el VANT

Posteriormente, se realizó la integración eléctrica y mecánica del módulo receptor inductivo en el compartimento de la batería del dron. El receptor fue conectado al sistema de alimentación del VANT, asegurado físicamente mediante material amortiguante y alineado de forma precisa para garantizar su compatibilidad con la carcasa y el chasis. La Figura 6 presenta el proceso de integración del receptor, mostrando la conexión eléctrica, la alineación interna y el ensamble final previo a la validación funcional. Las pruebas confirmaron que el sistema integrado no interfiere con los sensores, el tren de aterrizaje ni la estructura del dron.



FIGURA 5. *Modelo 3D y prototipo físico de la plataforma fabricado mediante impresión 3D con material PLA. Fuente: Elaboración propia.*

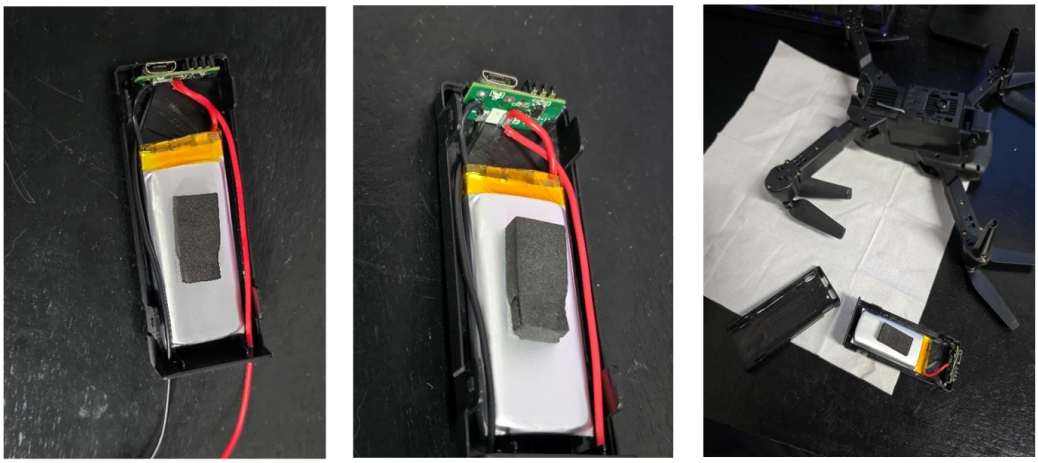


FIGURA 6. *Integración del módulo de carga inalámbrica en la batería del dron. A) Conexión del módulo receptor al sistema de alimentación. B) Alineación del módulo en la carcasa de soporte. C) Ensamble del módulo con la estructura del VANT previo a la validación funcional. Fuente: Elaboración propia.*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

Integración del sistema inductivo y acoplamiento magnético

El sistema de carga inductiva fue integrado mediante la instalación de la bobina transmisora en la plataforma y la bobina receptora en la parte inferior del dron. Alrededor de ambas bobinas se colocaron imanes circulares, conformando un mecanismo de acoplamiento magnético tipo MagSafe. Este sistema permitió corregir desviaciones laterales durante el aterrizaje y facilitar el centrado automático entre transmisor y receptor. La Figura 7 muestra la distribución de los imanes y el ensamble del sistema inductivo, evidenciando una alineación adecuada para la transferencia energética.

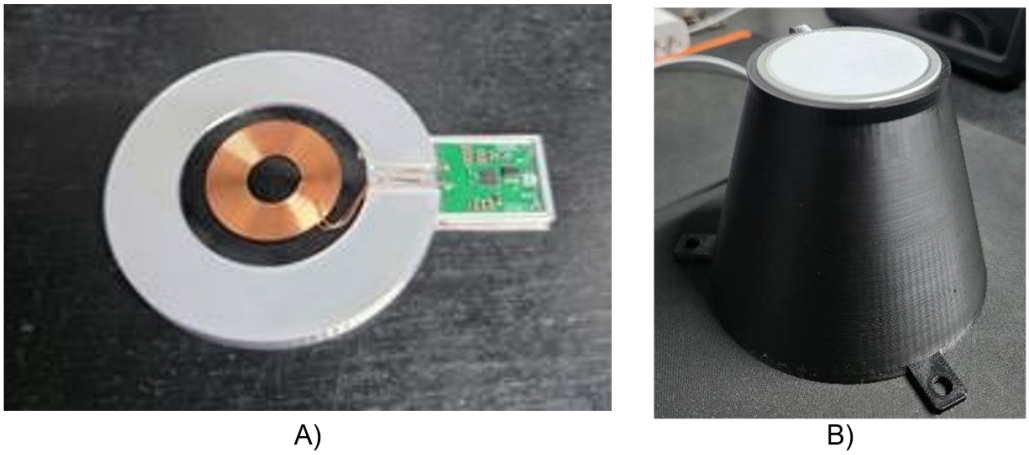


FIGURA 7. *A) Integración del sistema de carga inductiva y B) Distribución de imanes para centrado automático. Fuente: Elaboración propia.*

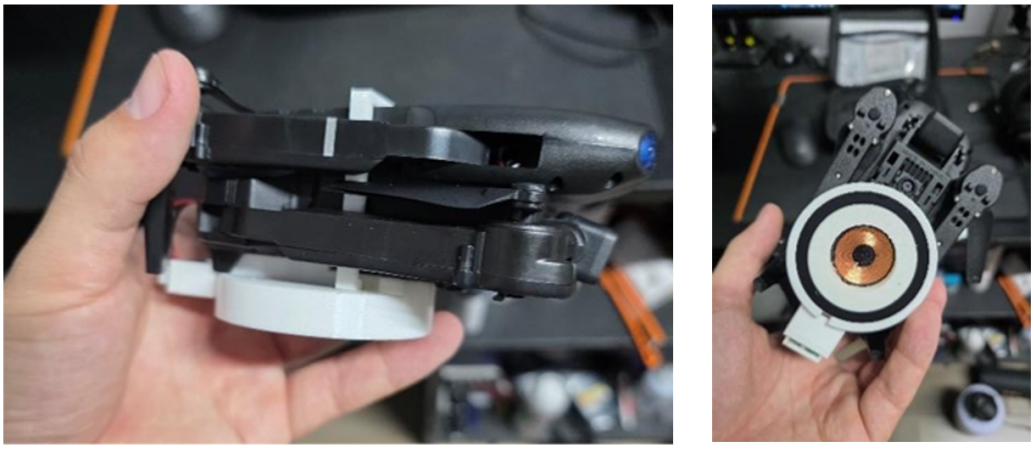
Ensamble final del sistema dron–plataforma

Una vez completada la integración eléctrica y mecánica, se realizó el ensamble final del sistema para evaluar el ajuste dinámico entre el dron y la plataforma de aterrizaje. La Figura 8 muestra el dron con el receptor inductivo instalado y la plataforma equipada con el transmisor. La verificación confirmó que la plataforma no genera interferencias mecánicas ni afecta la estabilidad del dron durante las maniobras de aproximación, aterrizaje y permanencia sobre la base.

Pruebas de recarga y desempeño energético

Se realizaron pruebas experimentales de recarga para evaluar el desempeño energético del sistema inductivo. Durante estas pruebas se verificó el centrado magnético, la alineación entre bobinas, el inicio efectivo de la transferencia de energía y la estabilidad del dron durante el proceso. La Figura 9 muestra el proceso de recarga inalámbrica, evidenciando una alineación estable y sujeción adecuada. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- **Tiempo de recarga convencional:** 1 h 10 min



A) B)

FIGURA 8. *Ensamble final del dron A) con el receptor inductivo y B) la plataforma con el transmisor. Fuente: Elaboración propia.*

- **Tiempo de recarga por inducción:** 1 h 00 min
- **Reducción total del tiempo:** 15 %

Adicionalmente, el monitoreo térmico registró incrementos inferiores a **5** °**C**, manteníendose dentro de rangos seguros de operación.

Evaluación de autonomía y estabilidad en vuelo

Para analizar el impacto del peso adicional del sistema inductivo (≈40 g), se realizaron pruebas de vuelo bajo diferentes condiciones operativas. La Figura 10 muestra evaluaciones de vuelo estacionario, maniobras en entorno exterior con viento y la fase de aproximación previa al aterrizaje. El dron mantuvo un comportamiento estable, sin vibraciones adicionales ni pérdida de control. La autonomía promedio registrada fue de 5 min 30 s, con variaciones menores (±10 s) dependiendo del tipo de maniobra. La estabilidad se evaluó mediante observación operacional y tiempo de vuelo, no mediante telemetría avanzada.

Con el fin de complementar esta evaluación, se analizaron tres modalidades de vuelo: vuelo mixto, vuelo agresivo y ciclo único de ascenso/descenso. La Tabla 3 resume los valores promedio de autonomía obtenidos, confirmando que el sistema integrado no genera una degradación significativa del desempeño energético del VANT.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

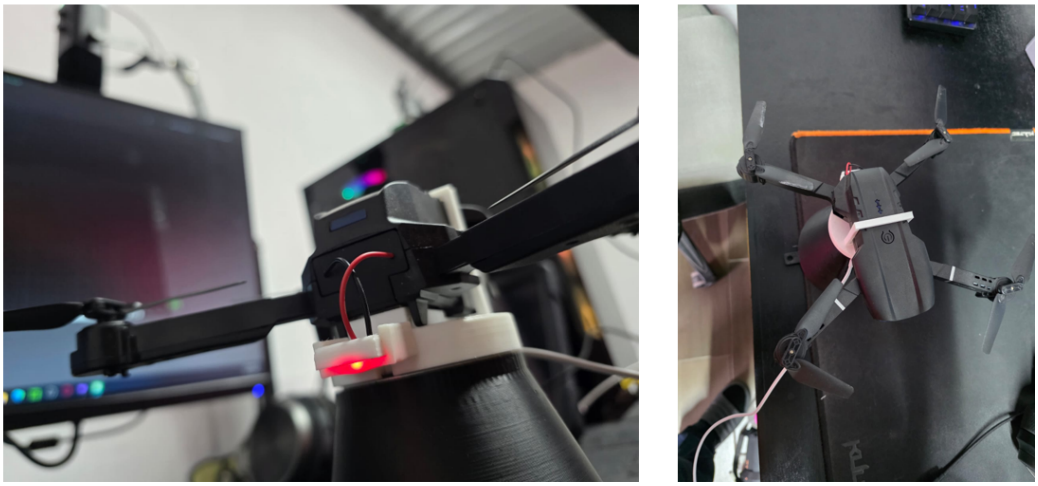


FIGURA 9. *Proceso de recarga inalámbrica del VANT sobre la plataforma de carga inductiva. A) Activación del sistema transmisor y detección del receptor. B) Alineación final entre bobinas y validación del acoplamiento magnético. Fuente: Elaboración propia.*

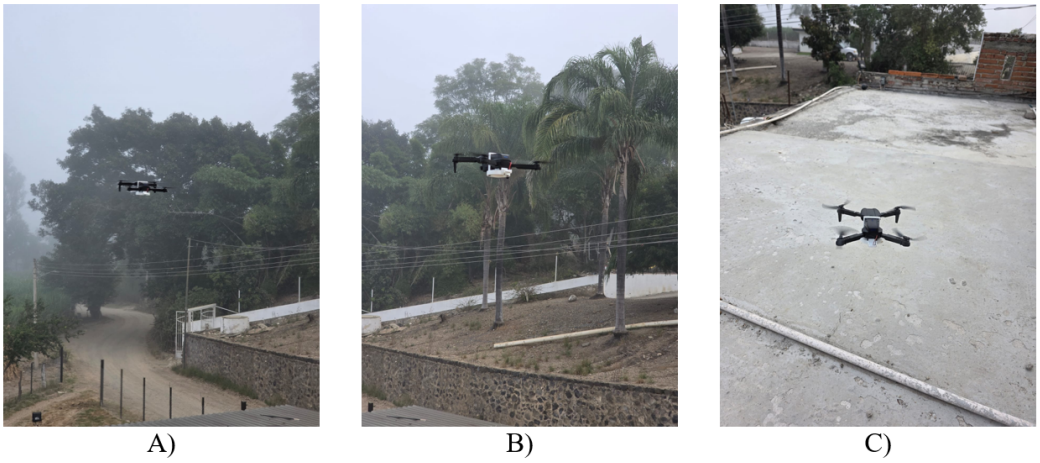


FIGURA 10. *Evaluación de estabilidad en vuelo del VANT con el sistema inductivo integrado. A) Vuelo estacionario con neblina. B) Prueba en entorno exterior con presencia de viento. C) Aproximación previa al aterrizaje. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 3. *Resultados obtenidos de pruebas de vuelo.*

Tipo de vuelo	Condiciones operativas	Autonomía promedio (min)	Observaciones
Vuelo mixto	Ascensos, descensos y desplazamientos combinados.	5–6	Autonomía estable; ligera reducción por variabilidad en consumo.
Vuelo agresivo	Maniobras rápidas, cambios bruscos de dirección y aceleración sostenida.	4–5	Mayor demanda energética; disminución esperada de autonomía.
Ascenso/descenso único	Ascenso continuo a altura máxima seguido de descenso controlado.	5–6	Comportamiento estable; sin pérdida de control ni oscilaciones.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten analizar de manera integral la viabilidad técnica de una plataforma de aterrizaje con carga inductiva y acoplamiento magnético pasivo para Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), contrastando su desempeño con los enfoques reportados en la literatura reciente. En particular, el sistema desarrollado aborda uno de los problemas más recurrentes en la recarga inalámbrica de UAVs: la desalineación entre bobinas durante la fase final de aterrizaje, la cual ha sido ampliamente identificada como un factor crítico de pérdida de eficiencia energética [4]. El mecanismo de acoplamiento magnético tipo MagSafe implementado en la plataforma demostró ser un elemento clave para corregir desviaciones laterales y favorecer el centrado automático del dron sobre la estación de carga. A diferencia de los sistemas que dependen de control activo, sensores adicionales o visión computacional para garantizar la alineación [5], [6], el enfoque pasivo propuesto logra mejorar el acoplamiento inductivo sin incrementar la complejidad del sistema ni los requerimientos computacionales. Este resultado es relevante, ya que responde a la necesidad de soluciones simples, robustas y de bajo costo para drones comerciales de pequeña y mediana escala.

En comparación con otras estrategias de autonomía energética, como el intercambio automático de baterías [1] o las estaciones de recarga basadas en energía renovable [12], el prototipo desarrollado presenta ventajas en términos de simplicidad mecánica, menor mantenimiento y reducción de puntos de fallo asociados a elementos móviles. Si bien algunos sistemas especializados reportan tiempos de recarga menores mediante arquitecturas de alta potencia, los resultados obtenidos en este estudio muestran una reducción del 15 % en el tiempo total de recarga respecto al método convencional, manteniéndose dentro

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

de límites estructurales y energéticos compatibles con UAVs comerciales compactos. Esta mejora se atribuye principalmente al centrado magnético y a la alineación óptima entre bobinas durante el proceso de recarga.

El desempeño en vuelo del dron con el sistema inductivo integrado evidenció que el peso adicional del conjunto (aproximadamente 40 g) no afecta de manera significativa la estabilidad ni la maniobrabilidad del VANT. Incluso bajo condiciones ambientales adversas, como presencia de neblina y viento moderado, el dron mantuvo un comportamiento estable, sin vibraciones ni pérdidas de control. Este resultado coincide con lo reportado en estudios donde la integración de módulos adicionales no compromete el desempeño dinámico cuando existe una adecuada distribución de masa [8], [13], y confirma la solidez del diseño estructural propuesto.

Para consolidar el análisis del desempeño global del sistema, la Tabla 4 sintetiza los principales indicadores estructurales, energéticos y térmicos obtenidos durante las pruebas experimentales. Los valores reportados evidencian un equilibrio adecuado entre eficiencia de transferencia energética, estabilidad operativa y seguridad térmica. En particular, la eficiencia de carga alcanzada (85 %) confirma una transferencia inductiva estable bajo condiciones reales de operación, mientras que la variación térmica inferior a 5 °C valida la operación segura del sistema durante ciclos prolongados de recarga. Asimismo, la autonomía promedio registrada (5 min 30 s) indica que la incorporación del sistema no genera degradación observable en el tiempo de vuelo del dron.

En conjunto, los resultados discutidos posicionan al sistema desarrollado como una alternativa viable y técnicamente sólida para la automatización del proceso de recarga de VANTs. A diferencia de enfoques que abordan de forma aislada el aterrizaje autónomo, la recarga inalámbrica o el diseño estructural de plataformas [2], [8]– [15], la presente investigación integra estos elementos en un prototipo funcional validado experimentalmente. No obstante, se reconocen limitaciones que abren líneas futuras de investigación, como la incorporación de visión computacional para un aterrizaje completamente autónomo, la evaluación de la degradación del sistema inductivo a largo plazo y la exploración de materiales con menores pérdidas electromagnéticas. Aún así, el enfoque pasivo de centrado magnético propuesto demuestra un alto potencial para aplicaciones donde la continuidad operativa, la simplicidad y la robustez son factores prioritarios.

Conclusiones

El desarrollo y validación experimental de la plataforma de aterrizaje con carga inalámbrica por inducción y acoplamiento magnético permitió demostrar la viabilidad técnica de un sistema pasivo, ligero y de bajo costo, orientado a mejorar la eficiencia del proceso de recarga energética en Vehículos Aéreos No Tripulados comerciales. Los resultados obtenidos confirman que la incorporación de un mecanismo de

Tabla 4. *Indicadores globales de desempeño del prototipo.*

Parámetro evaluado	Resultado obtenido	Interpretación técnica
Peso total del sistema	40 g	No compromete la autonomía ni estabilidad del dron.
Eficiencia de carga	85 %	Transferencia energética estable mediante resonancia inductiva.
Tiempo total de recarga (medido)	1 h $\pm$ 3 min	Reducción del 15 % respecto al método convencional (1 h 10 min), atribuible al centrado magnético y alineación óptima entre bobinas.
Autonomía del dron (medida)	5 min 30 s (promedio)	Se mantiene la autonomía nominal; el sistema añadido no genera degradación observable.
Estabilidad estructural	Alta	La base tipo "Búnker Cónico" asegura inmovilidad durante el acoplamiento y recarga.
Variación térmica	< 5 °C	El sistema opera dentro de límites térmicos seguros durante ciclos de carga prolongados.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26971 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 5- 26

centrado magnético tipo MagSafe contribuye de manera efectiva a corregir desalineaciones residuales entre las bobinas transmisora y receptora durante la fase final del aterrizaje, uno de los principales factores que afectan la eficiencia de la transferencia inductiva.

Las pruebas experimentales mostraron que el sistema desarrollado permitió reducir en aproximadamente un 15 % el tiempo total de recarga en comparación con el método convencional de carga cableada, manteniendo una eficiencia promedio del 85 % y variaciones térmicas inferiores a 5 °C, lo cual evidencia un funcionamiento estable y seguro del sistema inductivo. Asimismo, la integración del sistema no afectó de manera significativa el desempeño dinámico del VANT; el peso adicional aproximado de 40 g no comprometió la estabilidad, la maniobrabilidad ni la autonomía de vuelo, la cual se mantuvo en un promedio de 5 min 30 s bajo diferentes modalidades operativas.

Si bien el sistema no incorpora algoritmos de visión computacional ni navegación autónoma para la localización activa de la plataforma, los resultados obtenidos validan el valor del acoplamiento magnético pasivo como una solución eficaz para mejorar la alineación final entre bobinas una vez que el dron ha aterrizado sobre la base. Este enfoque representa una alternativa práctica frente a sistemas activos más complejos, al reducir la necesidad de actuadores adicionales, procesamiento intensivo y costos de implementación.

Las principales limitaciones del estudio se relacionan con la validación experimental realizada sobre un único modelo de dron comercial y con la ausencia de mediciones avanzadas de telemetría durante las pruebas de vuelo. En trabajos futuros se recomienda evaluar el desempeño del sistema en distintos modelos de VANTs, integrar métricas cuantitativas de consumo energético y respuesta dinámica, así como explorar la incorporación de sistemas de guiado autónomo que complementen el centrado pasivo propuesto.

En conjunto, el prototipo desarrollado constituye una solución técnicamente viable y replicable para estaciones de recarga inalámbrica de UAVs, especialmente en aplicaciones donde se priorizan la simplicidad, la robustez operativa y el bajo costo, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones en sistemas autónomos de recarga y operación continua de drones.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

E. D. Casillas-Parbol: Investigación, Conceptualización, Desarrollo del software, Diseño metodológico, Validación experimental y Elaboración de materiales gráficos. **J. A. Cárdenas-Magaña**: Curación de datos, Redacción del manuscrito (versión preliminar), Revisión, Edición y Adecuación del artículo para formato de publicación.

REFERENCIAS

[1] J. Albert, V. Tuesta, L. Ángel, and V. Mellado, "Sistema mecatrónico automático para intercambio de baterías en una plataforma de aterrizaje para drones de tipo multirotor," Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021. [Online]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/items/9eda02db-becd-44f4-be38-657a98cd02e8

[2] M. Z. Zúñiga Motato, "Diseño de un helipuerto para protección y carga automática de un dron," Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Occidente, 2025. [Online]. Available: https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/99939719-a02e-473c-b555-cabbd45b9485/content

[3] D. H. Muñoz Quinto, "Implementación de un sistema multipunto de carga inalámbrica utilizando el método inductivo en la UTEQ," Tesis, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.uteq.edu.ec/items/e2242cd4-981d-4b3b-931d-03caaec7ecbc

[4] A. Martínez, C. González, and A. Von Chong, "Prototipo inalámbrico para carga de vehículos," in *APANAC Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología*, 2021, pp. 457–463. DOI: 10.33412/apanac.2021.3221. [Online]. Available: https://revistas.utp.ac.pa/index.php/apanac/article/view/3221

[5] A. B. Junaid, A. Konoiko, Y. Zweiri, M. N. Sahinkaya, and L. Seneviratne, "Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles," *Energies*, vol. 10, no. 6, p. 803, 2017. DOI: 10.3390/en10060803

[6] A. Rohan, M. Rabah, M. Talha, and S.-H. Kim, "Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm," *Applied System Innovation*, vol. 1, no. 4, p. 44, 2018. DOI: 10.3390/asi1040044

[7] C. H. Choi, H. J. Jang, S. G. Lim, H. C. Lim, S. H. Cho, and I. Gaponov, "Automatic wireless drone charging station creating essential environment for continuous drone operation," in *Proc. 2016 Int. Conf. Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Ansan, South Korea, 2016, pp. 132–136. DOI: 10.1109/ICCAIS.2016.7822448

[8] C. Gómez Redondo, "Reconocimiento de una plataforma para aterrizaje de drones mediante técnicas de visión por computación," Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense de Madrid, 2020. [Online]. Available: https://docta.ucm.es/entities/publication/a4554a5a-d51b-42d8-b56b-d4b78a82e801

[9] A. Daniel, M. Pacheco, J. Manuel, R. Arreguin, J. M. Carranza, J. Carlos, P. Ortega, and S. T. Arriaga, "Sistema autónomo de aterrizaje para micro vehículos aéreos basado en YOLOv8

(YOLOv8-based autonomous landing system for micro aerial vehicles)," *Pistas Educativas*, vol. 46, no. 149, 2025. [Online]. Available: https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3717

[10] Y. Liu, B. Zhang, and Z. Zeng, "High-efficiency wireless charging system for UAVs based on PT-symmetric principle," *Drones and Autonomous Vehicles*, vol. 2, p. 10008, 2025. DOI: 10.70322/dav.2025.10008

[11] A. Ağçal and T. H. Doğan, "A novel folding wireless charging station design for drones," *Drones*, vol. 8, no. 7, p. 289, Jun. 2024. DOI: 10.3390/drones8070289

[12] S. L. Fernandez Concha, "Prototipo de una estación de carga eléctrica múltiple empleando energías renovables para la optimización del tiempo de uso de drones agrícolas en la detección de plagas," Tesis, Universidad Tecnológica del Perú, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/11507/S.Fernandez_Tesis_Titulo_Profesional_2024.pdf

[13] J. Santiago, E. P. Cabrera, and E. A. Tigre, "Diseño e implementación de algoritmos de visión artificial aplicados en vehículos aéreos no tripulados para aterrizaje autónomo: Caso de estudio en agricultura de precisión," Universidad de Cuenca, 2020. [Online]. Available: https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/dbd3614c-24c4-4f9e-8491-29dcf3fabc65

[14] E. Moral Ursúa, "Diseño y construcción de una plataforma de recarga para UAV," Trabajo de fin de grado, Universidad Pública de Navarra, 2020. [Online]. Available: https://academica-e.unavarra.es/entities/publication/162b3870-c7c9-407b-9ff6-daf214cd6b0a

[15] P. Mendióroz Beaumont, "Diseño, construcción y configuración de un copter y de un rover con plataforma de despegue y aterrizaje," Trabajo de fin de grado, Universidad Pública de Navarra, 2022. [Online]. Available: https://academica-e.unavarra.es/entities/publication/729e89b3-fcd2-4a93-a4b3-1fe205533c2b

[16] N. V. Carmona, "Estudio de carga inalámbrica en vehículos," Trabajo de Fin de Grado, 2023. [Online]. Available: https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/d6622bfe-eeeb-48f8-a098-97bef396bf9c/content

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Diseño y desarrollo preliminar de un exoesqueleto biomecánico para rehabilitación del brazo y la mano

Preliminary design and development of a low-cost biomechanical exoskeleton for elbow flexion–extension assistance and basic hand grasping

J. R. Gómez-Armenta[1] *, A. Mares-Castro[1], M. G. Moreno-Salcido[1]
(*ramon.ga@purisima.tecnm.mx)

Recibido: 25 de octubre de 2025 Aceptado: 5 de febrero de 2026

Resumen

El presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un prototipo biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I de un proyecto de investigación, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de ±45°, así como a la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. La propuesta surge ante la necesidad de explorar alternativas tecnológicas accesibles que contribuyan a reducir las barreras económicas asociadas a los dispositivos de rehabilitación robótica para extremidades superiores, particularmente en contextos con recursos limitados. El prototipo integra principios de biomecánica y criterios básicos de ajuste anatómico, empleando tecnologías emergentes y de código abierto, tales como la plataforma ESP32, manufactura aditiva mediante impresión 3D y actuadores eléctricos comerciales de bajo costo. La metodología se estructura como una validación funcional preliminar de carácter exploratorio e incluye análisis antropométrico básico, cálculos biomecánicos de torque para la articulación del codo, modelado CAD, simulaciones estructurales por elementos finitos y pruebas experimentales orientadas a verificar la factibilidad mecánica y de control del sistema, sin constituir una evaluación clínica ni ergonómica concluyente. Los resultados indican la factibilidad técnica preliminar del prototipo, alcanzando una precisión angular promedio de ±5° en el movimiento asistido del codo, un tiempo de respuesta de 0.4 s y un comportamiento energético estable durante las pruebas funcionales. Asimismo, se desarrolló una comparativa técnica y económica con dispositivos

[1]Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle #2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, GTO.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

reportados en la literatura y modelos comerciales de referencia, evidenciando una reducción aproximada del 49 % en el costo de fabricación, sustentada mediante una expresión matemática explícita. En conjunto, este estudio establece una base técnica para fases posteriores del proyecto y desarrollos tecnológicos futuros.

Palabras clave: *Exoesqueleto, Rehabilitación, Biomecánica, Control mecatrónico, ESP32*

Abstract

This work describes the design and development of a low-cost biomechanical prototype corresponding to Phase I of a research project, aimed at assisting elbow flexion–extension in the sagittal plane within an approximate angular range of ±45°, as well as applying force for hand closure through a basic grasping mechanism. The proposal arises from the need to explore accessible technological alternatives that help reduce the economic barriers associated with robotic rehabilitation devices for upper limbs, particularly in resource-limited contexts. The prototype integrates biomechanical principles and basic anatomical fitting criteria, employing emerging and open-source technologies such as the ESP32 platform, additive manufacturing through 3D printing, and low-cost commercial electric actuators. The methodology is structured as a preliminary exploratory functional validation and includes basic anthropometric analysis, biomechanical torque calculations for the elbow joint, CAD modeling, finite element structural simulations, and experimental tests aimed at verifying the mechanical and control feasibility of the system, without constituting a clinical or conclusive ergonomic evaluation. The results indicate the preliminary technical feasibility of the prototype, achieving an average angular accuracy of ±5° in assisted elbow motion, a response time of 0.4 s, and stable energy behavior during functional tests. In addition, a technical and economic comparison was conducted with devices reported in the literature and commercial reference models, showing an approximate 49 % reduction in manufacturing cost, supported by an explicit mathematical expression. Overall, this study establishes a technical basis for subsequent phases of the project and future technological developments.

Keywords: *Exoskeleton, Rehabilitation, Biomechanics, Mechatronic control, ESP32*

Introducción

El uso de exoesqueletos se ha consolidado en los últimos años como una alternativa tecnológica para la rehabilitación de personas con alteraciones en la movilidad, particularmente en las extremidades superiores. Estos dispositivos electromecánicos permiten asistir el movimiento humano mediante actuadores, sensores y sistemas de control, facilitando la ejecución de ejercicios repetitivos y

controlados que favorecen la readaptación motriz. A nivel internacional, países como Japón, Alemania y Estados Unidos han desarrollado sistemas avanzados con arquitecturas complejas y estrategias de control sofisticadas; sin embargo, su alto costo de adquisición, operación y mantenimiento limita su accesibilidad, especialmente en contextos con recursos restringidos. En México y otros países en desarrollo, el acceso a tecnologías de rehabilitación robótica sigue siendo limitado, lo que ha motivado esfuerzos principalmente académicos orientados al desarrollo de prototipos funcionales de bajo costo. No obstante, muchos de estos desarrollos se encuentran en etapas preliminares, con alcances específicos y validaciones experimentales acotadas, lo que evidencia la necesidad de enfoques graduales y modulares que permitan evaluar su factibilidad técnica antes de avanzar hacia soluciones más complejas.

Bajo esta perspectiva, el presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un prototipo biomecánico de bajo costo correspondiente a la Fase I de un proyecto de investigación, enfocado en la asistencia de la flexión y extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de $\pm 45°$, así como en la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. El estudio tiene un carácter exploratorio y preliminar, orientado a verificar la factibilidad mecánica y de control del sistema, sin constituir una validación clínica o ergonómica concluyente. El prototipo integra tecnologías accesibles, como la plataforma ESP32 y la manufactura aditiva mediante impresión 3D, y se concibe como una arquitectura modular susceptible de ampliación en fases posteriores.

Estado del arte

El desarrollo de exoesqueletos para la rehabilitación del miembro superior ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsado por el incremento de alteraciones motoras asociadas a lesiones neuromusculares, eventos cerebrovasculares y enfermedades degenerativas. En este contexto, los sistemas de asistencia robótica se han posicionado como una alternativa complementaria a las terapias convencionales, particularmente en procesos que requieren la ejecución de movimientos repetitivos, controlados y seguros. Diversos estudios reportan que el uso de exoesqueletos puede contribuir a mejorar la calidad del proceso de rehabilitación al permitir movimientos guiados, asistencia mecánica parcial y el registro objetivo de parámetros biomecánicos relevantes [1].

Desde la perspectiva de la ingeniería biomédica, se reconoce que los exoesqueletos destinados al miembro superior deben cumplir criterios biomecánicos fundamentales, tales como la alineación adecuada de los ejes articulares, el respeto de los planos fisiológicos de movimiento y la reducción de fuerzas parásitas que puedan generar incomodidad o riesgo para el usuario [2]. En este sentido, múltiples investigaciones destacan la importancia de integrar información antropométrica durante la etapa de diseño, especialmente cuando se busca adaptar los dispositivos a poblaciones específicas. Miranda-Bañuelos et al. subrayan la necesidad de desarrollar soluciones centradas en el usuario,

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

considerando las características antropométricas de la población mexicana para mejorar la ergonomía y la efectividad funcional de los dispositivos de rehabilitación [3]. En cuanto al diseño estructural, la manufactura aditiva ha representado un avance relevante en el desarrollo de dispositivos de rehabilitación robótica. Tecnologías como la impresión 3D permiten la fabricación de estructuras ligeras, modulares y personalizables, lo que facilita la adaptación anatómica del dispositivo, la reducción del peso total y la disminución de los costos de producción. Diversos trabajos reportan el uso de impresión 3D en exoesqueletos de bajo costo orientados tanto a aplicaciones clínicas exploratorias como a entornos académicos y de investigación [4–6]. En contraste, desarrollos industriales de alto desempeño, como ExoHand de Festo, integran sensores avanzados y sistemas complejos de control, constituyendo referencias tecnológicas relevantes, aunque con costos que limitan su implementación en instituciones públicas y educativas [7].

El avance en los sistemas de actuación también ha sido determinante en la evolución de los exoesqueletos de rehabilitación. El uso de servomotores digitales de alto torque ha permitido asistir movimientos específicos, como la flexión–extensión del codo y la apertura–cierre de la mano, con niveles aceptables de estabilidad y repetibilidad. Catálogos técnicos recientes reportan mejoras en densidad de potencia y confiabilidad de estos actuadores, lo que posibilita configuraciones compactas y eficientes [8, 9]. No obstante, en prototipos académicos y de investigación temprana sigue siendo común el uso de servomotores comerciales de bajo costo debido a su accesibilidad y facilidad de integración, aun cuando presentan limitaciones en precisión y durabilidad frente a soluciones industriales [10].

Respecto a los sistemas de control y adquisición de datos, la incorporación de plataformas IoT y tecnologías de conectividad ha ampliado las capacidades de monitoreo y análisis en dispositivos de rehabilitación robótica. Herramientas como Arduino Cloud permiten el registro remoto de variables como ángulos articulares, torque aplicado y número de ciclos de movimiento, facilitando el seguimiento experimental y el análisis funcional sin requerir presencia constante del operador [11–14]. Estas tecnologías resultan especialmente pertinentes en etapas preliminares de desarrollo, donde se busca evaluar la factibilidad técnica del sistema. En el contexto latinoamericano y particularmente en México, diversos estudios reportan avances en el desarrollo de ortesis activas y exoesqueletos impresos en 3D orientados a la rehabilitación neuromuscular. Sin embargo, se identifica de manera recurrente la necesidad de reducir costos, simplificar los sistemas electrónicos y mejorar la adaptación antropométrica, dado que muchas soluciones comerciales resultan económicamente inaccesibles para hospitales públicos, centros de rehabilitación y programas educativos [6, 15–17]. Asimismo, se observa una limitada disponibilidad de dispositivos diseñados específicamente considerando las características antropométricas de la población mexicana. A pesar de la diversidad de exoesqueletos comerciales y prototipos académicos reportados, pocos sistemas integran de manera conjunta manufactura aditiva personalizada, actuadores

de alto torque de bajo costo, plataformas de control abiertas y un enfoque explícito en accesibilidad económica [14, 18–20]. En este contexto, el presente trabajo se posiciona como una contribución de Fase I, orientada al diseño y validación funcional preliminar de un prototipo biomecánico de bajo costo, enfocado en la asistencia de la flexión–extensión del codo y la aplicación de fuerza para el cierre de la mano, estableciendo una base técnica para desarrollos posteriores.

Con el fin de contextualizar la propuesta desarrollada, se presenta una comparación sistemática entre soluciones representativas reportadas en la literatura y el prototipo propuesto, considerando parámetros técnicos y funcionales comúnmente aceptados, tales como rango de movimiento, tipo de actuadores, grado de asistencia, peso, principios de control y costos de implementación. Esta comparación, presentada en la Tabla 1, evidencia una reducción aproximada del 49 % en el costo respecto a dispositivos comerciales de referencia, sustentada mediante una expresión matemática explícita, en concordancia con prácticas habituales en estudios de rehabilitación robótica.

Tabla 1. *Comparativa técnica y económica de exoesqueletos para miembros superiores (2020–2025). Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica y modelos comerciales.*

Modelo / Referencia	DOF	Rango de movimiento	Actuadores	Principio de control	Materiales principales	Torque máx.	Peso total	Plataforma de control	Costo USD	Costo MXN	% diferencia	Observaciones
Lee et al. (2021)	2	Flexión–extensión de codo (0–120°)	Servos MG996R	Control por posición PWM	Impresión 3D + aluminio	3–4 N·m	1.8 kg	Arduino + Bluetooth	$350	$7,000	49 %	Bajo costo, limitada fuerza
Sanguansat (2020)	1	Flexión–extensión de dedo (0–90°)	Servos estándar	Control por ángulo	PLA impreso en 3D	2 N·m	1.2 kg	Arduino Cloud	$250	$5,000	28 %	Impreso en 3D, baja resistencia
Chen et al. (2022)	3	Flexión y abducción de hombro (0–160°)	Motores DC + reductores	Control híbrido PID	Aluminio estructural	8–10 N·m	4 kg	Control híbrido	$2,400	$48,000	1230 %	Alta precisión
MyoPro (Comercial)	3	Flexión–extensión de codo y mano (0–135°)	Actuadores eléctricos	Control mioeléctrico	Polímeros biomédicos	15–20 N·m	6 kg	Sistema propietario	$8,000–12,000	$240,000	6560 %	Eficacia clínica validada
HAL UL (Comercial)	3	Flexión–extensión hombro y codo (0–140°)	Motores EMG asistidos	Control EMG adaptativo	Aleaciones ligeras	12–18 N·m	5 kg	EMG + control adaptativo	$10,000	$200,000	5450 %	Alta asistencia muscular
ERGOMOTION (Propuesto)	**2**	**Flexión–extensión de codo y apertura–cierre de mano (0–120°)**	**Servo 150 kg·cm DS51150 + MG995**	**Control PWM + IoT**	**PLA/PETG + aluminio**	**6.1 N·m**	**1.4 kg**	**ESP32 + Arduino Cloud**	**$150–180**	**$3,600**	**Referencia base**	**Mayor accesibilidad económica y control IoT**

Fórmula para la determinación de la diferencia porcentual de costos, expresada en dólares estadounidenses y pesos mexicanos. La diferencia porcentual de costo se calculó mediante la siguiente expresión Ec. (1):

$$\Delta C\,(\,\%) = \frac{C_c - C_e}{C_c} \times 100 \tag{1}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

donde C_c corresponde al costo del dispositivo de referencia comercial y C_e corresponde al costo del exoesqueleto propuesto.

Nota: Los costos presentados corresponden a estimaciones comparativas y están sujetos a variaciones derivadas de factores macroeconómicos y del mercado, tales como inflación, fluctuaciones cambiarias y disponibilidad de componentes. El modelo propuesto se identifica en negritas con el fin de facilitar su reconocimiento y destacar la diferencia de costos en relación con las soluciones previamente reportadas en la literatura especializada.

A diferencia de los trabajos reportados, que se enfocan en arquitecturas de alta complejidad, validaciones clínicas o dispositivos de alto costo, este estudio se centra en el diseño y validación funcional preliminar de un exoesqueleto biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión–extensión del codo y al cierre básico de la mano, mediante el uso de manufactura aditiva y plataformas de control de código abierto, sin pretender una evaluación clínica concluyente.

Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del prototipo biomecánico se estructuró bajo un enfoque sistemático de validación funcional preliminar, correspondiente a la Fase I del proyecto, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica, mecánica y de control de un exoesqueleto de bajo costo destinado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo en el plano sagital y a la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre. En ningún caso se pretende una validación clínica ni ergonómica concluyente. Las etapas descritas a continuación corresponden al flujo metodológico general del proyecto y siguen el orden presentado en la Figura 1.

Fase de diseño conceptual

En la primera etapa del proyecto se llevó a cabo un análisis conceptual orientado a definir los requerimientos biomecánicos, dimensionales y funcionales del exoesqueleto, en concordancia con el alcance establecido para la Fase I del estudio. Esta fase se centró exclusivamente en la asistencia del movimiento de flexión–extensión del codo en el plano sagital, con un rango angular aproximado de $\pm 45°$, así como en la aplicación de fuerza para el cierre de la mano mediante un mecanismo básico de agarre, sin considerar movimientos de muñeca ni falanges individuales. Para el desarrollo del diseño se emplearon referencias antropométricas reportadas en la literatura, complementadas con mediciones preliminares de carácter exploratorio y no clínico, obtenidas a partir de pruebas realizadas con estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón y usuarios del sistema DIF del municipio de San Francisco del Rincón, Guanajuato. Estas pruebas tuvieron como objetivo recopilar información dimensional básica y observar el comportamiento general de los movimientos asistidos, sin constituir

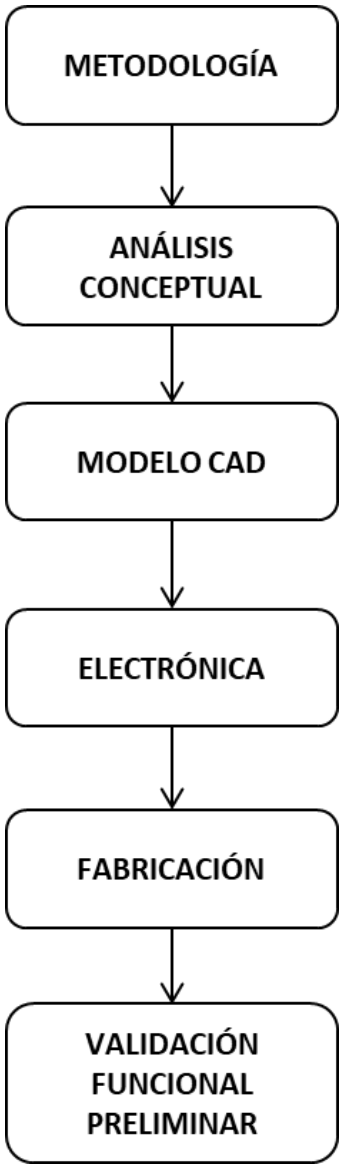


FIGURA 1. *Diagrama de flujo metodológico del desarrollo del exoesqueleto biomecánico. Fuente: Elaboración propia.*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

una evaluación médica o ergonómica concluyente. Los experimentos se realizaron con consentimiento informado y sin intervención terapéutica a personas que tenían dificultad en sus extremidades superiores. Como referencia general, se consideraron dimensiones antropométricas promedio de adultos mexicanos, estableciendo longitudes aproximadas de 40–50 cm para el brazo, 20–25 cm para el antebrazo y 15–20 cm para la mano. Esta información permitió definir los límites funcionales del movimiento del codo y los criterios de ajuste del módulo de mano, asegurando que el diseño respetara los planos fisiológicos del movimiento humano. A partir de este análisis se definió una arquitectura modular compuesta por tres segmentos principales: brazo, antebrazo y mano, interconectados mediante uniones articuladas que facilitan un movimiento controlado y reproducible.

La información obtenida en esta fase permitió establecer los criterios de diseño mecánico, selección de actuadores y definición del sistema de control, sentando las bases para las etapas posteriores de modelado CAD, análisis estructural y validación funcional preliminar. Asimismo, los parámetros antropométricos considerados se resumen en la Figura 2, la cual sirve como referencia para futuras fases del proyecto orientadas a la incorporación de nuevos grados de libertad y evaluaciones experimentales ampliadas.

Medidas Antropometricas a Alumnos de Verano (en cm)																
Código	80	32	420	SMB	656	411	752	LM	AM-p	AM-m	FAL-L	FAL-AP	FAL-AD	MAN-C	381	MUN-C
Muestra de alumnos	Largo de brazo desde la vertical	Largo de brazo	Largo de mano	Circunferencia del brazo	Largura de palma de mano (sin dedos)	Anchura de palma de mano	Largura de puño	Longitud de mano	Ancho de palma	Ancho de mano	Longitud de falanges	Ancho proximal de falanges	Ancho distal de falanges	Circunferencia de la mano	Longitud del codo al dedo medio	Circunferencia de la muñeca
																
1	72	68	16	25	20	7	13	20	22	9	2	1	1	18	49	15
2	73	69	17	25.5	20	7	9	20	22	10	3	2	1	28	50	14
3	74	70	17	27	20	7	7	18	21	11	3	2	1	21	49	17
4	76	71	17	27	22	7	13	17	22	10	4	2	1	28	47	14
5	77	71	17	27	22	7	11	17	20	11	4	1	1	26	46	14
6	77	71	17	27	22	7	7	20	22	11	2	1	1	18	50	18
7	78	72	17	28	22.5	7	11	20	20	11	2	2	1	23	48	16
8	78	72	17	28.5	22.5	7	11	20	20	11	3	2	1	24	49	18
9	79	72	17	28.5	22.5	7	9	19	22	10	4	2	1	17	47	18
10	79	72	18	28.5	22.5	7	8	20	22	9	2	1	1	27	47	15
40	88	79	19	33.5	28	8	10	17	20	10	4	1	1	20	49	18
41	89	80	19	34	28	8	8	20	20	9	3	2	1	26	46	17
42	89	81	20	34	28	8	13	19	20	10	3	1	1	24	47	16
43	89	81	20	34	28	8	11	19	21	11	2	2	1	24	47	14
44	89	82	20	34	28	8	12	17	22	9	4	1	1	28	50	14
45	90	82	20	34	28	8	9	20	21	9	4	2	1	28	48	15
46	90	82	20	34	29	8	9	19	20	10	2	2	1	27	46	18
47	90	82	21	34	29	8	12	19	21	9	2	1	1	24	47	16
48	91	83	19	34	29	8	13	17	21	10	4	2	1	24	48	15
49	92	83	21	34	30	8.1	10	20	21	9	2	2	1	21	50	14
50	92	83	21	35	30	8.1	8	19	22	10	4	2	1	28	48	15
51	94	85	21	35	30	8.1	7	20	22	9	2	1	1	23	45	16
52	96	86	21	35	30	8.1	8	17	22	11	3	1	1	27	50	14
Percentil 95%	92.7	83.7	21	35	30	8.1	13	20	22	11	4	2	1	28	50	18
Percentil 95% (red)	92.8	83.8	21	35	30	8.1	13	20	22	11	4	2	1	28	50	18

FIGURA 2. *Parámetros antropométricos preliminares empleados para el diseño del exoesqueleto. Fuente: Elaboración propia, con base en mediciones experimentales y literatura biomecánica estándar.*

Mediante la aplicación de un enfoque de diseño centrado en el usuario, se desarrollaron inicialmente bocetos conceptuales, diagramas funcionales y una descripción jerárquica de los subsistemas mecánico, electrónico y de control que conforman el exoesqueleto. En esta etapa se establecieron los criterios de diseño fundamentales, orientados a garantizar ergonomía básica, facilidad de ensamblaje, bajo peso estructural, reducción de costos y compatibilidad con componentes electrónicos comerciales de amplia disponibilidad. Con base en dichos criterios, se definieron los materiales y componentes necesarios

para la construcción del prototipo. Durante las etapas iniciales de validación del diseño, las pruebas funcionales preliminares se realizaron empleando tres servomotores MG995, con un torque nominal de 15 kg·cm, de los cuales dos fueron destinados al accionamiento del módulo de brazo y uno al módulo de la mano. Estos actuadores permitieron verificar la arquitectura mecánica básica del sistema, la correcta alineación articular y la viabilidad de la estrategia de control implementada. Su selección respondió a criterios de disponibilidad comercial, bajo costo y facilidad de integración, adecuados para una fase exploratoria del desarrollo.

No obstante, durante las pruebas de operación continua se identificaron limitaciones en la capacidad de torque y en la estabilidad del movimiento, particularmente al asistir los movimientos de flexión y extensión del codo bajo carga. A partir de estas observaciones, el sistema de actuación fue optimizado mediante la incorporación de un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm), equipado con engranajes metálicos y capacidad de operación a 12 V. Esta modificación permitió mejorar significativamente la suavidad del movimiento, reducir vibraciones y garantizar una asistencia más estable y confiable. La integración del servomotor de alto torque permitió superar ampliamente el torque biomecánico requerido, optimizando la respuesta dinámica del sistema y favoreciendo una ejecución más controlada de los movimientos asistidos. Esta mejora resulta especialmente relevante para aplicaciones terapéuticas, al contribuir a una interacción más confortable con el usuario y a una mayor confiabilidad durante sesiones prolongadas de operación. Los materiales y herramientas empleados para la elaboración de los componentes del prototipo se presentan en la Figura 3.

Fase de modelado CAD y análisis estructural

Una vez establecidas las dimensiones y los requerimientos funcionales del exoesqueleto, se procedió al desarrollo del modelo tridimensional mediante el software Autodesk Inventor. El diseño consideró geometrías ligeras y estructuralmente resistentes, incorporando configuraciones tipo retícula con el propósito de reducir masa sin comprometer la integridad mecánica del sistema. Para todas las piezas estructurales se definieron espesores mínimos de 2.5 mm, valor seleccionado para garantizar un comportamiento adecuado frente a esfuerzos de flexión y torsión durante la operación normal del dispositivo. El modelo tridimensional de los componentes principales y los resultados del análisis estructural se presentan en la Figura 4.

Estos resultados permitieron confirmar que el diseño propuesto cumple con los criterios de resistencia mecánica y rigidez necesarios para las pruebas experimentales posteriores, estableciendo una base confiable para las fases de fabricación y validación funcional.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

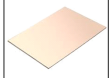
Nombre	Imagen	Nombre	Imagen	Nombre	Imagen	Nombre	Imagen
ESP32 de 38 pines		Pijas		Filamento PLA		Broca de carburo de tugsteno de 1.2 mm	
Servomotores MG995 de 15KG		Pilas de litio		Impresora 3D		Cloruro ferrico	
Eliminador de 12 Voltios		Cables JST		Software de inventor		Placas fenolicas	
Kit de cable dupont hembra-macho		Terminales JST		Regla		Pintura en aerosol de aceite color negro mate	
Kit de arduino con librerias		Cable USB mini		Flexometro		Marcador de aceite negro	
Velcro hembra - macho		Placa de cobre para protobard		Hilo y agujas		Pijas	
Tarrajas		Cautin		Lapto		Servomotores DS511150	
Modulo regulador MP1584		Estaño		Multimetro astro CM2KOR		Grasa para estaño	

FIGURA 3. *Materiales y herramientas empleadas para la elaboración del prototipo del exoesqueleto. Fuente: Elaboración propia.*

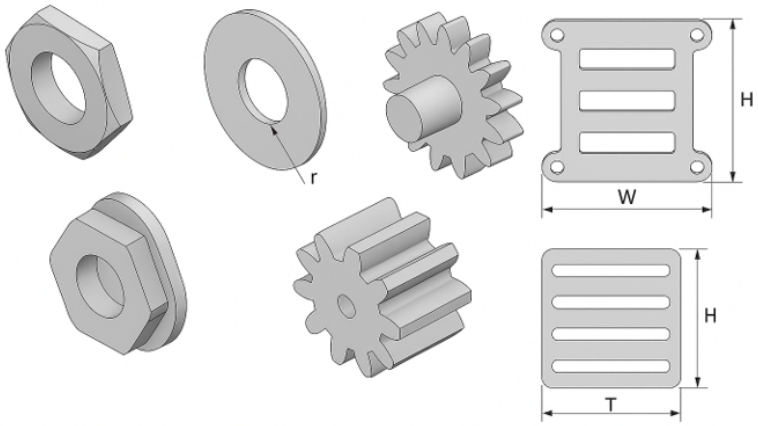


FIGURA 4. *Modelado de componentes principales del exoesqueleto en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia.*

Fase de cálculo de torque y potencia

Con base en los datos antropométricos y la masa promedio del brazo humano (2.5 kg), se calcularon los torques requeridos en las articulaciones principales. El torque teórico se estimó considerando el modelo biomecánico clásico del brazo humano Ec. (2), como se ilustra en la Figura 5.

$$T = F \cdot r = (m \cdot g) \cdot r \tag{2}$$

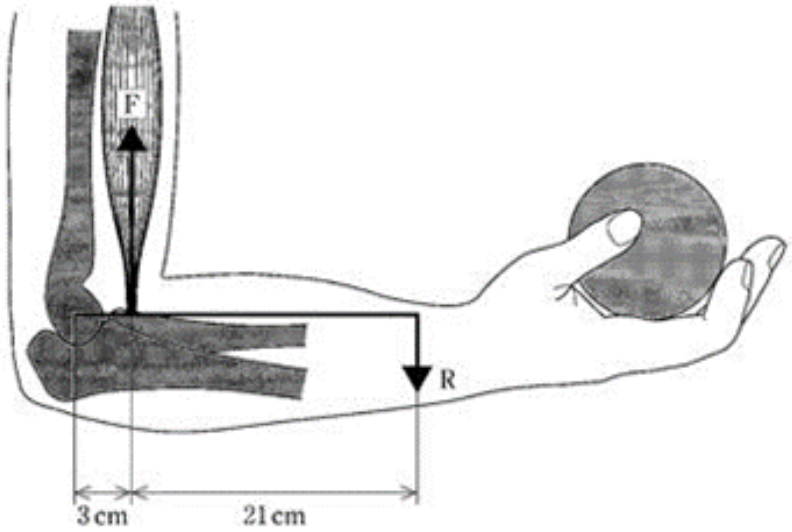


FIGURA 5. *Diagrama biomecánico del brazo humano durante la flexión del codo, mostrando la relación entre la fuerza muscular (F) y la resistencia aplicada (R). Fuente: Elaboración propia.*

Los cálculos biomecánicos realizados permitieron estimar un torque promedio de 6.1 N·m para la asistencia del movimiento de flexión del codo, valor que se considera como el requerimiento biomecánico mínimo para esta aplicación. Durante la fase exploratoria del diseño, se emplearon servomotores MG995 con un torque nominal de 15 kg·cm, los cuales resultaron adecuados para validar la arquitectura mecánica del sistema y la estrategia de control implementada en condiciones de prueba inicial. Sin embargo, durante las pruebas bajo carga se identificaron limitaciones en la estabilidad y suavidad del movimiento, atribuibles a la capacidad de torque de dichos actuadores. En respuesta a estas observaciones, y con el objetivo de garantizar un margen de seguridad adecuado, así como una operación más estable y confiable, el prototipo final incorporó un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm, modelo DS51150) en la articulación del codo. Esta selección permitió superar ampliamente el torque biomecánico requerido, mejorando la respuesta dinámica del sistema y asegurando un desempeño más consistente durante la validación funcional preliminar.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

Fase de integración electrónica y control

El sistema de control del exoesqueleto se implementó utilizando un microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento de doble núcleo, conectividad inalámbrica integrada (Wi-Fi y Bluetooth) y compatibilidad con una amplia variedad de sensores analógicos y digitales. Estas características permiten una implementación flexible del sistema de control y facilitan su integración con interfaces externas durante la fase de validación funcional preliminar.

La arquitectura electrónica del prototipo está compuesta por los siguientes elementos principales:

- Sensores de posición basados en potenciómetros lineales para la medición de los ángulos articulares.
- Módulo de comunicación Bluetooth para la interacción con una aplicación móvil.
- Servomotores digitales de posicionamiento angular para la generación del movimiento asistido.
- Fuente de alimentación con un rango de operación de 10–12.6 V, equipada con protección térmica para garantizar una operación segura.

El firmware del sistema fue desarrollado en el entorno Arduino IDE, implementando rutinas básicas de adquisición de señales, calibración de límites de movimiento y generación de señales PWM para el control de los servomotores. El sistema permite la configuración del ángulo objetivo y la velocidad de ejecución a través de una interfaz móvil de carácter sencillo, lo que facilita el ajuste del dispositivo de acuerdo con las características físicas del usuario y los requerimientos de la sesión de prueba. El diagrama a bloques del sistema de control se presenta en la Figura 6.

Fase de fabricación

Las piezas del exoesqueleto fueron fabricadas mediante impresión 3D por deposición de material fundido (FDM), utilizando PLA como material base, con un relleno del 40 % y una resolución de capa de 0.2 mm. Estos parámetros se seleccionaron para lograr un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, peso reducido y facilidad de manufactura. Con el propósito de facilitar el mantenimiento, la sustitución de componentes y futuras modificaciones del diseño, se emplearon uniones mecánicas desmontables mediante tornillería M4. Cada uno de los módulos del exoesqueleto (brazo, antebrazo y mano) fue ensamblado de manera independiente, verificando previamente la movilidad libre de las articulaciones, así como la alineación adecuada entre los ejes articulares correspondientes. Este procedimiento permitió asegurar una integración correcta entre los segmentos estructurales y evitar interferencias mecánicas durante la operación del dispositivo.

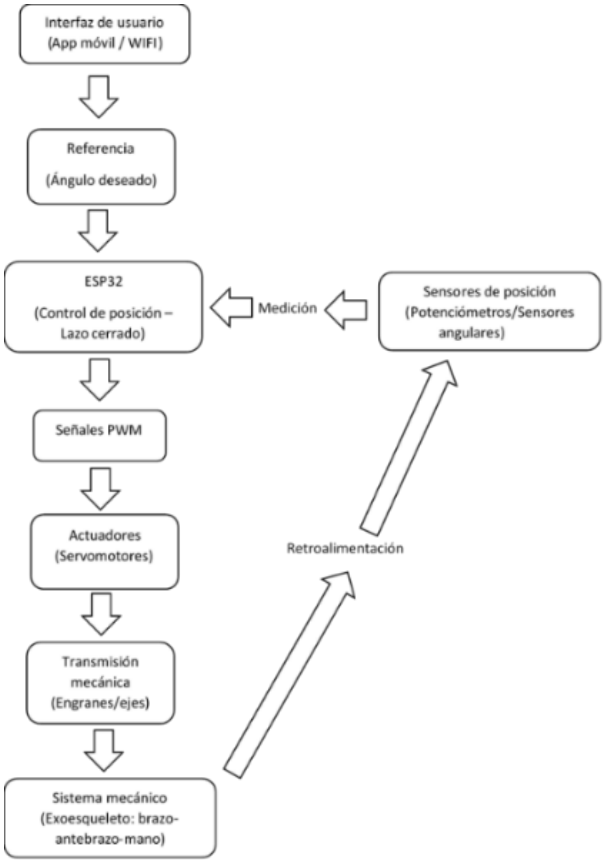


FIGURA 6. *Diagrama a bloques del sistema de control del exoesqueleto biomecánico basado en ESP32. Fuente: Elaboración propia.*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

Durante el proceso de fabricación y ensamblaje, se prestó especial atención a la integración entre los elementos estructurales y el sistema de actuación, con el fin de garantizar una transmisión eficiente del movimiento y una ejecución controlada de los movimientos asistidos. Las Figuras 7 y 8 muestran el conjunto actuador–engranaje y el componente estructural del módulo de brazo, responsables de la generación y transmisión del movimiento de flexión–extensión hacia el antebrazo.



FIGURA 7. *Actuador con sistema de engranajes acoplado a servomotor para la generación del movimiento de flexión–extensión del brazo. Fuente: Elaboración propia.*

Por su parte, las Figuras 9 y 10 ilustran las etapas de fabricación aditiva y el conjunto de piezas correspondientes al módulo de antebrazo, evidenciando la arquitectura modular del diseño y la facilidad de ensamblaje alcanzada mediante manufactura aditiva. Esta configuración favorece la adaptación dimensional del dispositivo y simplifica tanto las tareas de mantenimiento como la sustitución individual



FIGURA 8. *Componente estructural del módulo de brazo que conecta el actuador con el antebrazo, permitiendo el movimiento articular controlado. Fuente: Elaboración propia.*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

de componentes.



FIGURA 9. *Impresión 3D del componente estructural del módulo de antebrazo del exoesqueleto durante la etapa de fabricación. Fuente: Elaboración propia.*

Servomotor utilizado después de la fase experimental. Una vez concluidas las pruebas experimentales preliminares del prototipo, el sistema de actuación fue optimizado mediante la incorporación de un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm), modelo DS51150. La selección de este actuador respondió a la necesidad de garantizar un margen de seguridad adecuado respecto al torque biomecánico estimado, así como de mejorar la estabilidad y continuidad del movimiento durante la operación del exoesqueleto bajo condiciones de carga. El servomotor opera en un rango de alimentación de 10–12.6 V y cuenta con una estructura compacta, lo que facilitó su integración dentro del diseño mecánico sin requerir modificaciones significativas en la arquitectura del sistema. La incorporación de este actuador permitió una transmisión de movimiento más controlada y consistente, reduciendo vibraciones y mejorando la suavidad del desplazamiento durante la ejecución de los movimientos asistidos. Esta mejora resultó especialmente relevante para la validación funcional preliminar del dispositivo, al contribuir a una interacción más confiable entre el sistema mecánico y el usuario durante ciclos prolongados de operación. El servomotor digital de alto torque empleado en esta etapa se muestra en la Figura 11.

Fase de validación funcional preliminar

La etapa final del desarrollo consistió en la validación funcional preliminar del prototipo, realizada bajo condiciones simuladas de uso y con un enfoque exploratorio. En esta fase se efectuaron pruebas de repetitividad del movimiento, mediciones angulares mediante goniómetro digital y una evaluación



FIGURA 10. *Conjunto de componentes del módulo de antebrazo del exoesqueleto fabricados por manufactura aditiva (impresión 3D). Fuente: Elaboración propia.*



FIGURA 11. *Servomotor digital de alto torque (150 kg·cm, modelo DS51150), empleado en la etapa final del prototipo para mejorar la estabilidad y suavidad del movimiento asistido. Fuente: (DSServo, 2023).*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

preliminar del consumo de corriente bajo carga controlada.

El exoesqueleto reprodujo de forma consistente los movimientos de flexión y extensión del codo en un rango de 0° a 45°, con una precisión angular promedio de ±5° y un tiempo de respuesta medio de 0.4 s, lo que indica un comportamiento estable y adecuado para esta fase inicial del proyecto. Los resultados del comportamiento dinámico y del consumo eléctrico del sistema se presentan en la Figura 12.

Cabe señalar que estas pruebas no constituyen una evaluación clínica ni ergonómica concluyente, sino que tuvieron como objetivo verificar la factibilidad técnica y funcional del prototipo e identificar áreas de mejora para fases posteriores. Los resultados obtenidos sirvieron como base para la documentación del desempeño del sistema y la planificación de futuras etapas con validaciones experimentales ampliadas.

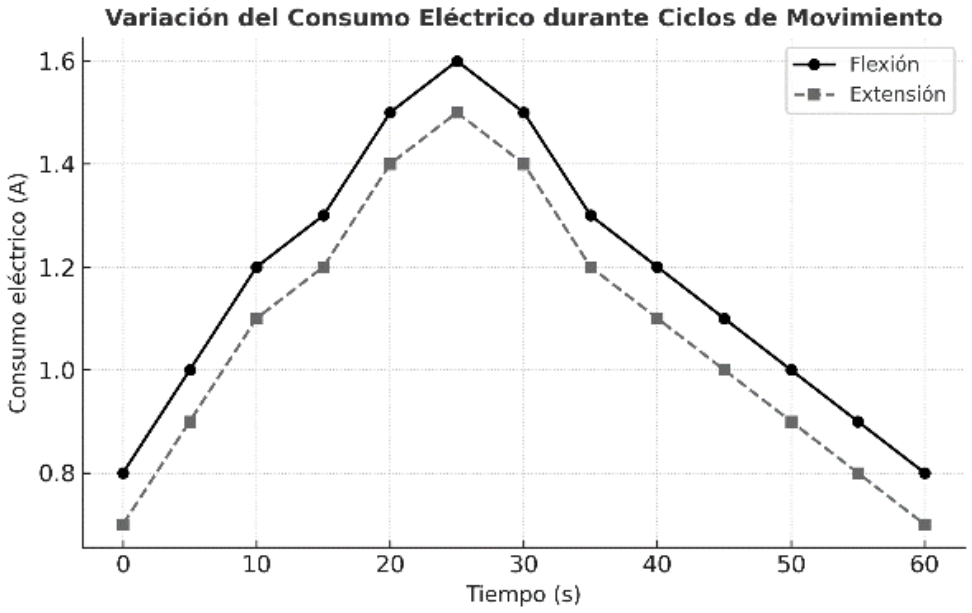


FIGURA 12. *Variación del consumo eléctrico durante ciclos de flexión y extensión del exoesqueleto. Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de desempeño obtenidos fueron contrastados con reportes previos de dispositivos de rehabilitación similares, lo que permitió identificar una reducción aproximada del 49 % en el costo total de producción del prototipo desarrollado, en comparación con modelos comerciales de referencia. Asimismo, el diseño modular y ajustable del exoesqueleto mostró una adecuada adaptabilidad a diferentes morfologías del usuario, de acuerdo con las pruebas funcionales preliminares realizadas.

Finalmente, se documentaron de manera sistemática los parámetros básicos de calibración, así como las recomendaciones de mantenimiento y operación segura del dispositivo, con el objetivo de consolidar

un procedimiento replicable que sirva como base para futuras iteraciones del diseño y para evaluaciones experimentales ampliadas en fases posteriores del proyecto.

Resultados

El desarrollo del exoesqueleto biomecánico permitió obtener un prototipo funcional de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo y al cierre básico de la mano mediante un mecanismo de agarre. Los resultados presentados derivan de una validación funcional preliminar de carácter exploratorio, coherente con los objetivos de diseño, control y funcionamiento definidos en la etapa conceptual. A continuación, se describen los principales hallazgos desde los enfoques estructural, electrónico, biomecánico y funcional, sin constituir una evaluación clínica concluyente.

Características físicas y estructurales del exoesqueleto

El prototipo final fue fabricado mediante impresión 3D FDM utilizando material PLA, seleccionado por su bajo peso, resistencia mecánica y facilidad de manufactura. Las piezas se produjeron con un relleno del 40 % y una resolución de capa de 0.2 mm, logrando un equilibrio adecuado entre rigidez estructural y ligereza. El sistema se compone de tres módulos principales (brazo, antebrazo y mano), interconectados mediante uniones articuladas que permiten movimientos controlados y alineados con los planos fisiológicos, como se muestra en la Figura 13.

El dispositivo presentó un peso total de 1.4 kg, incluyendo actuadores y componentes electrónicos, lo que permitió un manejo adecuado durante las pruebas funcionales preliminares sin generar incomodidad significativa. Su diseño modular facilitó el mantenimiento, la sustitución de componentes y la adaptación a distintos usuarios, ajustándose mediante correas y soportes acolchados a estaturas entre 1.55 m y 1.85 m, con adecuada alineación anatómica. En pruebas de resistencia mecánica, el sistema soportó una carga estática de 25 N aplicada en el extremo distal del antebrazo sin deformaciones permanentes, en concordancia con los resultados obtenidos en las simulaciones por elementos finitos (FEA), lo que confirma su estabilidad estructural bajo condiciones simuladas de uso repetitivo.

En las pruebas dinámicas, el exoesqueleto reprodujo de forma estable el movimiento de flexión–extensión del codo en un rango de 0° a 45°, acorde con el alcance definido para esta fase del proyecto. El módulo de la mano permitió movimientos básicos de apertura y cierre, sin evaluación funcional detallada de muñeca o falanges. Las mediciones angulares realizadas con goniómetro digital mostraron una precisión promedio de $\pm 5°$, comparable con otros prototipos académicos de carácter exploratorio. El tiempo medio de respuesta para un ciclo completo de flexión–extensión fue de 0.4 s, con una variación inferior al 2 % entre ciclos consecutivos, evidenciando un comportamiento repetible y controlado.

El torque efectivo en la articulación del codo alcanzó 6.1 N·m, suficiente para movilizar el antebrazo

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53



FIGURA 13. *Vista general del diseño estructurado del exoesqueleto biomecánico para brazo y mano. Fuente: Elaboración propia.*

bajo condiciones simuladas de uso. El diseño mecánico de las palancas permitió una transmisión eficiente del esfuerzo generado por los actuadores, logrando una operación fluida y estable, como se muestra en la Figura 14.

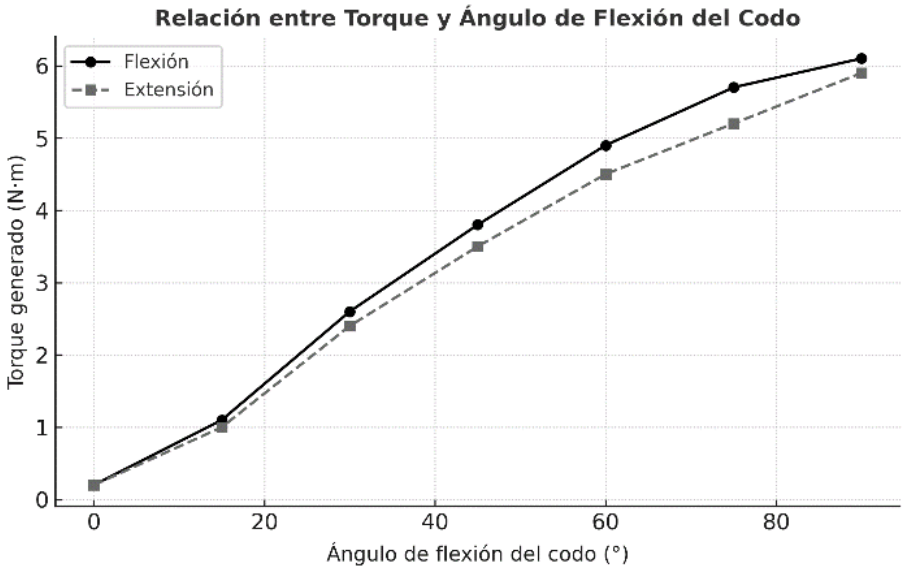


FIGURA 14. *Relación entre el torque generado y el ángulo de flexión del codo durante las pruebas experimentales. Fuente: Elaboración propia.*

El control del exoesqueleto se implementó mediante un microcontrolador ESP32, responsable de la adquisición de señales de posición y del accionamiento de los actuadores mediante señales PWM. El sistema mantuvo una relación lineal entre el ángulo de referencia definido por el usuario y el desplazamiento del mecanismo, lo que permitió una ejecución controlada y repetible de los movimientos asistidos. Durante las pruebas funcionales preliminares se evaluó la estabilidad del control bajo distintas condiciones de carga y ángulo, operando a una frecuencia de actualización de 100 Hz, lo que garantizó una respuesta en tiempo real sin retardos apreciables. El consumo promedio de corriente fue de 0.8 A, con picos de hasta 1.2 A bajo carga, manteniendo la temperatura de los servomotores por debajo de 40°C, condición adecuada para una operación segura en sesiones continuas de prueba.

La comunicación inalámbrica mediante Bluetooth permitió la interacción con una aplicación móvil desarrollada en el entorno Arduino, utilizada para la visualización de ángulos, la activación de rutinas básicas y el ajuste de parámetros como velocidad y rango de operación. Adicionalmente, se incorporó una rutina de calibración inicial para ajustar los límites de movimiento de acuerdo con las dimensiones del usuario, con el fin de evitar sobreextensiones articulares durante las pruebas exploratorias, como se muestra en la Figura 15.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

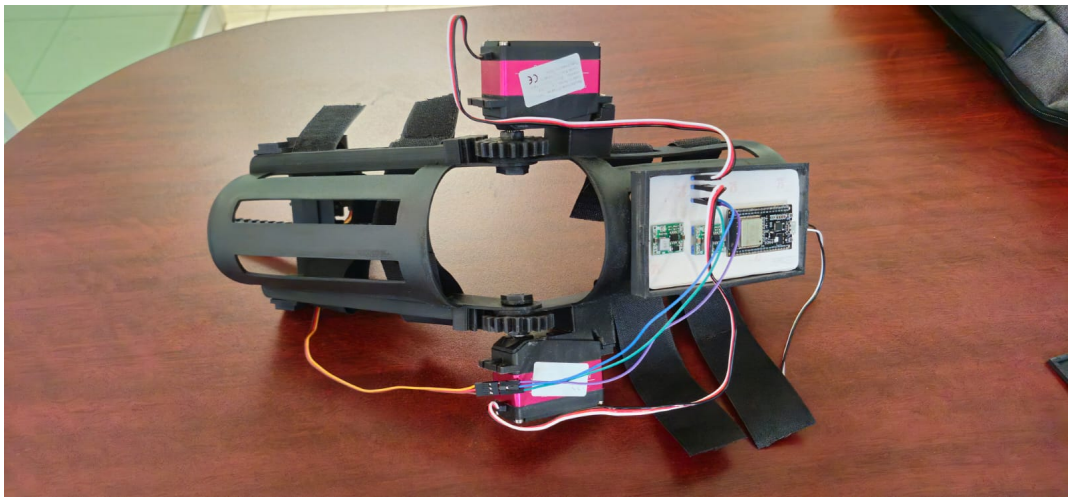


FIGURA 15. *Prototipo del exoesqueleto biomecánico durante las pruebas funcionales, mostrando la integración del sistema de control basado en ESP32. Fuente: Elaboración propia.*

Con el objetivo de obtener retroalimentación inicial sobre el ajuste físico y la interacción básica con el dispositivo, se realizaron pruebas exploratorias de uso con tres participantes adultos de diferentes tallas. Estas pruebas tuvieron un carácter no clínico y se orientaron exclusivamente a analizar aspectos relacionados con el ajuste anatómico, movilidad, peso percibido, estabilidad y facilidad de uso del prototipo durante sesiones controladas de corta duración.

La evaluación se llevó a cabo mediante un instrumento de percepción preliminar, diseñado específicamente para esta fase del proyecto, el cual permitió identificar tendencias generales y áreas de mejora del diseño, sin pretender establecer conclusiones generalizables.

Los participantes reportaron que el exoesqueleto presentó un ajuste adecuado al brazo y permitió su uso continuo durante aproximadamente 20 minutos sin generar incomodidad significativa. Asimismo, se destacó la facilidad para colocar y retirar el dispositivo, así como la sensación de movimientos asistidos suaves y controlados, tal como se resume en la Tabla 2. Debido al alcance exploratorio del estudio y al tamaño reducido de la muestra, se empleó una escala de percepción tipo Likert (1–5) únicamente con fines descriptivos (no médicos), destinada a apoyar la toma de decisiones de diseño en versiones futuras del prototipo, y no como un instrumento de validación ergonómica o clínica.

Durante esta fase preliminar, las pruebas de uso no constituyeron una evaluación clínica ni un estudio formal de usabilidad, sino que se emplearon como mecanismo de retroalimentación técnica para identificar áreas de mejora y orientar decisiones de diseño en etapas posteriores. Al comparar los resultados obtenidos con estudios previos de exoesqueletos de miembro superior reportados en la literatura, el prototipo alcanzó niveles de precisión angular y tiempo de respuesta comparables a sistemas

Tabla 2. *Resultados de la percepción preliminar de uso del prototipo. Fuente: Elaboración propia.*

Criterio de evaluación	Valor promedio observado (1–5)
Ajuste anatómico	4.6
Comodidad durante el uso	4.4
Facilidad de colocación	4.2
Libertad de movimiento	4.5
Peso percibido del dispositivo	4.0
Nivel de seguridad percibido	4.7
Percepción global del uso del prototipo	4.5

comerciales de referencia, dentro del contexto de una validación funcional preliminar. No obstante, el costo estimado de manufactura fue 49 % menor, lo que evidencia el potencial del uso de materiales accesibles, manufactura aditiva y plataformas de control de código abierto para el desarrollo de soluciones tecnológicas de bajo costo. Estos resultados respaldan el enfoque académico y experimental del estudio, demostrando la factibilidad técnica de implementar un exoesqueleto funcional con recursos limitados, sin pretender sustituir dispositivos clínicos certificados. En este sentido, el prototipo se perfila como plataforma viable para entornos educativos, de investigación e innovación tecnológica, así como base para futuras fases del proyecto que contemplen evaluaciones experimentales ampliadas y análisis clínicos formales. Finalmente, se presenta una síntesis de los resultados en las Tablas 3 y 4, con el propósito de facilitar la comparación del desempeño del prototipo frente a modelos de referencia.

Tabla 3. *Resumen de resultados comparativos de desempeño del exoesqueleto frente a modelos de referencia. Fuente: Elaboración propia.*

Parámetro	Valor obtenido
Rango de movimiento	0°–45° (codo)
Precisión angular	$\pm 5°$
Tiempo de respuesta	0.4 s
Consumo promedio	0.8 A
Peso total	1.4 kg
Costo de fabricación	49 % menor que modelos comerciales
Percepción preliminar de uso	Favorable en la muestra evaluada

Nota: La precisión angular del prototipo se mantuvo en un error promedio de $\pm 5°$ tras la optimización del sistema de control, mejorando la estabilidad y repetibilidad del movimiento, como se muestra en la Figura 16. Los valores presentados en esta tabla corresponden a la versión base utilizada para la comparación con modelos comerciales.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

Tabla 4. *Comparación del exoesqueleto propuesto con modelos comerciales de referencia. Fuente: Elaboración propia.*

Parámetro	Prototipo (Propuesto)	Modelo comercial A	Modelo comercial B
Precisión angular (°)	±5	±2	±4
Tiempo de respuesta (s)	0.4	0.3	0.5
Torque máximo (kg·cm)	150	18	12
Consumo energético (W)	18	25	20
Peso total (kg)	1.4	1.2	1.8

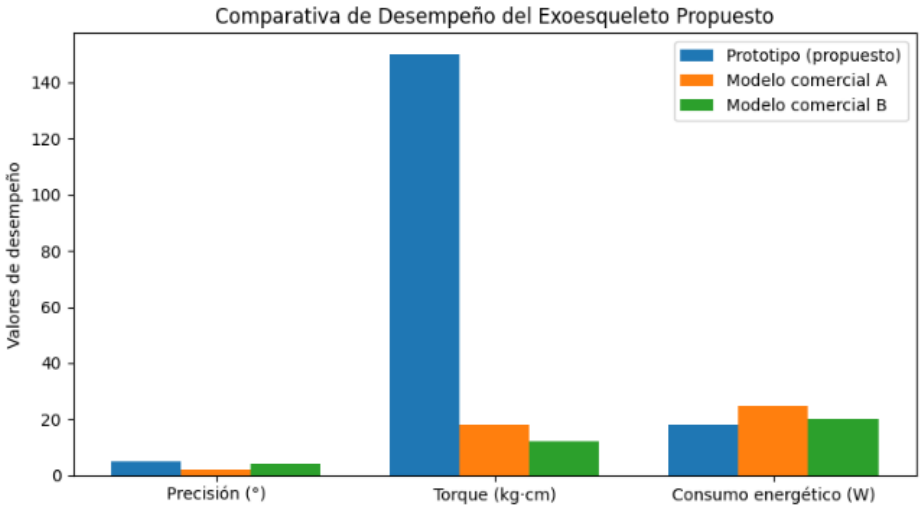


FIGURA 16. *Comparativa de desempeño del exoesqueleto propuesto frente a modelos de referencia comerciales. Fuente: Elaboración propia.*

Durante la fase de validación funcional preliminar, el exoesqueleto fue sometido a pruebas exploratorias con usuarios voluntarios para observar su comportamiento dinámico, el ajuste físico general y su capacidad básica de asistencia en los movimientos de flexión y extensión del codo, conforme al alcance definido para esta etapa del proyecto. La Figura 17 presenta el prototipo final instalado en la extremidad superior de un usuario, destacando la disposición de los servomotores en la articulación del codo, el sistema de transmisión por engranajes y la estructura modular del antebrazo y la mano. La integración de estos elementos evidencia una adecuada articulación entre los componentes mecánicos y electrónicos, así como un diseño orientado a la estabilidad y al ajuste anatómico, apropiado para sesiones controladas de prueba sin interferir con los movimientos naturales del brazo.



FIGURA 17. *Prototipo final del exoesqueleto biomecánico instalado en la extremidad superior de un usuario. Fuente: Elaboración propia.*

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El presente trabajo permitió demostrar la viabilidad técnica de un prototipo biomecánico de bajo costo, correspondiente a la Fase I del proyecto, orientado a la asistencia del movimiento de flexión y extensión del codo y al cierre básico de la mano mediante un mecanismo de agarre. Los resultados obtenidos se derivan de una validación funcional preliminar de carácter exploratorio, coherente con los objetivos planteados y sin pretender constituir una evaluación clínica o ergonómica concluyente. Desde el punto de vista funcional, el prototipo fue capaz de reproducir el movimiento del codo con una precisión angular promedio de $\pm 5°$, un tiempo de respuesta de 0.4 s y un consumo energético moderado, valores comparables con los reportados en otros prototipos académicos de rehabilitación robótica. Estos resultados confirman que la arquitectura mecánica y el sistema de control implementados son adecuados para pruebas exploratorias de asistencia al movimiento. Durante el desarrollo del proyecto se realizaron ajustes progresivos en los componentes mecánicos y de actuación, destacando la sustitución

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.26869 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 27- 53

de servomotores de bajo torque utilizados en la fase exploratoria inicial por un servomotor digital de alto torque (150 kg·cm) en la articulación del codo. Esta decisión, fundamentada en los cálculos biomecánicos y las pruebas funcionales, permitió mejorar la estabilidad y la suavidad del movimiento asistido, manteniendo el enfoque de seguridad y control del sistema. Para el módulo de la mano se conservó un actuador de menor torque, acorde con los requerimientos funcionales de esta sección.

La estructura modular fabricada mediante impresión 3D facilitó la adaptación dimensional del dispositivo, el mantenimiento y la replicabilidad del diseño, reforzando su valor en entornos educativos y de investigación. Asimismo, el sistema de control basado en ESP32 mostró un comportamiento estable y predecible, permitiendo el ajuste básico de parámetros sin retardos apreciables durante la operación. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el enfoque académico y social del proyecto, evidenciando que el uso de tecnologías emergentes y de código abierto permite desarrollar prototipos funcionales de rehabilitación a bajo costo, con potencial de impacto en contextos con recursos limitados. No obstante, se reconoce que fases posteriores del proyecto deberán incorporar evaluaciones experimentales ampliadas, estudios clínicos controlados y la integración de nuevos grados de libertad, con el fin de avanzar hacia aplicaciones terapéuticas formales.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

J. R. Gómez-Armenta: Investigación, Supervisión, Administración del proyecto, Conceptualización, Escritura – revisión y edición. **A. Mares-Castro**: Supervisión, Validación, Metodología. **M. G. Moreno-Salcido**: Validación, Metodología, Investigación, Escritura – borrador original.

Referencias

[1] I. Hussain, G. Salvietti, and D. Prattichizzo, “Review on upper-limb rehabilitation exoskeletons: Trends and challenges,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 145, p. 103856, 2021.

[2] I. Díaz, J. J. Gil, and E. Sánchez, “Upper limb exoskeleton rehabilitation systems: Biomechanical alignment and interaction,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 62, p. 102112, 2020.

[3] M. Miranda-Bañuelos *et al.*, “Desarrollo de dispositivos de rehabilitación centrados en el usuario,” *Acta Universitaria*, vol. 33, pp. 1–28, 2023.

[4] A. Cardona, “Exoesqueletos de miembro superior basados en impresión 3D,” *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 42, no. 3, pp. 145–159, 2021.

[5] F. Grandi, A. P. Karthikeyan, and E. Vaz, “Low-cost 3D-printed exoskeleton for post-stroke hand rehabilitation,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 19, no. 6, pp. 1207–1215, 2022. DOI: 10.14733/cadaps.2022.1207-1215

[6] C. Răduică, "Low-cost robotic rehabilitation devices using open-source electronics," *Machines*, vol. 12, no. 12, p. 889, 2024. DOI: 10.3390/machines12120889

[7] Festo, "ExoHand: Bionic Learning Network," https://www.festo.com, 2022.

[8] Leadshine, *Servo Motor Technical Catalog*, Leadshine Technology Co., Ltd., 2024.

[9] Teknic, *Servo Motor Comparison Guide*, Teknic Inc., 2024.

[10] DIYMall, *DS51150 150 kg·cm Servo Motor Specifications*, DIYMall, 2023.

[11] Arduino, "Arduino Cloud Quick Guide V2," https://cloud.arduino.cc, 2024.

[12] S. Zaidi and M. Harris-Love, "A data-driven approach for biomechanical analysis in robotic rehabilitation," *PeerJ*, vol. 11, no. 5, p. e16374, 2023. DOI: 10.7717/peerj.16374

[13] M. Bonanno, G. Porciello, and A. Sorrentino, "Robot-aided motion analysis in neurorehabilitation: Objective motor assessment, biomechanics, and rehabilitation robotics," *Heliyon*, vol. 9, no. 10, p. e16202, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16202

[14] I. Aprile, A. Berardi, and A. Cruciani, "Rehabilitation robotics and allied digital technologies: Challenges and prospects," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 12, p. 1531067, 2025.

[15] J. L. Hernández Arellano *et al.*, "Desarrollo de ortesis activas para rehabilitación del brazo," *RMIB*, vol. 44, no. 1, 2022.

[16] R. Villafuerte *et al.*, "Desarrollo de ortesis robóticas para movilidad reducida," Dialnet, 10097435, 2023.

[17] L. Hernández and M. Gutiérrez, "Anthropometric customization in robotic exoskeleton design," *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 45–58, 2023. DOI: 10.1177/20556683231104558

[18] T. Banyai, C. Brişan, and A. Tóth, "Standardization and safety in robotic-assisted physical therapy: A systematic review," *Healthcare*, vol. 12, no. 17, p. 1720, 2024. DOI: 10.3390/healthcare12171720

[19] J. L. Díaz, R. Mendoza, and P. Ortega, "Application of technology readiness levels (TRL) to upper-limb rehabilitation robots," *Machines*, vol. 14, no. 3, p. 48, 2025. DOI: 10.3390/machines14030048

[20] M. Mashud, M. Hasan, and M. Alam, "Adaptive control of rehabilitation exoskeletons: An overview," *Actuators*, vol. 14, no. 3, p. 108, 2025. DOI: 10.3390/act14030108

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Cifrado de imágenes con análisis de fluctuaciones sin tendencia

Image encryption with non-trend fluctuation analysis

E. Jiménez-López[1] *
(*ejimenezl@uaemex.mx)

Recibido: 25 de febrero de 2026 Aceptado: 18 de abril de 2026

Resumen

En este trabajo, se realizó una extensión del método de Análisis de Fluctuación sin Tendencia que describe las propiedades de escala de imágenes con diferentes contrastes que presentan cualidades no lineales. En este documento, se establecieron las propiedades de escala en imágenes cifradas utilizando un método de análisis sin fluctuaciones sin tendencia bidimensional. Se realizó el cifrado de la imagen usando un sistema criptográfico que utiliza como principal insumo los autómatas celulares con la regla 182, contrastando los resultados con su versión original y el sistema estándar de cifrado avanzado. La conducta de las imágenes cifradas fue constante, similar al ruido 1/f, según indican los resultados numéricos.

Palabras clave: *Cifrado, Imagen, Análisis de Fluctuaciones sin Tendencia*

Abstract

In this work, an extension of the Detrended Fluctuation Analysis method is performed, which describes the scaling properties of images with different contrasts exhibiting non-linear qualities. In this paper, we establish the scaling properties in encrypted images using a two-dimensional detrended fluctuation analysis method. We perform image encryption using a cryptographic system that uses cellular automata with rule 182 as its main input. We contrast the results with their original version and the standard Advanced Encryption Standard system. The behavior of the encrypted images is constant, similar to 1/f noise, as indicated by the numerical results.

Keywords: *Encryption, Image, Non-Trend Fluctuation Analysis*

[1] Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (CIEAP).

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, existe una amplia variedad de métodos para analizar o identificar el comportamiento fractal o singular que puede aparecer en distintas formas de información [1]. El análisis de fluctuación sin tendencia ($AFsT$), tiene el objetivo de extraer características significativas de señales de alta dimensión, como las imágenes [2]. El cifrado de imágenes digitales es un tema importante, ya que existen muchas aplicaciones que requieren proteger diferentes tipos de información [3].

Existen numerosos métodos de cifrado de imágenes, es crucial que se pueda determinar algún tipo de calidad del contenido de la imagen encriptada. Este trabajo, tiene como objetivo final proponer y validar el exponente de escala (α) derivado del Análisis de Fluctuación sin Tendencia ($AFsT$) bidimensional como una métrica objetiva y complementaria para evaluar la calidad y la confidencialidad de los sistemas de cifrado de imágenes. Si bien el $AFsT$ bidimensional es una técnica establecida para el análisis de texturas y propiedades fractales en imágenes, su aplicación sistemática y la interpretación de sus resultados como indicador de la efectividad del cifrado constituyen la principal novedad de esta investigación.

Específicamente, se adaptó y aplicó el $AFsT$ bidimensional para caracterizar las propiedades de escalado en imágenes cifradas, demostrando cómo este exponente puede revelar la conducta única de las imágenes tras el proceso de cifrado. Se contrastó esta metodología con algoritmos de cifrado existentes, como el sistema basado en autómatas celulares (regla 182) y el Estándar de Cifrado Avanzado, para evaluar su robustez y calidad.

Estos métodos, para detectar correlaciones de largo alcance y propiedades multifractales, son herramientas muy útiles en el campo del análisis de imágenes, ya que se han aplicado para investigar características en algunas imágenes médicas [4, 5], para extraer características de textura [6, 7], para identificar regiones donde se observen afectaciones en los cultivos [8, 9]. El rendimiento de los métodos basados en técnicas fractales o multifractales es superior a otros métodos, debido a las características isotrópicas que presentan una gran cantidad de imágenes naturales y artificiales [10].

El cifrado de imágenes digitales es un tema importante, ya que existen muchas aplicaciones que requieren proteger diferentes tipos de información, como los sistemas de comunicación militares, imágenes médicas, de vigilancia, entre otros [11]. Existen numerosos métodos de cifrado de imágenes, es crucial que se pueda determinar algún tipo de calidad del contenido de la imagen cifrada. En este sentido, se consideró aplicar a las imágenes cifradas un algoritmo basado en $AFsT$ bidimensional, después del cifrado los píxeles de la imagen tienden a tener características isotrópicas o un comportamiento aleatorio. El exponente de Hurst fue considerado como un indicador efectivo para los sistemas de cifrado, se detectó la presencia de un mensaje en un portador caótico con una señal incrustada [12]. Para lograr la seguridad multimedia, algunos autores sugieren utilizar el cifrado selectivo [13]. Empleando

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

diferentes herramientas, se aporta que el cifrado de cuatro bit-planos es suficiente para proporcionar una alta confidencialidad [14].

La organización de este trabajo es la siguiente. El sistema de cifrado que se basa en un enfoque matricial se expone en la Sección 2. La Sección 3 expone el método de análisis de fluctuaciones sin tendencia bidimensionales. La Sección 4 muestra los resultados que se lograron al utilizar este mismo método sobre las imágenes cifradas. Además, se analizaron las imágenes cuando se considera solo un cifrado parcial. Por último, las conclusiones se presentan en la Sección 5.

Modelo del Sistema de Cifrado

Se utilizó un criptosistema que comprende los conjuntos M, C y X son términos binarios de longitud N, Z_2^N, en el que $Z_2 = \{0, 1\}$ y dos familias indexadas fijas de permutaciones, $\Psi = \{\psi_x : x \in X\}$ y $\Phi = \{\phi_x : x \in X\}$. Las palabras M y C se denominan textos planos y textos cifrados, mientras que los términos en el conjunto de índices X son claves de cifrado. Además, las funciones $\psi_x : M \to C$ y $\phi_x : C \to M$ se denominan funciones de cifrado y descifrado. El criptosistema convierte una serie de texto plano m en una secuencia de texto cifrado c, para cada $x \in X$ uno tiene $c = \psi_x(m)$, para revelar la secuencia de bloques cifrados, se utiliza funciones de descifrado ϕ_x, es decir, $m = \phi_x(\psi_x(m))$.

El flujo de cifrado completo es confidencial y la misma clave se emplea para cifrar y descifrar. El criptosistema se basa en el esquema de sincronización de Autómatas Celulares (AC), donde se desenvuelve con la regla 182, ha sido utilizada para crear los dos modelos de permutaciones y el generador de números pseudoaleatorios asintóticamente adecuado [15]. El fenómeno de sincronización en el acoplamiento de sistemas de AC se describe en detalle en las siguientes referencias [16, 17]. Se descubrió que dos AC acoplados se sincronizan si hay un bloque de $(2n - 1)$ sitios desacoplados entre cada par de coordenadas sucesivas, donde n es un entero positivo mayor que 1. Este método de cifrado, el cual se fundamenta en la sincronización de AC, recibe el nombre en español de $ESAC$.

Con el fin de tener una forma inteligible del texto plano m se divide en bloques, $m = \{m_1, m_2, \ldots\}$. Cada uno de estos bloques m_k, tiene una longitud de N bits. El subíndice k simplemente indexa estos bloques secuencialmente, aplicamos la Ec. (1).

$$\begin{pmatrix} \widehat{m}_k \\ y_{k+1} \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} m_k \\ y_k \end{pmatrix} \text{ mód } 2, \quad \text{con} \quad U = \begin{pmatrix} J_N \\ b \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, \ldots \tag{1}$$

En muchos sistemas de criptografía o procesamiento de señales, existe un “estado” interno que se actualiza en cada paso. Aquí, y_k parece ser un vector que representa el estado del sistema en el momento en que se procesa el bloque m_k. El bloque de texto plano m_k se utiliza para calcular el siguiente estado y_{k+1} y el bloque cifrado $\widehat{m}_k$. J_N representa una matriz $N \times (2N + 1)$; el subíndice N en J_N se refiere

a la dimensión principal de esta matriz, que está relacionada con la longitud de los bloques de texto plano (N bits). Inicialmente a partir de dos vectores de $(2N+1)$ elementos, $f = [f_1, 0, \ldots, f_{N+2}, \ldots, 0]$ y $g = [0, g_2, 0, \ldots, g_{N+1}, 0, g_{N+3}, \ldots, 0]$, donde los componentes $f_1, f_{N+2}, g_2, g_{N+1}$ y g_{N+3} tienen un valor de 1. Estas son las dos primeras filas de la matriz J_N, las otras $(N-2)$ filas se generan aplicando una operación de adición módulo 2 de las dos filas precedentes, con condiciones de contorno fijas de cero al lado izquierdo seguido por los componentes de la fila anterior movidos hacia la derecha una posición.

La matriz U se define como una concatenación de J_N y b. El texto indica que U es una matriz $N \times (2N+1)$. Dada la estructura de la ecuación principal, donde U opera sobre un vector de la forma $\begin{pmatrix} m_k \\ y_k \end{pmatrix}$, es probable que b sea un vector o una matriz que, junto con J_N, complete las dimensiones necesarias para la multiplicación matricial. El vector fila b tiene $(2N+1)$ elementos con un valor de 1 en su primera entrada y 0 en caso contrario, $b = [1, 0, \ldots, 0]$. Lo principal para calcular la secuencia $\widehat{m}_1$ de N bits, requerimos el producto de la matriz cuadrada U con un vector columna que concatena la secuencia de texto plano $m_1 = \{m_1, m_2, m_3, \ldots, m_N\}$ y una secuencia binaria aleatoria $y_1 = \{y_1, y_2, y_3, \ldots, y_{N+1}\}$ de $(N+1)$ bits. Si U opera sobre $\begin{pmatrix} m_k \\ y_k \end{pmatrix}$, tiene una dimensión de $(N + \dim(y_k))$, entonces la dimensión de la columna de U debe coincidir.

Para calcular $\widehat{m}_2$ por medio de la Ec. (1), se requiere nuevamente dos secuencias, una secuencia de texto sin formato que puede ser alterada m_2, una secuencia binaria aleatoria y_2. La última secuencia comprende la secuencia m_1, que se convierte en los bits iniciales de la nueva y_2 y el primer bit de la y_1 anterior, que se convierte en el último bit de esta secuencia. Para las siguientes secuencias, el mismo procedimiento se itera repetidamente. Nótese que la matriz superior J_N hace inexplícito el texto plano, mientras que la matriz inferior $[J_N\ ;\ b]$ ayuda a calcular una nueva secuencia pseudoaleatoria binaria y_k, para $k \geq 2$.

Para continuar con el proceso de cifrado, se requieren dos matrices, P_N y Q_N, como se muestra en la Ec. (2) tales que

$$c_k = \Psi_k(m_k) = \left[(\widehat{P} \times x) + (\widehat{Q} \times \widehat{m}_k)\right] mod 2, \quad k \geq 1, \tag{2}$$

Similar a m_k, el subíndice k indica que c_k es el resultado del cifrado aplicado al bloque m_k (o a alguna transformación de este) en la iteración k. El uso de Ψ_k sugiere que la operación de cifrado podría ser dinámica o parametrizada por k, lo que implica que las matrices o parámetros utilizados en la función podrían cambiar en cada paso. Este es el bloque de entrada original que se está cifrando en la iteración k, ya se definió en la explicación anterior como parte de la secuencia $m = \{m_1, m_2, \ldots\}$. La suma dentro

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

del módulo 2 es el resultado del cifrado de la iteración anterior, o una versión transformada del bloque de texto plano original. Indica que el proceso de cifrado descrito por esta ecuación comienza en la primera iteración $(k = 1)$ y continúa para todas las iteraciones subsiguientes.

La dimensión L de los vectores c_k y $\widehat{m}_k$ está determinada por 2^l. El subíndice l toma valores enteros positivos, lo que significa que L puede tomar valores como $2^1 = 2$, $2^2 = 4$, $2^3 = 8$, etc. Esto implica que la longitud de los bloques cifrados y de entrada puede variar según el valor de l. La dimensión N de los vectores c_k y $\widehat{m}_k$ (y también de la matriz $\widehat{P}$) se define como $2n - 1$. El subíndice n toma valores enteros positivos, lo que significa que N puede tomar valores como $2^1 - 1 = 1$, $2^2 - 1 = 3$, $2^3 - 1 = 7$, etc. Es importante notar la condición $n > l$, lo que significa que la dimensión N está relacionada, pero es mayor que la dimensión L. La matriz $\widehat{P}$ se construye a partir de un vector $p = [p_1, p_1, \ldots, p_N]$. Este vector p tiene elementos que son 1 en posiciones específicas j y 0 en otros casos. La fórmula $j = (2^n + 1) - 2^{i+1}$ define estas posiciones 1 para $i = 0, 1, 2, \ldots, (n - 1)$. El subíndice j aquí denota la posición dentro del vector p. El rango de i (de 0 a $n - 1$) indica cuántos elementos 1 se colocarán en el vector p, y la fórmula para j determina sus ubicaciones exactas.

Las $(L - 1)$ filas se crean mediante el desplazamiento de una posición de la fila anterior hacia la derecha, comenzando con un cero. Q es una matriz triangular inferior de orden L, que puede generarse en primer lugar, desde el vector $a = [a_1,\ 0,\ \ldots,\ 0]$, donde el componente a_1 tiene un valor de 1. La primera fila de la matriz está constituida por el vector más reciente Q, las $(L - 1)$ filas se generan aplicando la regla de AC 182 de la fila anterior con condiciones de borde fijas de cero en la parte izquierda y a la derecha. Dado que el proceso de descifrado es similar al procedimiento de cifrado se puede observar el diagrama de bloques en la Figura 1.

La Figura 1 muestra el Diagrama de Flujo del Proceso del modelo de cifrado; la imagen proporciona la entrada. El mensaje original m se procesa junto con la llave z a través de la función $H_{N_t}(z,\ m)$, generando una salida intermedia. Paralelamente, se generan claves o estados U_K y U_{k+1} utilizando las funciones $H_{N_t}(x)/H_{N_b}(y)$, que dependen de las variables intermedias x e y.

En el Cifrado (E): las señales intermedias x (proveniente de la generación de claves) y $\widehat{m}$ (que es una versión inicial o modificada del mensaje original) se combinan mediante operaciones matriciales: $(\widehat{P} \times x) + (\widehat{Q} \times \widehat{m})$. La salida de esta operación es el mensaje cifrado $\widehat{c}$. Al transmitir el mensaje cifrado se envía a través del "Canal de Comunicación". Este canal puede alterar los datos.

Para el descifrado (D): el bloque recibe el mensaje cifrado $\widehat{c}$ (posiblemente alterado por el canal de comunicación) y la señal x (generada de manera similar al cifrado). Se aplican operaciones inversas a las de cifrado: $(\widehat{R} \times x) + (\widehat{T} \times \widehat{c})$. La salida de este bloque es el mensaje recuperado $\widehat{m}$.

La Salida Final que es el mensaje recuperado $\widehat{m}$ se procesa junto con la nueva llave z a través de la

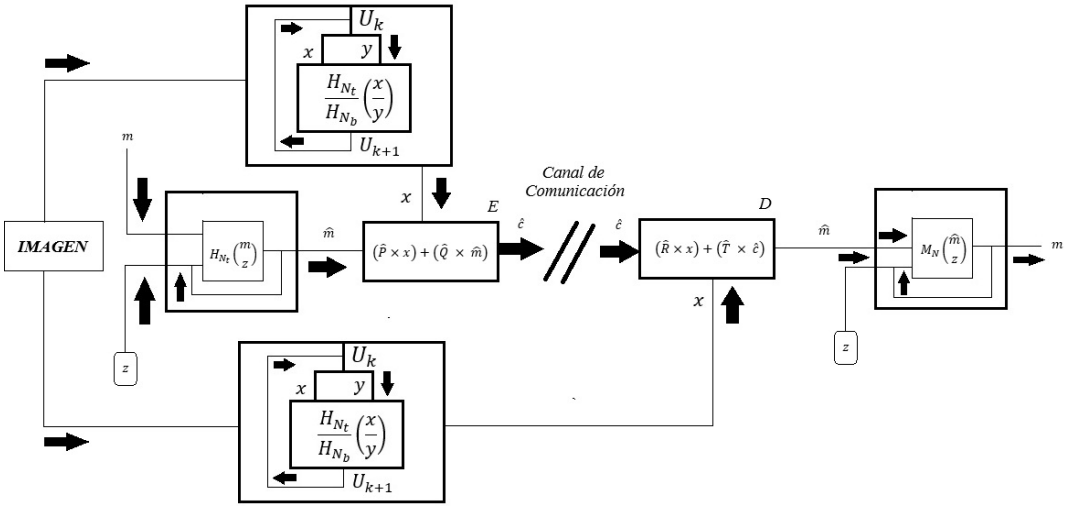


FIGURA 1. *Diagrama de Flujo del modelo de cifrado con sus componentes principales: las familias de permutaciones Ψ que están indexadas y el generador pseudoaleatorio de claves Φ. Fuente: Elaboración propia.*

función $M_N(\widehat{m},\ z)$. La salida final de este proceso es el mensaje original m. Para cada valor de píxel se convierte a su valor correspondiente de 8 bits, $[b_8 \cdots b_1]$, donde el bit más significativo es b_8 y el menos significativo es b_1.

Para finalizar esta explicación, el diagrama de flujo describe un esquema de cifrado y descifrado que utiliza funciones de hash, permutaciones y generación de llaves para asegurar la comunicación. El proceso de cifrado transforma el mensaje original usando llaves y operaciones matemáticas, el descifrado realiza las operaciones inversas para recuperar el mensaje original, asumiendo que las llaves correctas y las funciones de transformación son conocidas.

MÉTODO

Se utilizaron nueve imágenes en escala de grises. Tres de ellas tienen dimensiones de 1024 x 1024 píxeles y las demás de 512 x 512 píxeles. La Figura 2 presenta estas imágenes. Se eligieron porque son muy utilizadas como imágenes de referencia estándar en el campo del tratamiento de imágenes. Este estudio empleó Matlab (MathWorks, Natick, MA) como plataforma computacional para el análisis y modelado de datos. Todas las simulaciones y cálculos numéricos fueron implementados en este entorno, aprovechando sus capacidades para el procesamiento de señales y la resolución de ecuaciones complejas. La elección de Matlab se fundamentó en su amplia disponibilidad de herramientas especializadas y su validada precisión en la ejecución de algoritmos matemáticos. Los resultados obtenidos se basan íntegramente en las rutinas y funciones proporcionadas por este software. La reproducibilidad de los hallazgos está garantizada mediante la documentación detallada del código utilizado.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76



FIGURA 2. *Matriz de imágenes que se utilizan en este trabajo. Fuente: Elaboración propia.*

Análisis de fluctuación sin tendencia unidimensional

El $AFsT$ es un método para analizar la autosimilitud de una señal. Se utiliza para examinar datos, como intervalos de latidos en el corazón, tendencias del mercado bursátil o actividad sísmica, ofreciendo una visión profunda de la dinámica intrínseca del sistema. El $AFsT$ se utiliza en el análisis de series temporales, especialmente en aquellas que parecen no estacionarias, permitiendo detectar correlaciones de largo alcance al eliminar tendencias que no están relacionadas con las propiedades de correlación de la señal.

El $AFsT$ funciona de la siguiente manera:

1. Sea $\{X_t\}$ la serie temporal de longitud N. El primer paso es determinar la serie integrada Y, donde $Y(i)$ se define como la suma acumulada de las desviaciones de cada punto de la serie temporal respecto a su valor medio $\langle X\rangle$. La Ec. (3) para la serie integrada $Y(i)$ es:

$$Y(i) = \sum_{t=1}^{i} (X_t - \langle X\rangle), \tag{3}$$

   donde $\langle X\rangle$ es el valor medio de la serie temporal $\{X_t\}$.

2. La serie integrada Y se divide en M_s segmentos no superpuestos de igual longitud s, donde $M_s = \lfloor N/s \rfloor$. Dado que N no siempre es un múltiplo entero de s, una práctica común es repetir el mismo procedimiento en la serie temporal invertida, lo que resulta en $2M_s$ segmentos.

3. Para cada segmento ν ($\nu = 1, 2, \ldots, 2M_s$), se calcula la tendencia local $\widehat{Y}_v$ mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Esto implica encontrar un polinomio P_v de orden n que mejor se ajuste a los datos de la Ec. (4).

$$\widehat{Y}_v(i) \equiv P_v(i). \tag{4}$$

   Se utilizó un ajuste de mínimos cuadrados de orden lineal ($n = 1$) para eliminar la tendencia local en cada segmento.

4. La varianza $F^2(\nu, s)$ para cada segmento ν se estima como la media de los cuadrados de las diferencias entre la serie integrada Y y la tendencia local $\widehat{Y}_v$. La fórmula para esta estimación se presenta en la Ec. (5):

$$F^2(\nu, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^{s} \left\{ Y[(\nu - 1)s + i] - \widehat{Y}_v(i) \right\}^2. \tag{5}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

La Ec. (5) calcula la varianza promediando las diferencias al cuadrado entre los valores de la serie integrada y la tendencia estimada, dentro de un segmento específico. Para los segmentos invertidos, los índices se ajustan en consecuencia para mantener la coherencia del cálculo.

5. La función de fluctuación promedio $F(s)$ se logra al determinar la raíz cuadrada de la media de las varianzas en cada uno de los segmentos $2M_s$, como se muestra en la Ec. (6).

$$F(s) = \left\{ \frac{1}{2M_s} \sum_{v=1}^{2M_s} F^2(\nu, s) \right\}^{1/2} \tag{6}$$

6. Finalmente mostramos el escalamiento; se examina la relación entre $F(s)$ y el tamaño del segmento s. Se espera que $F(s)$ siga una ley de potencia como la mostrada en la Ec. (7).

$$F(s) \sim s^{\alpha}. \tag{7}$$

El exponente de escalamiento α indica el tipo de correlaciones presentes en la serie temporal:

a. $\alpha = 0{,}5$: Indica una serie temporal no correlacionada, como el ruido blanco.

b. $\alpha > 0{,}5$: Indica correlaciones de largo alcance. Cuanto mayor sea α, más fuerte será la correlación.

c. $\alpha < 0{,}5$: Indica correlaciones anti-persistentes.

d. Si al ruido $1/f$ le corresponde $\alpha = 1$ y al movimiento browniano le corresponde $\alpha = 1{,}5$.

El exponente de escalamiento α se estima mediante un ajuste de regresión lineal por mínimos cuadrados sobre la relación logarítmica entre la función de fluctuación $F(s)$ y el tamaño del segmento s (es decir, graficando $\log(F(s))$ vs $\log(s)$). La pendiente de la línea de ajuste óptimo corresponde al valor de α.

Análisis de fluctuación de eliminación de tendencia bidimensional

La imagen I con dimensiones $U \times V$ será tratada como una superficie y será descrita mediante una matriz $X(i,\ j)$, en el que se indica el número de filas y columnas con $i = 1, 2, \ldots, U$ y $j = 1, 2, \ldots, V$. Con el propósito de distinguir la tendencia de las oscilaciones en las imágenes, se utilizó un algoritmo bidimensional que se construyó con los siguientes pasos [17].

1. Divide la superficie $X(i,\ j)$ en ventanas cuadradas que no se superponen $U_s \times V_s$ en tamaño $s \times s$, donde $U_s = \lfloor U/s \rfloor$ y $V_s = \lfloor V/s \rfloor$. Cada ventana puede ser representada por $X_{u,v}$, tal que $X_{u,v}(i,j) = X(i + l_1,\ j + l_2)$ para $1 \leq i, j \leq s$, donde $l_1 = (u-1)s$ y $l_2 = (v-1)s$.

2. Calcula la suma acumulada para cada ventana $X_{u,v}$, situada por u y v, como se muestra en la Ec. (8). Donde $(X_{u,v},\ (k_1, k_2))$ es la media de la subimagen $X_{u,v}$, con $1 \leq i, j \leq s$.

$$P_{u,v}(i,\ j) = \sum_{k_1=1}^{i} \sum_{k_2=1}^{j} \left(X_{u,v}(k_1, k_2) - \langle X_{u,v}(k_1, k_2) \rangle\right) \tag{8}$$

3. Establezca la tendencia de la subimagen adquirida al ajustar el conjunto de datos a un plano $\widehat{P}_{u,v}(i,j) = ai + bj + c$, donde a, b y c son parámetros que se determinan con el método de mínimos cuadrados. Posteriormente, las varianzas locales relacionadas con cada subimagen se calculan $X_{u,v}$, como se muestra en la Ec. (9).

$$F^2(u,\ v,\ s) = \frac{1}{s^2} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} \left[P_{u,v}(i,\ j) - \widehat{P}_{u,v}(i,\ j)\right]^2. \tag{9}$$

4. Promediando sobre todas las subimágenes se obtiene la fluctuación general eliminada de la tendencia como se muestra en la Ec. (10).

$$F^2(s) = \left(\frac{1}{U_s V_s} \sum_{u=1}^{U_s} \sum_{v=1}^{V_s} F^2(u, v, s)^{1/2} \right). \tag{10}$$

Este algoritmo opera sobre una serie de longitudes de segmento, denotadas por s. La elección del rango para s es crucial para capturar las propiedades de escala deseadas. El rango especificado es $6 < s < \text{mín}(U,\ V)/4$, donde U y V son las dimensiones de la superficie pixelada. Al variar s, se investiga cómo las propiedades de la superficie cambian con la escala. El límite inferior de $s > 6$ se establece para evitar artefactos de baja escala y ruido local que podrían distorsionar el análisis de propiedades fractales. El límite superior, $s < \text{mín}(U, V)/4$, asegura que los segmentos analizados sean una fracción representativa de la imagen sin abarcar una porción excesivamente grande que viole las suposiciones de homogeneidad estadística en la escala considerada. Esta elección permite capturar las características de escala relevantes de la imagen.

La función de fluctuación $F_2(s)$ se emplea para cuantificar una propiedad de escala fractal en superficies bidimensionales (pixeladas). Una superficie exhibe escala fractal si sus propiedades estadísticas son invariantes ante cambios de escala. Esto significa que la apariencia o textura de la

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

superficie es similar independientemente de la escala a la que se observe. En superficies fractales, la dependencia de una medida estadística con la escala espacial suele seguir una ley de potencia. En la Ec. (7) el exponente de fluctuación de escala (α) es fundamental para caracterizar la rugosidad o irregularidad de la superficie a diferentes escalas. Un valor más alto de α generalmente indica una superficie más rugosa o irregular, con fluctuaciones más pronunciadas a medida que aumenta la escala.

El exponente de fluctuación de escala α se presenta como una extensión del exponente de Hurst (H), que es comúnmente utilizado para caracterizar la persistencia o memoria de procesos estocásticos (como señales o series temporales). El exponente de Hurst clásico satisface $0 < H < 1$. La relación entre α y H depende de si la señal (o superficie, en este contexto bidimensional) es estacionaria o no estacionaria.

Para señales bidimensionales (superficies pixeladas): si la superficie analizada es estacionaria (sus propiedades estadísticas no cambian con la posición), entonces el exponente de fluctuación de escala es directamente igual al exponente de Hurst. En este caso, la rugosidad de la superficie a diferentes escalas se comporta de manera similar a la persistencia de una señal unidimensional estacionaria. Si la superficie analizada es no estacionaria, la relación cambia ($\alpha = H + 2$). La adición de 2 al exponente de Hurst en el caso no estacionario se relaciona con las dimensiones adicionales (la dimensión espacial $2D$) que influyen en la fluctuación. En esencia, la no estacionariedad introduce una dependencia de escala adicional que se refleja en el valor de α.

El valor de α (por lo tanto de H, bajo ciertas condiciones) proporciona información sobre la naturaleza de la irregularidad de la superficie. Por ejemplo, un α cercano a 0 podría indicar una superficie relativamente lisa, mientras que un α mayor podría sugerir una superficie más rugosa o compleja. La distinción entre estacionario y no estacionario es crucial para interpretar correctamente el significado físico de α. En el contexto del análisis de imágenes, la estacionariedad de una imagen se refiere a si sus propiedades estadísticas (como la distribución de intensidades o la estructura de texturas) son uniformes en toda la imagen. Muchas imágenes del mundo real no son estrictamente estacionarias.

La aplicabilidad de estas relaciones depende de que la superficie o señal analizada realmente exhiba un comportamiento fractal y que las condiciones de estacionariedad (o no estacionariedad) se cumplan. El modelo propuesto utiliza la función de fluctuación $F_2(s)$ para cuantificar la escala fractal de superficies pixeladas mediante el exponente α. Este exponente se relaciona con el exponente de Hurst H de una manera que depende críticamente de la estacionariedad de la superficie, ofreciendo así una métrica para caracterizar su rugosidad y complejidad a través de diferentes escalas [18].

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos utilizando el $AFsT$ bidimensional descrito anteriormente. En el análisis, se consideraron todas las nueve imágenes estándar en escala de grises de diferentes formas y

tres procedimientos de cifrado diferentes. Los esquemas del Cifrado por Sincronización de Autómatas Celulares ($CSAC$) es un algoritmo de cifrado simétrico diseñado para dispositivos con restricciones de energía. Se agrega el Estándar de Cifrado Avanzado (ECA), utilizando el modo de operación $CSAC_{v_1}$, $CSAC_{v_2}$ y ECA, respectivamente. Los resultados del desempeño del $AFsT$ bidimensional se observan en la Figura 3, donde se muestra una imagen simple del jugador de futbol en tonos de gris y sus variantes cifradas. Se nota que la función de fluctuación $F_2(s)$ para los tres procedimientos de cifrado en conjunto, muestra un comportamiento y un valor parecidos. Los exponentes de escala de fluctuación α para los conjuntos de datos de imágenes considerados en este artículo se dan en la Tabla 1. Se puede deducir que las imágenes cifradas tienen un comportamiento persistente, que se encuentra cerca del ruido $1/f$, ya que la mayor parte de los exponentes α en las versiones cifradas están próximos a la unidad. Dado que se ve la dimensión fractal como una medida objetiva para calcular la calidad del contenido de la imagen cifrada [19], se puede tomar este último resultado como otra métrica objetiva.

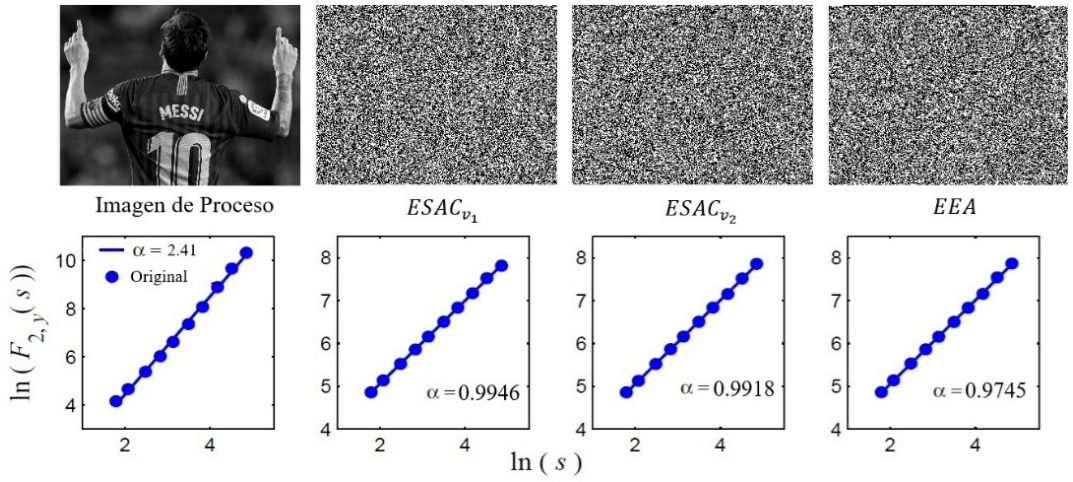


FIGURA 3. *En primera columna están las imágenes de prueba y las versiones de cifrado. En la Segunda columna están los respectivos exponentes de escala-fluctuación proporcionados por la función de fluctuación F_2. Fuente: Elaboración propia.*

Siguiendo las ideas de la referencia [20] para profundizar en la sensibilidad a los píxeles cifrados, se realizó un cifrado parcial de las imágenes, con cuatro bits por cada píxel, y se aplicó el $AFsT$ bidimensional en la imagen cifrada obtenida. En el análisis de cifrado parcial, se consideraron los 4 bits menos significativos (b_1 a b_4) de cada píxel. Se aplicó el cifrado a estos bits y se evaluó la influencia de modificar progresivamente estos bloques de bits en la estimación del exponente α. Los resultados de esta técnica de escalado para las imágenes simples de un jugador de futbol cifradas se presentan en las Figuras 4 a la 6, el resto de los exponentes de escalado de fluctuación α para los conjuntos de datos de imágenes considerados se dan en la Figura 7 que tiene la forma de tablas.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

Tabla 1. *Índices de los exponentes de escala α, que se lograron al emplear el algoritmo en dos dimensiones de $AFsT$ en las 9 imágenes de prueba y en sus respectivas versiones cifradas. Fuente: Elaboración propia.*

Imagen	$CSAC_{v_1}$	$CSAC_{v_2}$	ECA
Futbolista	0.9946	0.9918	0.9745
Lena	0.9725	0.9705	0.9785
Fotógrafo	0.9954	0.9783	0.9808
Mandril	0.9841	0.9623	0.9787
Circuito	0.9555	0.9701	0.9884
Arroz	0.9772	0.9486	0.9798
Monedas	1.0005	0.9599	0.9723
Medica	0.9953	0.9760	0.9714
Flor	0.9884	0.9830	0.9610

Se realiza un ejemplo claro y aterrizado del modelo propuesto usando $n = 3$ y $n = 4$, enfocándonos en la parte clave: cómo se construye la matriz y cómo se cifra un bloque.

Para $n = 3$, supongamos que tenemos un bloque plano Ec. (11).

$$x = (1, 0, 1) \tag{11}$$

Se construye una matriz tipo triangular con desplazamientos a la derecha y se introducen 0, mostrada en la Ec. (12).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{12}$$

Es un caso muy simple, pero ayuda a entender el modelo. Ahora se tiene el vector de la forma mostrada en la Ec. (13).

$$r = (0, 1, 1) \tag{13}$$

Se concatenaron los vectores x y r, como lo muestra la Ec. (14).

$$(x, r) = (1, 0, 1, 0, 1, 1) \tag{14}$$

Se aplicó el siguiente procedimiento, Ec. (15), Ec. (16) y Ec. (17):

$$y = A \bullet x \otimes r \tag{15}$$

$$A \bullet x = (1, 0, 1) \tag{16}$$

$$y = (1, 0, 1) \otimes (0, 1, 1) = (1, 1, 0) \tag{17}$$

La Ec. (17) muestra el resultado del cifrado.

Ahora, para $n = 4$ el texto plano se muestra en la Ec. (18).

$$x = (1, 0, 1, 1) \tag{18}$$

La construcción de la matriz para este ejemplo se muestra en la Ec. (19).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{19}$$

La secuencia aleatoria que se genera en el vector es de la forma como en la Ec. (20).

$$r = (1, 1, 0, 1) \tag{20}$$

Para realizar el cifrado se realizaron las operaciones de las ecuaciones Ec. (21), Ec. (22) y Ec. (23).

$$A \bullet x = (1, 0, 1, 1) \tag{21}$$

$$y = (1, 1, 0, 1) \otimes (1, 1, 0, 1) \tag{22}$$

$$y = (0, 1, 1, 0) \tag{23}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

Donde y es la secuencia cifrada que depende de la estructura matricial y de la secuencia pseudoaleatoria. La operación XOR introduce aleatoriedad. Se debe aclarar que en el modelo la matriz NO es identidad, se genera con autómatas celulares (regla 182) y dinámica iterativa.

Para los sistemas de cifrado $CSAC_{v_1}$ y ECA, los exponentes de escalado de la imagen cifrada se aproximan a los valores de los exponentes de escalado de las imágenes simples a medida que se obtienen los cuatro bits más significativos, mientras que para el sistema de cifrado $CSAC_{v_2}$ los exponentes de escalado permanecen sin un cambio importante. De alguna forma, algo de información es visible cuando se cifran los tres últimos bloques de los bits menos significativos, es decir, desde el bloque de cuatro bits $b_6, \ldots, b_3$ hasta el bloque $b_4, \ldots, b_1$. Estos hallazgos muestran que, en el caso del cifrado parcial, el sistema de cifrado $CSAC_{v_2}$ tiene el potencial de ofrecer un alto nivel de confidencialidad. Asimismo, dado que solo se tiene un medio de cifrado de los datos, también se mejoró el tiempo de ejecución.

Los resultados clave del análisis de las imágenes cifradas con los sistemas $CSAC_{v_1}$, $CSAC_{v_2}$ y ECA tienden a tener exponentes de escala α cercanos a 1, lo que indica un comportamiento persistente similar al ruido 1/f. En el análisis de cifrado parcial (modificando bits), $CSAC_{v_2}$ muestra una mayor estabilidad en su exponente de escala α, sugiriendo un alto nivel de confidencialidad. Los exponentes de escala para $CSAC_{v_1}$ y ECA se aproximan a los de las imágenes originales a medida que se recuperan más bits, Figura 4.

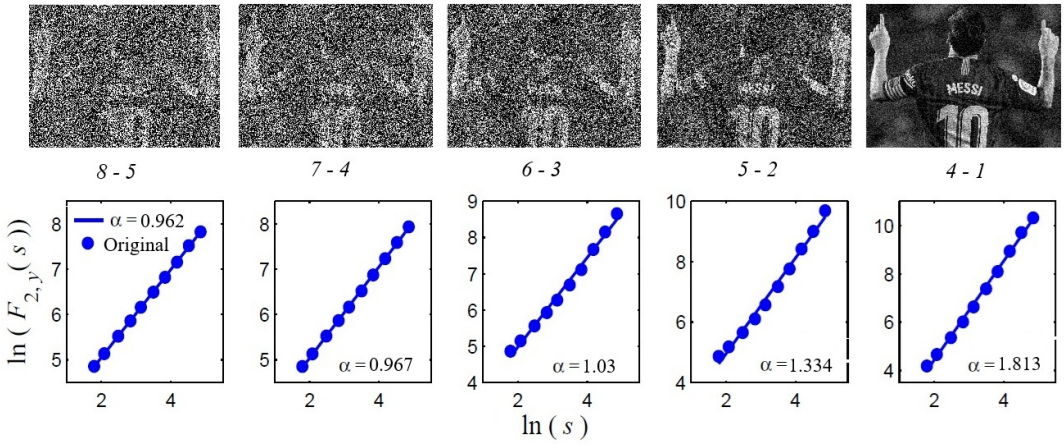


FIGURA 4. *En la primera columna, están las imágenes cifradas de la figura del futbolista que se realiza con el sistema $CSAC_{v_1}$, donde solo se cifran los bits indicados y la otra parte no se cambia. En la segunda columna, sus respectivos exponentes de escala-fluctuación son suministrados por la función de fluctuación F_2. Fuente: Elaboración propia.*

El sistema basado en autómatas celulares (regla 182) no se implementa bajo un modo de operación clásico como ECB, CBC o CTR, ya que su estructura es inherentemente dinámica y dependiente del

estado interno. Específicamente, el cifrado se construye a partir de la evolución iterativa de un autómata celular sincronizado, donde cada bloque cifrado depende no solo del bloque de entrada, sino también de una secuencia pseudoaleatoria generada recursivamente y del estado previo del sistema.

Esta característica introduce una dependencia temporal entre bloques, análoga en cierto sentido a modos encadenados como CBC o CTR, pero sin corresponder exactamente a ninguno de ellos en su formulación estándar. Por lo tanto, el esquema propuesto puede interpretarse como un modo de operación propio basado en estado, en el cual la seguridad emerge de la combinación entre la dinámica del autómata celular y la retroalimentación interna del sistema.

Para el caso del Estándar de Cifrado Avanzado (AES), se emplearon modos de operación convencionales (especificar aquí el modo exacto utilizado, por ejemplo CBC o CTR), con el fin de establecer una comparación consistente. La distinción entre estos enfoques es relevante, ya que el comportamiento estadístico de las imágenes cifradas y en particular, los exponentes de escala obtenidos mediante $AFsT$ depende directamente del grado de dependencia entre bloques introducido por el modo de operación, Figura 5.

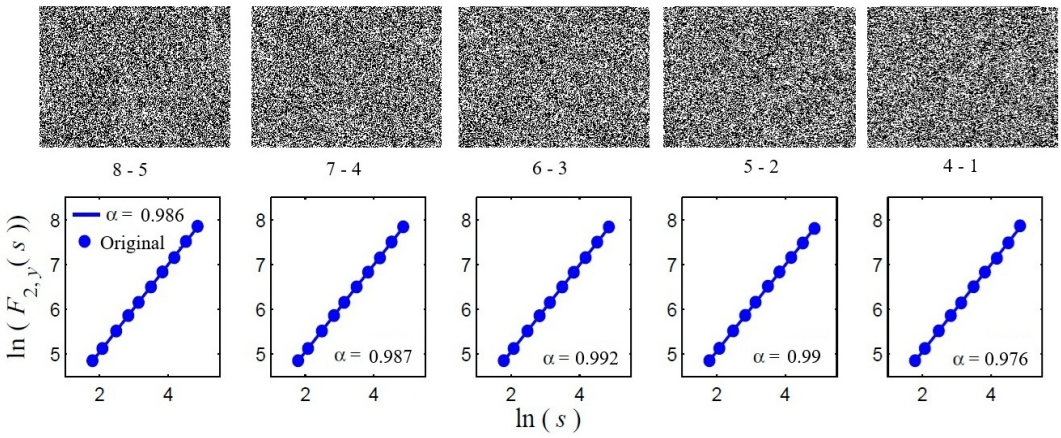


FIGURA 5. *Mismos comentarios de leyenda que en la figura anterior, pero el procedimiento de cifrado se lleva a cabo mediante el sistema $CSAC_{v_2}$. Fuente: Elaboración propia.*

Se incorporan medidas de ajuste y robustez estadística en la estimación del exponente de escala α, obtenido a partir de la regresión lineal en el espacio log-log de la función de fluctuación $F(s)$ en función de la escala s. En particular, para cada imagen (original y cifrada) se procedió a estimar α mediante regresión lineal por mínimos cuadrados sobre la relación mostrada en la Ec. (24).

$$\log F(s) \sim \alpha \log s \tag{24}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

Se reporta el coeficiente de determinación R^2 como medida de la calidad del ajuste lineal, observándose valores cercanos a 1 en la mayoría de los casos, lo que confirma la presencia de una ley de potencia bien definida. Se calcula el error estándar de la pendiente, a partir del cual se construyeron intervalos de confianza al 95 % para α, proporcionando así una medida de la incertidumbre en su estimación.

Los resultados muestran que los valores de R^2 se mantienen consistentemente altos (típicamente $R^2 > 0{,}98$), lo que valida la hipótesis de escalamiento. Los intervalos de confianza para α son estrechos, indicando alta estabilidad y precisión en la estimación. No se observan diferencias significativas en la dispersión de los errores entre imágenes originales y cifradas, lo que respalda la robustez del modelo propuesto. Al agregar estos indicadores permite evaluar de manera más rigurosa la calidad del ajuste y fortalece la validez de los resultados presentados, confirmando que el exponente α es una métrica confiable para caracterizar las propiedades de escala en imágenes cifradas, Figura 6.

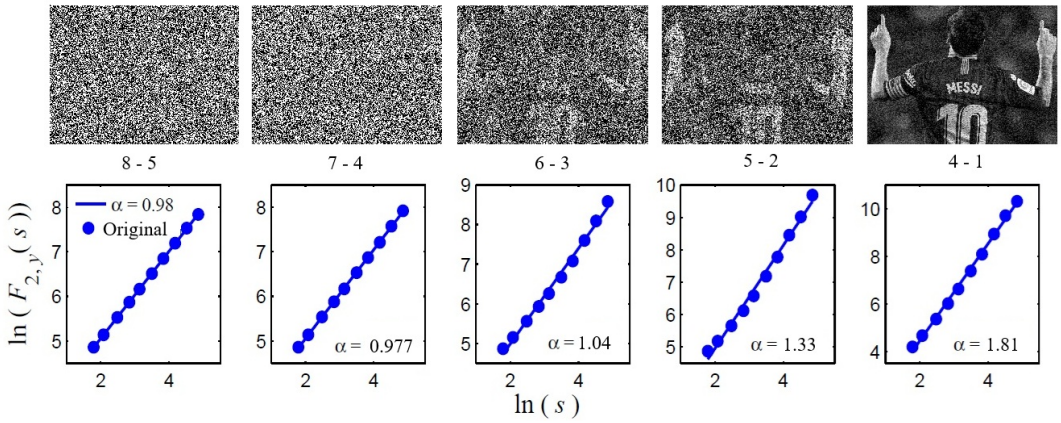


FIGURA 6. *Mismos comentarios de leyenda que en la figura anterior, pero el procedimiento de cifrado se lleva a cabo mediante el sistema ECA. Fuente: Elaboración propia.*

En este trabajo se incorpora una comparación sistemática entre el exponente de escala α obtenido mediante $AFsT$ bidimensional y métricas clásicas empleadas en la evaluación de cifrado de imágenes, tales como entropía de Shannon, correlación entre píxeles adyacentes, NPCR (*Number of Pixel Change Rate*) y UACI (*Unified Average Changing Intensity*).

La entropía de las imágenes cifradas alcanza valores cercanos al máximo teórico (≈ 8 para imágenes en escala de grises), lo que indica una distribución casi uniforme de intensidades. La correlación entre píxeles adyacentes (horizontal, vertical y diagonal) se reduce significativamente hacia valores cercanos a cero tras el cifrado, evidenciando la eliminación de redundancias espaciales. Los indicadores NPCR y UACI presentan valores elevados (cercanos a los estándares reportados en la literatura), confirmando una alta sensibilidad a pequeñas perturbaciones en la imagen original.

Sin embargo, estas métricas describen principalmente propiedades locales o de primer orden (distribución de intensidades, dependencia entre vecinos o sensibilidad a cambios), mientras que el exponente de escala α captura propiedades globales de correlación a múltiples escalas, relacionadas con la estructura fractal y la persistencia espacial de la imagen.

Los resultados muestran que mientras que las métricas tradicionales confirman la aleatoriedad local del cifrado, el exponente α revela que las imágenes cifradas presentan un comportamiento cercano al ruido tipo $1/f$, lo que sugiere una estructura estadística global no trivial que no es detectable mediante entropía o correlación simple, Figura 7.

	$CSAC_{v_1}$					$CSAC_{v_2}$					ECA				
Imagen	$b_8 \ldots b_5$	$b_7 \ldots b_4$	$b_6 \ldots b_3$	$b_5 \ldots b_2$	$b_4 \ldots b_1$	$b_8 \ldots b_5$	$b_7 \ldots b_4$	$b_6 \ldots b_3$	$b_5 \ldots b_2$	$b_4 \ldots b_1$	$b_8 \ldots b_5$	$b_7 \ldots b_4$	$b_6 \ldots b_3$	$b_5 \ldots b_2$	$b_4 \ldots b_1$
Futbolista	0.9622	0.9672	1.0337	1.3347	1.813	0.9867	0.9878	0.9928	0.9908	0.9763	0.9828	0.9775	1.0422	1.334	1.8149
Lena	0.9973	1.0023	1.1066	1.3791	1.6508	0.9484	0.951	0.9504	0.9727	0.9582	0.9851	1.0006	1.1011	1.3767	1.6509
Fotógrafo	0.9842	0.9872	1.0497	1.2177	1.4755	0.9722	0.9738	0.9744	0.9768	0.9606	0.9924	1.0339	1.261	1.6134	1.8286
Mandril	0.9543	0.9609	1.0253	1.3036	1.7143	0.9796	0.9825	0.9869	0.9956	0.9881	0.9962	0.9774	1.0186	1.2051	1.6228
Circuito	0.9745	0.9754	1.0885	1.3379	1.5496	0.9606	0.9636	0.9594	0.9711	0.9701	0.9889	0.9932	1.0101	1.1601	1.3764
Arroz	1.001	0.9992	1.0127	1.0634	1.3365	0.9781	0.976	0.9751	0.9841	0.9777	0.9783	1.1135	1.4007	1.8006	2.2331
Monedas	0.9976	1.0514	1.2495	1.2938	1.6204	0.9768	0.976	0.9709	0.961	0.9744	0.9797	0.9992	1.2076	1.5908	2.0458
Medica	0.9702	1.1354	1.3487	1.7782	2.2537	0.9926	0.9926	0.9943	0.9779	0.9983	0.979	1.1253	1.3367	1.7752	2.2546
Flor	0.9711	0.9692	1.0134	1.3231	1.5495	0.9828	0.9815	0.984.3	0.9914	0.9834	0.9849	1.003	1.0315	1.3288	1.5499

FIGURA 7. *Valores de los exponentes de escala α que se consiguen después de la implementación del algoritmo en las 9 imágenes cifradas. Fuente: Elaboración propia.*

CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva sobre la caracterización de imágenes cifradas en escala de grises, empleando para ello un algoritmo $AFsT$ (Análisis de Fluctuación sin Tendencia) bidimensional. La motivación principal de este trabajo radica en la necesidad de desarrollar métricas objetivas y robustas para evaluar la efectividad de los algoritmos de cifrado de imágenes, un aspecto crucial en la seguridad de la información visual. Si bien la literatura científica ofrece una variedad de enfoques para el análisis de señales de alta dimensión, se ha demostrado que la aplicación del $AFsT$ bidimensional se presenta como una metodología particularmente adecuada y eficiente para la descripción de las propiedades intrínsecas de las imágenes cifradas.

El núcleo de esta contribución reside en la adaptación y aplicación del $AFsT$ bidimensional al

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

dominio de las imágenes cifradas. El $AFsT$, en su concepción original, es una técnica poderosa para analizar la naturaleza de las series temporales y otras señales unidimensionales, permitiendo cuantificar su grado de "rugosidad" o "memoria a largo plazo" a través de exponentes de escala α. La extensión de este análisis al dominio bidimensional ha sido un paso natural y necesario para abordar la complejidad inherente a las imágenes, que poseen dos dimensiones en el espacio.

Este enfoque se centró en la hipótesis de que las propiedades estadísticas de una imagen, incluso después de ser sometida a un proceso de cifrado, conservan cierta estructura que puede ser capturada por los exponentes de escala. Específicamente, se investigó cómo el algoritmo $AFsT$ bidimensional puede revelar la "conducta única" de las imágenes cifradas. Estas son las características distintivas que emergen como resultado del proceso de cifrado y que idealmente deberían ser independientes de las características originales de la imagen en texto plano.

El proceso implicó la aplicación del $AFsT$ bidimensional a diversas imágenes en escala de grises, tanto en su estado original como tras haber sido sometidas a diferentes algoritmos de cifrado. Se prestó especial atención a la selección de parámetros del algoritmo $AFsT$, asegurando que la extracción de los exponentes de escala fuera precisa y reproducible. Los resultados obtenidos demostraron de manera consistente que los exponentes de escala derivados del $AFsT$ bidimensional son sensibles a las transformaciones introducidas por el cifrado.

Una de las conclusiones más significativas de este trabajo es la recomendación de que el exponente de la escala de fluctuación α, tal como lo proporciona el $AFsT$ bidimensional, debe ser considerado como un indicador objetivo y adecuado para medir la calidad de los sistemas de cifrado de imágenes. Tradicionalmente, la evaluación de la calidad del cifrado se ha basado en métricas como la entropía, la correlación entre píxeles adyacentes o la sensibilidad a cambios pequeños (efecto avalancha). Sin embargo, estas métricas a menudo no capturan completamente la complejidad de las transformaciones aplicadas a la imagen. El exponente de escala, al cuantificar la naturaleza fractal o la dependencia a largo plazo de las fluctuaciones en la imagen cifrada, ofrece una perspectiva complementaria y muy informativa.

Un buen algoritmo de cifrado de imágenes, idealmente, debería transformar la imagen de tal manera que las características estadísticas originales sean completamente difusas, al tiempo que introduce una nueva estructura que sea difícil de revertir sin la llave correcta. Se sugiere que un algoritmo de cifrado de imágenes robusto, como se espera que sea $CSAC_{v_2}$, debería exhibir una propiedad deseable: mantener un exponente de escala relativamente constante o al menos predecible, a pesar de que se lleve a cabo un cifrado parcial. El cifrado parcial se refiere a escenarios donde solo una porción de la imagen es cifrada, o donde el proceso de cifrado se aplica de manera iterativa o segmentada. La capacidad de un

algoritmo para preservar una característica estadística global como el exponente de escala, incluso bajo tales condiciones, es un testimonio de su solidez y de su capacidad para generar una distribución de píxeles altamente aleatoria pero estructurada de una manera específica del cifrado.

En el caso de $CSAC_{v_2}$, el exponente de escala tiende a permanecer estable incluso cuando se aplican modificaciones o cifrados parciales. Esto indica que el algoritmo no solo oculta la información original de manera efectiva, sino que también genera una nueva estructura estadística que es intrínsecamente resistente a la manipulación o al descifrado parcial. Esta propiedad es particularmente valiosa en aplicaciones donde la seguridad debe ser mantenida incluso ante ataques que intentan explotar las dependencias estadísticas residuales.

Si bien los resultados obtenidos son prometedores, el campo de aplicación del $AFsT$ bidimensional al análisis de imágenes cifradas presenta numerosos caminos para la investigación futura. Será de gran interés expandir este estudio para incluir una gama más amplia de algoritmos de cifrado de imágenes, tanto simétricos como asimétricos y de diferentes generaciones. Esto permitiría determinar si la propiedad de mantener un exponente de escala constante bajo cifrado parcial es una característica general de los algoritmos robustos o si es específica de ciertas arquitecturas. La comparación de los exponentes de escala obtenidos para diferentes algoritmos podría revelar fortalezas y debilidades inherentes a cada uno, proporcionando información valiosa para el diseño de futuros sistemas de cifrado.

Este trabajo se ha centrado en imágenes en escala de grises. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones prácticas involucran imágenes a color. La extensión del $AFsT$ bidimensional al análisis de imágenes a color, ya sea tratando cada canal de color por separado o desarrollando un enfoque multicanal, es un paso lógico y necesario. Esto permitiría evaluar la efectividad de los algoritmos de cifrado en la preservación de la estructura estadística en los diferentes componentes de color de una imagen.

La relación entre exponentes de escala y otros atributos de la imagen sería interesante investigar si existe una correlación entre los exponentes de escala de las imágenes cifradas y otros atributos de las imágenes originales, como su contenido semántico, su complejidad visual intrínseca, o su tipo (por ejemplo, fotografías, gráficos, documentos escaneados). Esta investigación podría revelar si ciertos tipos de imágenes son inherentemente más difíciles de cifrar de manera segura o si los algoritmos de cifrado deben ser adaptados a las características específicas de las imágenes.

En lugar de solo usar $AFsT$ para evaluar algoritmos existentes, podríamos explorar si los principios del $AFsT$ pueden inspirar el diseño de nuevos algoritmos de cifrado. Por ejemplo, se podrían diseñar algoritmos que explícitamente manipulen o generen exponentes de escala específicos para asegurar propiedades deseables de seguridad y robustez. En resumen, este trabajo ha sentado las bases de posibles

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

sistemas criptográficos [21].

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Eduardo Jiménez-López: Conceptualización, Metodología, Software, Visualización, Investigación, Validación, Curación de datos, Preparación del borrador original, Redacción – Revisión y Edición.

Referencias

[1] G. Grosu, A. Hopp, V. Moca, H. Bârzan, A. Ciuparu, M. Ercsey-Ravasz, and R. Mureşan, "The fractal brain: scale-invariance in structure and dynamics," *Cerebral Cortex*, vol. 33, no. 8, pp. 4574–4605, 2023.

[2] M. Wang, Y. Wang, R. Xu, R. Peng, J. Wang, and J. Kim, "Multifractal detrended fluctuation analysis combined with Allen–Cahn equation for image segmentation," *Fractal and Fractional*, vol. 9, no. 5, p. 310, 2025.

[3] R. Monjo and O. Meseguer-Ruiz, "Fractal geometry in precipitation," *Atmosphere*, vol. 15, no. 1, p. 135, 2024.

[4] A. Alshehri, T. Daws, and S. Ezekiel, "Medical image segmentation using multifractal analysis," *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 420–429, 2020.

[5] J. Wang, L. Wang, Z. Yang, W. Tan, M. Luo, and Y. Liu, "Multifractal analysis of MRI images from breast cancer patients," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, no. 18, pp. 55 075–55 090, 2024.

[6] A. Ramola, A. Shakya, and D. Van Pham, "Study of statistical methods for texture analysis and their modern evolutions," *Engineering Reports*, vol. 2, no. 4, p. e12149, 2020.

[7] J. Ketola, S. Inkinen, J. Karppinen, J. Niinimäki, O. Tervonen, and M. Nieminen, "T2-weighted magnetic resonance imaging texture as predictor of low back pain: A texture analysis-based classification pipeline to symptomatic and asymptomatic cases," *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 39, no. 11, pp. 2428–2438, 2021.

[8] A. Upadhyay, N. Chandel, K. Singh, S. Chakraborty, B. Nandede, M. Kumar, and A. Elbeltagi, "Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture," *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, no. 3, p. 92, 2025.

[9] M. Dang, H. Wang, Y. Li, T. Nguyen, L. Tightiz, N. Xuan-Mung, and T. Nguyen, "Computer vision for plant disease recognition: a comprehensive review," *The Botanical Review*, vol. 90, no. 3, pp. 251–311, 2024.

[10] B. Selmi, "The relative multifractal analysis, review and examples," *Acta Scientiarum Mathematicarum*, vol. 86, no. 3, pp. 635–666, 2020.

[11] C. Wang and L. Song, "An image encryption scheme based on chaotic system and compressed sensing for multiple application scenarios," *Information Sciences*, vol. 642, p. 119166, 2023.

[12] M. Kumari and S. Gupta, "Performance comparison between chaos and quantum-chaos based image encryption techniques," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 24, pp. 33 213–33 255, 2021.

[13] P. Kiran and B. Parameshachari, "Resource optimized selective image encryption of medical images using multiple chaotic systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 91, p. 104546, 2022.

[14] R. Ratan and A. Yadav, "Security analysis of bit plane level image encryption schemes," *Defence Science Journal*, vol. 71, no. 2, pp. 209–221, 2021.

[15] A. Martin, O. Jeong, S. Park, and I. Moon, "Deep learning-based predictive models over pseudo random number generators," in *2025 IEEE International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBE)*, 2025, pp. 375–380.

[16] J. Pena, A. Arellano-Delgado, R. Méndez-Ramírez, and H. Estrada-Garcia, "Synchronization of chaotic systems with Huygens-like coupling," *Mathematics*, vol. 12, no. 20, p. 3177, 2024.

[17] E. Jiménez, C. Garrocho, and T. Chavez, "Modelando la expansión urbana con autómatas celulares: aplicación de la estación de inteligencia territorial (Christaller)®," *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, no. 12, pp. 1–26, 2018. [Online]. Available: http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig

[18] Y. Zhao, H. Liao, Y. Zhao, and S. Pan, "Data-augmented trend-fluctuation representations by interpretable contrastive learning for wind power forecasting," *Applied Energy*, vol. 380, p. 125052, 2025.

[19] M. Gospodinov, E. Gospodinova, and E. Popovska, "Comparative analysis of statistical methods for estimating Hurst exponent," in *Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies*, 2020, pp. 148–155.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.27676 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 54- 76

[20] J. Ma, R. Wang, Y. Yu, X. Xu, H. Duan, and N. Yu, "Is fractal dimension a reliable imaging biomarker for the quantitative classification of an intervertebral disk?" *European Spine Journal*, vol. 29, no. 5, pp. 1175–1180, 2020.

[21] A. Shafique, "A noise-tolerant cryptosystem based on the decomposition of bit-planes and the analysis of chaotic gauss iterated map," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 19, pp. 16 805–16 828, 2022.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Implementación de MobileNetV2 para detección de cáncer de pulmón mediante la inteligencia artificial para el cómputo móvil

MobileNetV2 implementation for lung cancer detection through artificial intelligence for mobile computing

O. D. Arellano-Magdaleno[1] *, M. A. Ramos-Corchado[1] , V. Muñoz-Jiménez[1]
(*oarellanomagdaleno@gmail.com)

Recibido: 29 de abril de 2026 Aceptado: 15 de junio de 2026

RESUMEN

El cáncer de pulmón es uno de los principales problemas de salud a nivel mundial reportando 1.18 millones de fallecimientos al año. Frecuentemente, esta enfermedad se diagnostica en etapas avanzadas, lo que reduce las posibilidades de un tratamiento exitoso. Entre los principales factores de riesgo se encuentra el consumo de tabaco; sin embargo, cuando se identifica de manera oportuna, es posible mejorar el pronóstico y prolongar la supervivencia de los pacientes. Los métodos tradicionales de diagnóstico se basan principalmente en técnicas de imagen, como la radiografía de tórax y la tomografía computarizada (CT), cuya interpretación requiere experiencia clínica para reconocer alteraciones asociadas con etapas iniciales de la enfermedad. Además, en regiones con acceso limitado a personal médico especializado, el análisis oportuno de estos estudios puede verse afectado, dificultando un diagnóstico temprano. En este contexto, el uso de inteligencia artificial mediante algoritmos como MobileNetV2 permite implementar herramientas de apoyo capaces de identificar patrones asociados con cáncer de pulmón de forma rápida y precisa. En este estudio se obtuvo una exactitud del 91.0 %, resultado comparable con el desempeño de arquitecturas más robustas reportadas en la literatura.

Palabras clave: *cáncer de pulmón, tomografía, red neuronal convolucional, inteligencia artificial, MobileNetV2*

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

Abstract

Lung cancer is one of the leading global health problems, causing approximately 1.18 million deaths each year. This disease is frequently diagnosed at advanced stages, reducing the likelihood of successful treatment. Tobacco consumption is among the main risk factors; however, when detected at an early stage, lung cancer can be treated, improving prognosis and extending patient survival. Traditional diagnostic methods are primarily based on imaging techniques, such as chest radiography and computed tomography (CT), whose interpretation requires clinical expertise to recognize abnormalities associated with the early stages of the disease. Furthermore, in regions with limited access to specialized medical personnel, the timely analysis of these studies may be affected, hindering early diagnosis. In this context, the use of artificial intelligence through algorithms such as MobileNetV2 enables the implementation of support tools capable of identifying lung cancer-related patterns rapidly and accurately. In this study, an accuracy of 91.0 % was achieved, a result comparable to the performance of more robust architectures reported in the literature.

Keywords: *lung cancer, tomography, convolutional neural network, Artificial Intelligence, MobileNetV2*

Introducción

El cáncer de pulmón es una enfermedad caracterizada por el crecimiento anormal de células en el tejido pulmonar del tracto respiratorio [1]. Esta patología representa un problema de salud pública a nivel mundial debido a que provoca aproximadamente 1.18 millones de fallecimientos cada año [2]. Actualmente, se distinguen diferentes tipos de cáncer de pulmón. De acuerdo con Cajape-González et al. [1], aproximadamente el 85 % de los casos corresponden al carcinoma de células no pequeñas, mientras que el porcentaje restante incluye adenocarcinomas, carcinomas de células grandes y carcinomas escamosos. Los carcinomas son tumores malignos que se originan en tejidos epiteliales y representan alrededor del 90 % de los casos de cáncer en humanos [3].

El cáncer de pulmón suele diagnosticarse en etapas avanzadas debido a que sus manifestaciones clínicas iniciales tienden a ser silenciosas. Entre los principales factores de riesgo se encuentran el consumo de tabaco, la contaminación atmosférica y la exposición a sustancias nocivas. Para su evaluación clínica, esta enfermedad se clasifica mediante el sistema Tumor, Ganglio y Metástasis (TNM), el cual permite establecer pronósticos precisos y orientar la atención médica adecuada [4].

Aunque el cáncer de pulmón puede ser controlado si se detecta de manera temprana, los métodos tradicionales de diagnóstico, como las radiografías de tórax y las tomografías computarizadas (CT), requieren tiempo y dependen en gran medida de la experiencia del especialista [5]. Además, en regiones

con acceso limitado a personal médico especializado, el análisis oportuno de estos estudios puede verse afectado, dificultando un diagnóstico temprano. En este contexto, el diagnóstico asistido por inteligencia artificial (IA) surge como una alternativa para mejorar los procesos de análisis de imágenes médicas. Los modelos de aprendizaje automático son capaces de procesar grandes volúmenes de información e identificar patrones complejos presentes en las imágenes de forma rápida y consistente. Diversos estudios reportados en la literatura han abordado esta problemática mediante técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo. Entre las estrategias más utilizadas se encuentran las redes neuronales convolucionales (CNN), la transferencia de aprendizaje y el procesamiento digital de imágenes (PID), alcanzando resultados competitivos en términos de precisión diagnóstica. Estas características favorecen el desarrollo de soluciones accesibles para entornos con infraestructura tecnológica limitada y acceso restringido a personal médico especializado. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) proyecta un incremento en los casos de cáncer de pulmón durante los próximos años, lo que refuerza la necesidad de desarrollar herramientas que contribuyan a una detección más oportuna de la enfermedad [1]. En este trabajo se emplea la IA para desarrollar una CNN orientada a la detección de cáncer de pulmón en imágenes CT. Se utiliza la arquitectura MobileNetV2, seleccionada por su equilibrio entre precisión y eficiencia computacional. Gracias al uso de convoluciones separables en profundidad y bloques residuales invertidos, esta arquitectura reduce significativamente el número de parámetros y operaciones requeridas en comparación con redes más complejas, favoreciendo su implementación en dispositivos con recursos limitados [6]. La originalidad de la propuesta radica en el uso de una arquitectura ligera capaz de alcanzar un desempeño competitivo en tareas de clasificación de cáncer de pulmón, en comparación con arquitecturas más complejas, facilitando su aplicación en entornos con infraestructura tecnológica restringida.

Trabajos relacionados

Patil et al. [5] proponen un enfoque basado en CNN para la detección de cáncer de pulmón a partir de imágenes de CT. El estudio considera etapas de preprocesamiento y entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo para diferenciar imágenes con y sin presencia de cáncer. El desempeño se evalúa mediante métricas como exactitud, sensibilidad, especificidad y F1-score. Los resultados muestran que las CNN pueden distinguir eficazmente entre imágenes con presencia de cáncer e imágenes sin evidencia de cáncer, evidenciando su potencial como herramienta de apoyo al diagnóstico temprano.

Mohamed et al. [7] proponen un método para la detección de cáncer de pulmón en imágenes CT mediante un modelo híbrido que combina CNN con el algoritmo metaheurístico Ebola Optimization Search Algorithm (EOSA). El enfoque integra PID para la extracción de características y clasificación de casos normales, benignos y malignos, mientras que EOSA optimiza los parámetros de la red neuronal. Utilizando el conjunto de datos IQ-OTH/NCCD, el modelo alcanzó una exactitud del 93.21 %,

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

sensibilidad de 90.71 %, especificidad de 1.0, precisión de 1.0 y F1-score de 92.72 %.

Raut et al. [8] presentan un sistema para la detección de cáncer de pulmón basado en PID y aprendizaje automático aplicado a imágenes de CT. El método incluye etapas de preprocesamiento para facilitar la identificación de regiones sospechosas de tumor. Posteriormente, las características extraídas son utilizadas por un árbol de decisión C4.5 para clasificar las imágenes como cancerosas o normales. El sistema obtuvo una exactitud aproximada del 78 %.

Hamim et al. [9] presentan un estudio para la detección de cáncer de pulmón mediante el análisis de datos clínicos estructurados. El enfoque emplea algoritmos de aprendizaje automático para clasificación binaria, incluyendo Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), Regresión Logística, Gradient Boosting y CatBoost. Como parte del preprocesamiento, se realiza la gestión de valores nulos, la codificación de variables categóricas y el submuestreo aleatorio para corregir el desbalance de clases. El modelo SVM obtuvo una exactitud del 95 %.

Tiwari et al. [10] proponen un enfoque basado en aprendizaje profundo para la detección y clasificación de nódulos pulmonares en imágenes de CT. El método combina una arquitectura CMixNet tridimensional con Faster R-CNN para la detección de nódulos y Gradient Boosting Machine (GBM) para su caracterización. Asimismo, emplea una arquitectura tipo U-Net para la segmentación de regiones de interés y la reducción de falsos positivos. Utilizando el conjunto de datos LIDC-IDRI, el sistema alcanzó una sensibilidad del 94 % y una especificidad del 91 %.

Ribeiro y Sousa [11] presentan un estudio para la clasificación de cáncer de pulmón utilizando los conjuntos de datos IQ-OTH/NCCD y LIDC-IDRI. El enfoque combina arquitecturas CNN como AlexNet, ResNet-50 y EfficientNet con la Transformada Wavelet (coif5) y el filtro CLAHE para el preprocesamiento de imágenes. Los modelos alcanzaron una exactitud promedio de 96.12 %.

Wankhade y Vigneshwari [12] proponen un método híbrido basado en 3D-CNN, RNN y U-Net para la detección de cáncer de pulmón utilizando imágenes de CT del conjunto de datos LUNA16. El modelo alcanzó una exactitud del 95 %, demostrando la efectividad del aprendizaje profundo para la identificación de nódulos pulmonares malignos. La Tabla 1 presenta un resumen de los principales trabajos relacionados en el periodo comprendido entre 2021 y 2025.

De acuerdo con los trabajos analizados y con el estudio de Bocanegra-Valencia et al. [13], las CNN constituyen la técnica más utilizada para la detección de cáncer de pulmón mediante imágenes CT, alcanzando resultados competitivos en términos de precisión. No obstante, la mayoría de las investigaciones reportadas se enfocan en mejorar el desempeño de clasificación mediante arquitecturas profundas o modelos híbridos con un elevado costo computacional, tales como ResNet, EfficientNet, 3D-CNN o combinaciones de CNN con algoritmos de optimización y segmentación avanzada. En

Tabla 1. *Resumen de trabajos relacionados sobre la detección de cáncer de pulmón.*

Autor	Técnicas utilizadas	Resultados	Bases de datos
Patil et al., (2025)	Normalización de imágenes, Rotación, Escalado, Volteo de imágenes, CNN	Exactitud: 92 %, Precisión: 94 %, Sensibilidad: 90 %, Especificidad: 95 %, F1-score: 93 %	NLST
Ribeiro y Sousa (2024)	AlexNet, ResNet-50, EfficientNet, Transformada Wavelet y filtro CLAHE	Exactitud: 96.12 %	IQ-OTH/NCCD y LIDC-IDRI
Mohamed et al., (2023)	Transformada Wavelet, CLAHE, CNN, EOSA, EOSA-CNN	Exactitud: 93.21 %, Precisión: 1.0, Sensibilidad: 90.71 %, Especificidad: 1.0, F1-score: 92.72 %	IQ-OTH/NCCD
Wankhade y Vigneshwari (2023)	Segmentación, Normalización, 3D-CNN + RNN	Exactitud: 95 %, Sensibilidad: 87 %, Especificidad: 90 %	LIDC-IDRI y LUNA16
Hamim et al., (2023)	Eliminación de valores nulos, Label Encoding, Random Under-Sampling, SVM, Regresión Logística, KNN, Naive Bayes, Árbol de Decisión, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, CatBoost, Grid Search	Exactitud: 95 %, Precisión: 0.94, Sensibilidad: 1.00, F1-score: 95 %	Registros médicos reales numéricos y categóricos
Tiwari et al., (2022)	Normalización, Downsampling, Zero-centering, Segmentación pulmonar, U-Net 3D CNN (CMixNet), Faster R-CNN, GBM	Sensibilidad: 94 %, Especificidad: 91 %	LIDC-IDRI
Raut et al., (2021)	Canny edge detection, Sobel edge detection, Árbol de decisión C4.5	Exactitud: $\sim$78 %	CT scans de pulmones de 61 pacientes

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

contraste, pocos estudios analizan la viabilidad de implementar modelos ligeros para entornos con recursos computacionales limitados o con acceso restringido a personal médico especializado. En este contexto, la presente investigación propone una metodología basada en MobileNetV2, una arquitectura diseñada para dispositivos con capacidad de procesamiento reducida, complementada con técnicas de PID para la clasificación de estudios CT en tres categorías: hallazgos benignos, malignos y pulmones sin evidencia de cáncer. De esta manera, la propuesta busca combinar un desempeño competitivo en la clasificación con una menor demanda computacional, favoreciendo su implementación en sistemas de cómputo móvil y plataformas con infraestructura limitada.

Materiales y métodos

Para el desarrollo del modelo de clasificación de cáncer de pulmón se integraron técnicas de PID y aprendizaje predictivo. Estas técnicas permitieron mejorar la calidad de las imágenes de entrada, extraer características relevantes y entrenar una red neuronal capaz de distinguir entre 3 categorías de CT. La investigación presentada en este artículo se estructura en dos etapas principales:

1. Preprocesamiento de imágenes: aplicación de métodos de PID para mejorar la calidad del conjunto de datos (dataset) que es utilizado como mecanismos de entrenamiento de la CNN.

2. Aprendizaje predictivo: implementación de una red neuronal MobileNetV2 que permite clasificar las CT en tomografías sin evidencia de cáncer, hallazgos benignos y malignos.

Preprocesamiento del conjunto de datos

El dataset utilizado para entrenar la red MobileNetV2 está compuesto por imágenes médicas de tomografía computarizada, por lo que se aplicaron técnicas de PID para mejorar su calidad. Posteriormente, se dividió en 80 % para entrenamiento y 20 % para validación, empleando este último subconjunto para evaluar el desempeño del modelo y calcular las métricas reportadas. Las etapas del preprocesamiento aplicadas a las imágenes se describen a continuación.

Conversión a escala de grises

En la etapa de conversión a escala de grises, a cada píxel de la imagen se le asigna un valor de intensidad comprendido entre 0 y 255 [14]. Las tonalidades rojas (R), verde (G) y azul (B) se combinan para obtener una tonalidad de gris de acuerdo con la Ec. (1):

$$y = (R \times 0{,}3) + (G \times 0{,}59) + (B \times 0{,}11) \tag{1}$$

Filtro de desenfoque Gaussiano

Es una técnica de suavizado que difumina la imagen mediante la convolución del mapa de bits con una gaussiana 2D, la cual se define en la Ec. (2):

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

Donde: x e y son las coordenadas del píxel; σ representa la desviación estándar de la gaussiana. El desenfoque permite reducir detalles y ruido presentes en la imagen, facilitando la detección de contornos [15].

Segmentación OTSU

Es un método automático de umbralización que selecciona el umbral óptimo mediante la maximización de la varianza interclase entre el fondo y el objeto de interés [16]. De esta manera, aumenta la diferencia estadística entre ambas regiones y se minimizan los errores de clasificación de píxeles, mejorando la precisión de la segmentación [17].

a. Probabilidad de cada nivel de gris, Ec. (3):

$$B(i) = \frac{a(i)}{M \times N} \tag{3}$$

Donde: $a(i)$ es el número de píxeles con nivel de gris i, y $M \times N$ es el tamaño de la imagen.

b. Proporción de fondo y primer plano, Ec. (4) y Ec. (5):

$$h_0 = \sum_{i=0}^{t} B(i) \tag{4}$$

$$h_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} B(i) \tag{5}$$

c. Media de niveles de gris por clase, Ec. (6) y Ec. (7):

$$p_0 = \frac{\sum_{i=0}^{t} i \cdot B(i)}{h_0} \tag{6}$$

$$p_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} i \cdot B(i)}{h_1} \tag{7}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

d. Media global de la imagen, Ec. (8):

$$\rho_T = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot B(i) \tag{8}$$

e. Varianza inter-clase, Ec. (9):

$$\sigma_B^2 = h_0(\rho_0 - \rho_T)^2 + h_1(\rho_1 - \rho_T)^2 \tag{9}$$

f. Selección del umbral óptimo, Ec. (10):

$$t^* = \arg\max \sigma_B^2(t) \tag{10}$$

Normalización Min-Max

Es una técnica de preprocesamiento que transforma los valores de un conjunto de datos a un rango específico, comúnmente entre 0 y 1 [18]. Esta normalización se define como la Ec. (11):

$$v_{\text{norm}_i} = \frac{v_i - v_{\text{mín}}}{v_{\text{máx}} - v_{\text{mín}}} \tag{11}$$

donde v_i representa el valor original, $v_{\text{mín}}$ y $v_{\text{máx}}$ son los valores mínimo y máximo del dataset.

Erosión y Dilatación

La dilatación morfológica genera un efecto de expansión o ampliación en las regiones de la imagen. Por su parte, la erosión morfológica produce un efecto de adelgazamiento o contracción de las regiones, eliminando píxeles en sus contornos [7]. El proceso de erosión y dilatación se define como la Ec. (12) y la Ec. (13):

$$Y = A \ominus B = \{x, y \mid (B)_{xy} \subseteq A\} \tag{12}$$

$$Y = A \oplus B = \{y : B(y) \cap A \neq \emptyset\} \tag{13}$$

Donde: Y es la imagen binaria resultante, B es el operador morfológico (elemento estructurante) y A es la imagen original por procesar.

Filtro CLAHE

El filtro CLAHE actúa en pequeñas regiones de la imagen, aplicando la técnica dentro de cada bloque [11] [19]. Sus etapas son las siguientes:

a. División de la imagen en bloques.

b. Cálculo del histograma local para cada bloque.

c. Aplicación del límite de recorte al histograma.

d. Transformación del histograma ajustado en una función de distribución acumulada (CDF).

e. Mapeo de nuevas intensidades para los píxeles con base en la CDF.

f. Interpolación entre bloques adyacentes para suavizar la transición.

g. Reconstrucción de la imagen con el contraste local mejorado.

Para estos pasos se considera la realización de la normalización del histograma, dada por la Ec. (14):

$$H'(i) = \min\{H(i),\ clip_limit\} + \frac{\Sigma(H(i) - clip_limit)}{N} \tag{14}$$

donde $H(i)$ es el valor del histograma en la intensidad i, $clip_limit$ es el valor máximo permitido, y N es el número total de *bins* del histograma. Además, se realiza el mapeo de intensidades utilizando la Ec. (15):

$$I'(x, y) = \text{CDF}(I(x, y)) \times (L - 1) \tag{15}$$

donde $I(x, y)$ es la intensidad original del píxel, $I'(x, y)$ es la nueva intensidad del píxel, CDF es la función de distribución acumulada del histograma ajustado, y L es el número de niveles de intensidad.

Aprendizaje predictivo

En esta etapa se implementa un modelo basado en redes neuronales convolucionales con el objetivo de identificar patrones relevantes en las imágenes previamente procesadas.

Transformada Wavelet

Es una técnica utilizada para descomponer señales, como imágenes, en componentes de diferentes frecuencias. En el procesamiento de imágenes, permite analizar y procesar detalles a distintas escalas,

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

capturando tanto características globales como locales de la imagen [20]. Para el análisis bidimensional, se emplea la transformada de wavelet discreta 2D (2D-DWT), la cual descompone la imagen mediante filtros pasa-baja y pasa-altas en las direcciones horizontal y vertical, generando 4 subbandas denominadas LL, LH, HL y HH, que representan la aproximación y los detalles de alta frecuencia de la imagen [21]. Matemáticamente, esta descomposición se define como la Ec. (16), Ec. (17), Ec. (18) y Ec. (19):

$$LL(k,l) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m, 2n)\, h(k-m)\, h(l-n) \tag{16}$$

$$LH(k,l) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m, 2n+1)\, g(k-m)\, h(l-n) \tag{17}$$

$$HL(k,l) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1, 2n)\, h(k-m)\, g(l-n) \tag{18}$$

$$HH(k,l) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1, 2n+1)\, g(k-m)\, g(l-n) \tag{19}$$

donde (k, l) representan las coordenadas de los coeficientes de salida en el dominio transformado, $x(m, n)$ representa los valores de los píxeles de la imagen de entrada, $h(k)$ y $g(k)$ representan los filtros de escalamiento y wavelet, respectivamente, y $\frac{N}{2}$ representa la reducción del tamaño del dominio transformado debido al proceso de submuestreo.

Red Neuronal MobileNetV2

Es una CNN propuesta por Google en 2018, diseñada para dispositivos móviles y entornos con recursos limitados. Esta arquitectura reduce significativamente el número de operaciones y el consumo de memoria sin afectar de manera considerable la precisión del modelo [22]. MobileNetV2 introduce dos conceptos principales: la convolución separable en profundidad y la estructura residual invertida. La primera descompone la convolución tradicional en operaciones *depthwise* y *pointwise*, una convolución *depthwise* (DW), que aplica un filtro independiente a cada canal de entrada, y una convolución *pointwise* (PW) de tamaño 1×1, que combina linealmente los canales para generar nuevas características. Esta estrategia reduce la complejidad computacional respecto a la convolución tradicional. Considerando un mapa de características de entrada de tamaño $w_{in} \times h_{in}$ con M canales, un kernel de tamaño $k \times k$ y N canales de salida. MobileNetV2 emplea un kernel de 3×3, la reducción del cálculo es aproximadamente

entre 8 y 9 veces menor que en la convolución estándar [22].

La arquitectura recibe imágenes de entrada de $224 \times 224 \times 3$ píxeles y se compone de una capa convolucional inicial con 32 filtros, seguida por 19 bloques residuales invertidos (bottlenecks) y una convolución pointwise final que genera mapas de características de tamaño $7 \times 7 \times 1280$. La Figura 1 muestra la arquitectura general de MobileNetV2 y la organización de sus bloques [23].

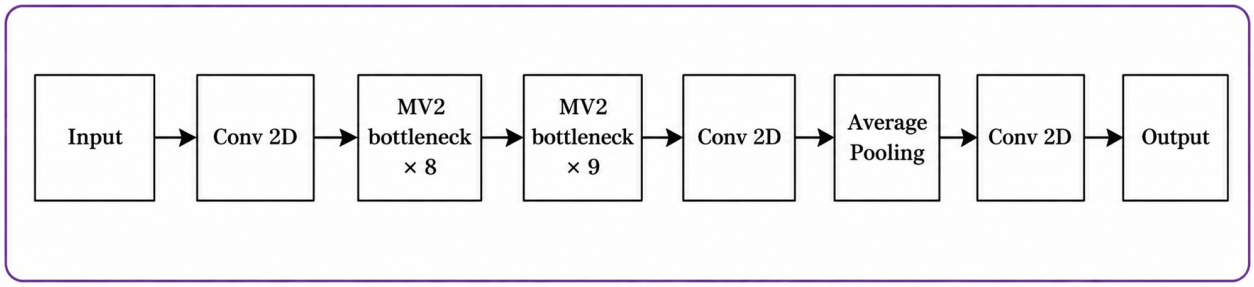


FIGURA 1. *Arquitectura general de MobileNetV2 [24].*

METODOLOGÍA

Se propone la siguiente metodología, basada en CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), la cual integra distintas fases para el desarrollo sistemático de modelos de aprendizaje automático [25], orientados a la detección de cáncer de pulmón en imágenes CT mediante una CNN basada en MobileNetV2. El esquema metodológico se presenta en la Figura 2.

Recopilación de los datos

En el estudio se utilizaron dos datasets. El primero corresponde al Hospital de Enseñanza de Oncología de Iraq / Centro Nacional de Enfermedades del Cáncer (IQ-OTH/NCCD), compuesto por 1097 imágenes de CT correspondientes a 110 casos distribuidos en tres clases: normal (55 casos), benigno (15 casos) y maligno (40 casos) [26]. El análisis de la distribución de imágenes evidenció un desbalance entre las clases, particularmente en la categoría benigna, que contaba con 120 imágenes frente a 416 de la clase normal y 561 de la clase maligna. Para reducir este desbalance se incorporó el conjunto de datos SPIE-AAPM-NCI Lung Nodule Classification Challenge (LUNGx) [27].

La incorporación de LUNGx permitió incrementar la cantidad de imágenes benignas de 120 a 371. La inclusión de estudios provenientes de pacientes distintos aportó una mayor diversidad clínica y una mayor

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

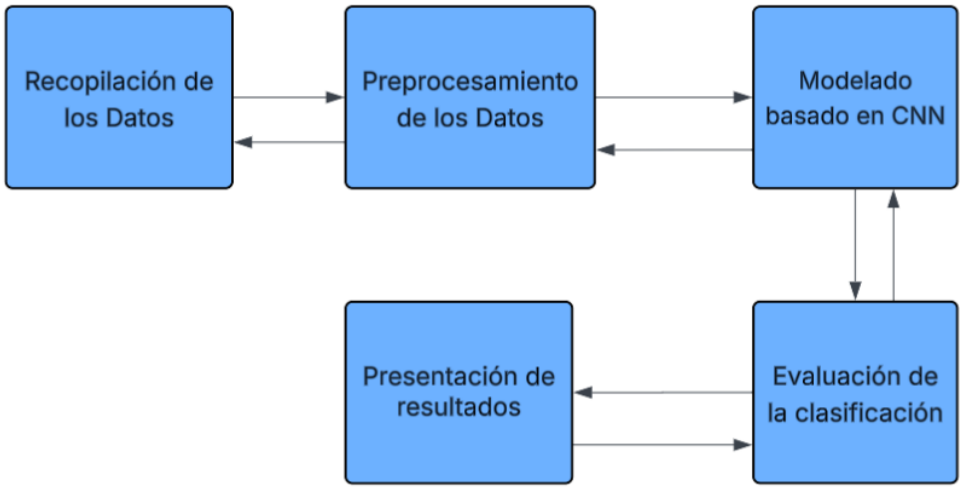


FIGURA 2. *Estrategia metodológica utilizada para la detección de cáncer de pulmón.*

variabilidad en las condiciones de adquisición, favoreciendo la capacidad de generalización del modelo (ver Figura 3). Ambos conjuntos de datos son de acceso público y están disponibles en las referencias [26, 27].

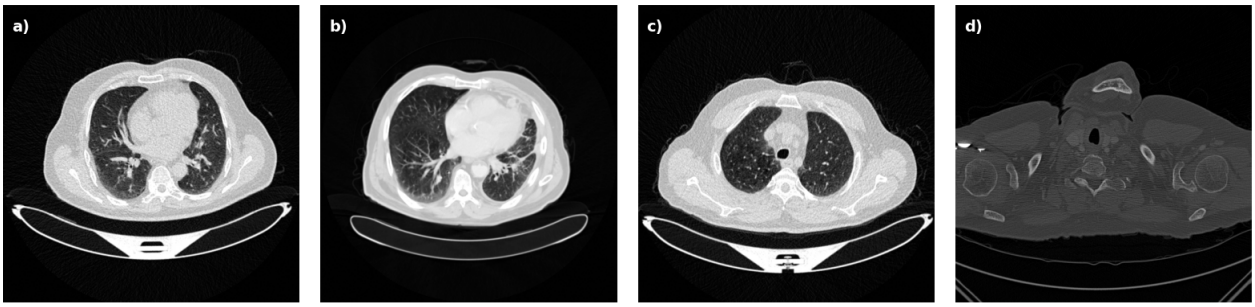


FIGURA 3. *Ejemplos de imágenes pulmonares utilizadas en el estudio. Las subfiguras a), b) y c) corresponden al dataset IQ-OTH/NCCD, que incluye casos normal, benigno y maligno, respectivamente. La subfigura d) pertenece al dataset LUNGx, correspondiente a casos benignos.*

Preprocesamiento de los datos

Se extraen características visuales para la identificación de patrones asociados al cáncer de pulmón mediante técnicas de PID, como se muestra en la Figura 4.

En esta etapa se realizó el PID para mejorar la calidad de los datasets y resaltar características relevantes para la clasificación automática. El preprocesamiento se implementó en Python utilizando las librerías OpenCV, PyWavelets, Scikit-image y Pydicom. El flujo inicia con imágenes en escala

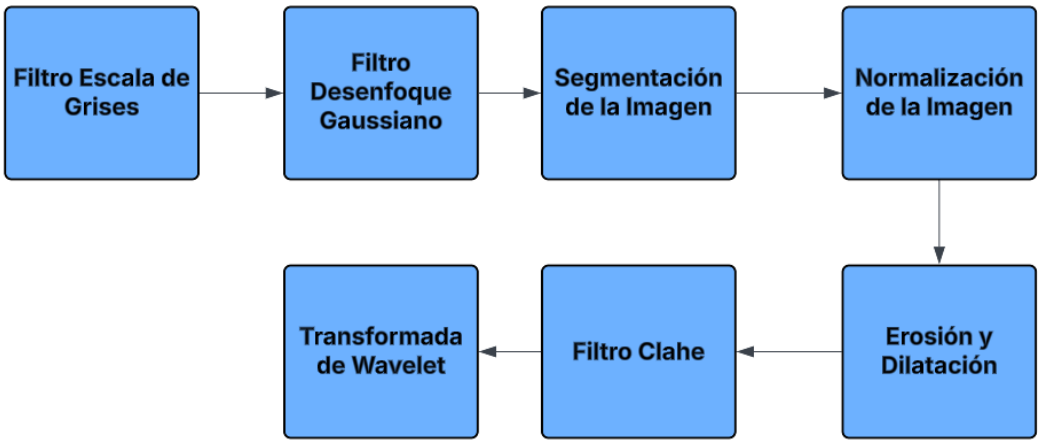


FIGURA 4. *Preprocesamiento de los datasets utilizando PID.*

de grises. Debido a que algunas tomografías pueden encontrarse almacenadas en formato RGB, se realizó una conversión para trabajar con un único canal de información y reducir la complejidad computacional. Posteriormente, se aplicó un desenfoque Gaussiano para reducir ruido, seguido de segmentación mediante el método de Otsu, normalización del dataset y operaciones morfológicas para corregir discontinuidades en la imagen. Después, se utilizó CLAHE para mejorar el contraste local. Finalmente, se aplicó la Transformada Discreta Wavelet bidimensional (2D-DWT) utilizando la función wavelet biortogonal bior1.3 y se seleccionó la sub-banda LL, correspondiente a la aproximación de baja frecuencia, como entrada para el entrenamiento de la red neuronal encargada de clasificar las imágenes en hallazgos benignos, malignos y pulmones sin evidencia de cáncer.

Modelado

Se empleó la arquitectura MobileNetV2 mediante transferencia de aprendizaje para la clasificación de imágenes CT en tres categorías: hallazgos benignos, malignos y pulmones sin evidencia de cáncer. Sobre la arquitectura base se incorporaron una capa GlobalAveragePooling2D, una capa densa de 128 neuronas con activación ReLU, una capa Dropout y una capa final Dense, descritas a continuación.

1. Capa GlobalAveragePooling2D, utilizada para reducir la dimensionalidad de los mapas de características y disminuir el riesgo de sobreajuste [28].

2. Capa densa de 128 neuronas con activación ReLU, encargada de aprender representaciones complejas de los datos con una alta eficiencia computacional [29].

3. Capa Dropout con tasa de 0.3, empleada como técnica de regularización para reducir el sobreajuste y mejorar la capacidad de generalización del modelo [30].

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

4. Capa final Dense con activación softmax, encargada de la clasificación de imágenes [29].

Si bien MobileNetV2 permite diferentes configuraciones, en este trabajo se empleó una configuración previamente reportada en la literatura, debido a que el objetivo principal fue validar la aplicabilidad de esta arquitectura para la clasificación de cáncer de pulmón en entornos con infraestructura limitada.

La Figura 5a muestra la evolución de la precisión durante el entrenamiento de la CNN, observándose convergencia en aproximadamente 15 épocas y una precisión cercana al 90 %, mientras que la precisión de validación se mantiene por encima del 70 %. La Figura 5b presenta una disminución progresiva de la pérdida y un comportamiento estable durante el entrenamiento, evidenciando una adecuada capacidad de generalización del modelo.

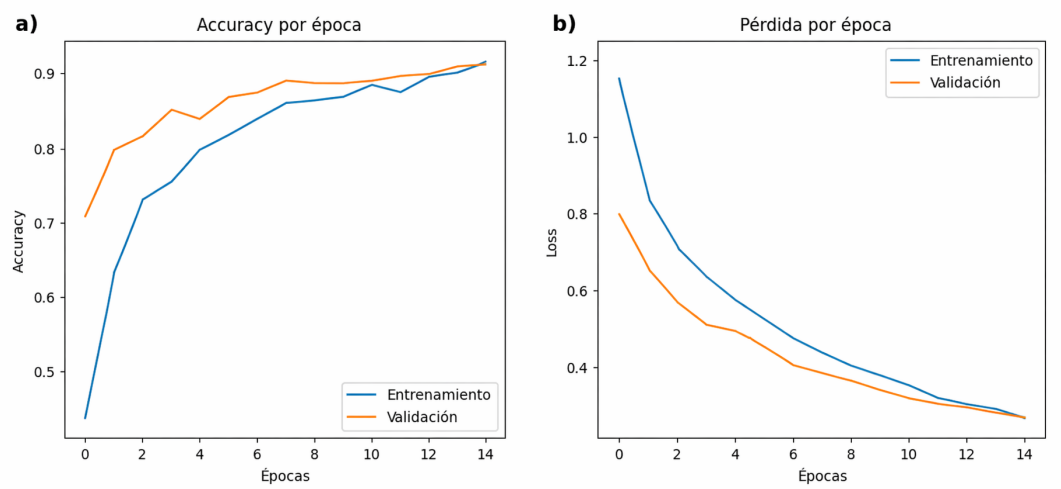


FIGURA 5. *Curvas de entrenamiento y validación del modelo: a) exactitud (accuracy) y b) pérdida (loss).*

Evaluación

Para validar el modelo se utilizan métricas estándar empleadas en problemas de clasificación multiclase: exactitud, precisión, sensibilidad y *F1-score* a partir de la matriz de confusión [31].

La exactitud representa la proporción de predicciones correctas respecto al total de instancias. La precisión mide la exactitud de las predicciones positivas, la sensibilidad evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos y F1-score corresponde a la media armónica entre precisión y la sensibilidad proporcionando una medida equilibrada del desempeño del modelo.

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Se implementó una CNN basada en MobileNetV2 con el objetivo de validar su utilización en sistemas computacionales con recursos limitados para la detección del cáncer de pulmón. En las Tablas 2 y 3

se presentan la matriz de confusión y las métricas de clasificación obtenidas. La clase benigno alcanzó una precisión de 0.98, sensibilidad de 0.86 y F1-score de 0.92, mostrando un equilibrio adecuado entre precisión y sensibilidad. Por su parte, la clase maligno obtuvo una precisión de 0.93, sensibilidad de 0.94 y F1-score de 0.94, evidenciando una adecuada capacidad para identificar casos malignos. Finalmente, la clase normal alcanzó una precisión de 0.80, sensibilidad de 0.94 y F1-score de 0.86, lo que indica una adecuada capacidad para identificar imágenes sin evidencia de cáncer.

Tabla 2. *Clasificación de la red MobileNetV2 sobre el conjunto de prueba.*

	Benigno	Maligno	Normal
Benigno	119	3	16
Maligno	2	97	4
Normal	1	4	79

Tabla 3. *Métricas obtenidas para el dataset durante la clasificación.*

	Precision	Recall	F1-score
Benigno	0.98	0.86	0.92
Maligno	0.93	0.94	0.94
Normal	0.80	0.94	0.86

El modelo propuesto se comparó con el trabajo de Mohamed et al. [7], quienes utilizaron el mismo conjunto de datos IQ-OTH/NCCD. Como se observa en la Tabla 4, el modelo EOSA-CNN reportó una exactitud global de 93.21 %, mientras que la propuesta basada en MobileNetV2 alcanzó una exactitud de 91.0 %. Sin embargo, el análisis por clase muestra diferencias importantes entre ambos enfoques. En la categoría benigno, MobileNetV2 obtuvo un F1-score de 0.92 frente a 0.4151 reportado por EOSA-CNN. De manera similar, para las clases maligno y normal se obtuvieron F1-scores de 0.94 y 0.86, respectivamente, superando los valores reportados por Mohamed et al. [7].

Estos resultados muestran que, aunque la exactitud global es ligeramente inferior, MobileNetV2 presenta un comportamiento más equilibrado entre las tres clases, especialmente en la categoría benigna, que corresponde a la clase con menor número de muestras. Asimismo, el uso de transferencia de aprendizaje y aumento de datos contribuye a mejorar la capacidad de generalización del modelo y reducir el sesgo hacia las clases mayoritarias.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para la clasificación de cáncer de pulmón a partir de CT mediante técnicas de PID y aprendizaje profundo. La propuesta combinó etapas de preprocesamiento,

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28076 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 77- 95

Tabla 4. *Comparación de resultados entre el modelo propuesto y el trabajo de Mohamed et al. [7].*

	Arquitectura	Exactitud (%)	F1 Benigno	F1 Maligno	F1 Normal
Mohamed et al. [7]	EOSA-CNN	93.21	0.4151	0.8947	0.8384
Propuesta	MobileNetV2	91.00	0.92	0.94	0.86

entre las que destacan CLAHE y la Transformada Discreta Wavelet, con la arquitectura MobileNetV2 para clasificar las imágenes en pulmones sin evidencia de cáncer, hallazgos benignos y malignos.

Los resultados obtenidos muestran que la propuesta alcanzó una exactitud del 91.0 %, evidenciando que MobileNetV2 constituye una alternativa competitiva frente a arquitecturas más complejas reportadas en la literatura para la clasificación de cáncer de pulmón. Asimismo, la comparación realizada con otros estudios permitió identificar que, aunque algunas arquitecturas profundas alcanzan valores de exactitud superiores, MobileNetV2 representa una alternativa atractiva debido a su menor complejidad computacional y su potencial aplicación en entornos con recursos tecnológicos limitados.

Como trabajo futuro se plantea la integración del modelo en sistemas de diagnóstico asistido por computadora, implementar la herramienta propuesta en el cómputo móvil, la ampliación del modelo para la clasificación de patologías pulmonares más específicas, la evaluación de su impacto clínico en escenarios reales y la validación de los resultados por especialistas en oncología y radiología pulmonar.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Osmar D. Arellano: investigación, conceptualización, metodología, software, experimentación y redacción. **Marco A. Ramos**: investigación, conceptualización, metodología, revisión, validación y redacción. **Vianney Muñoz**: investigación, conceptualización, metodología, revisión, validación y redacción.

Referencias

[1] A. L. Cajape-González, J. L. Ramírez-Vélez, and E. T. Fuentes-Sánchez, "Prevalencia y factores de riesgos del cáncer de pulmón: una enfermedad letal y silenciosa," *MQRInvestigar*, vol. 7, no. 1, pp. 2904–2928, 2023.

[2] S. B. T. Puente, D. G. Vera, Y. La O Jimenez, V. C. Torres, and M. L. Santana, "Necesidad de cuidados continuos en personas con cáncer de pulmón avanzado," *Revista Cubana de Enfermería*, vol. 39, 2023.

[3] S. M. Alzahrani, H. A. Al Doghaither, and A. B. Al-Ghafari, "General insight into cancer: an

overview of colorectal cancer (review)," *Molecular and Clinical Oncology*, vol. 15, no. 6, p. 271, Dec. 2021.

[4] A. M. N. Dolz, D. Á. Matos, L. C. Toledo, M. V. M. Peña, and A. G. Nazario, "Algunas especificidades en torno al cáncer de pulmón," *Revista Cubana de Medicina Militar*, vol. 50, no. 1, p. e0210725, 2021.

[5] P. Rajaram, B. Balkhande, A. Bhattad, N. B. Pokale, T. S. Bhosale, and S. Patil, "Implementation of convolutional neural networks for lung cancer detection from CT scans," *Frontiers in Health Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 230–246, 2024.

[6] O. Ukwandu, H. Hindy, and E. Ukwandu, "An evaluation of lightweight deep learning techniques in medical imaging for high precision COVID-19 diagnostics," *Healthcare Analytics*, vol. 2, p. 100096, 2022.

[7] M. T. I. A. Mohamed, O. N. Oyelade, and A. E. Ezugwu, "Automatic detection and classification of lung cancer CT scans based on deep learning and ebola optimization search algorithm," *PLOS ONE*, vol. 18, no. 8, p. e0285796, 2023.

[8] S. Raut, S. Patil, and G. Shelke, "Lung cancer detection using machine learning approach," *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering Trends (IJASRET)*, vol. 6, no. 1, pp. 47–51, Jan. 2021.

[9] M. A. Hamim, F. M. Tanmoy, U. Asha, M. Haq, M. Alam, and B. Ghosh, "Lung cancer detection using machine learning approach," in *Proc. IEEE Int. Conf. Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, 2023, pp. 2676–2682.

[10] L. Tiwari, V. Awasthi, R. Patra, R. Miri, H. Raja, and N. Bhaskar, "Lung cancer detection using deep convolutional neural networks," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2022, pp. 373–385.

[11] M. Ribeiro and P. Sousa, "Classification of lung cancer in medical imaging using convolutional networks with CLAHE preprocessing and wavelet transform," in *Anais do XV Workshop de Sistemas de Informação (WSIS)*, Rio Paranaíba, MG, Brazil, 2024, pp. 45–50.

[12] S. Wankhade and V. S. Vigneshwari, "A novel hybrid deep learning method for early detection of lung cancer using neural networks," *Healthcare Analytics*, vol. 3, p. 100195, 2023.

[13] J. P. Bocanegra-Valencia, L. V. Urrelo-Huiman, and S. E. Cieza-Mostacero, "Deep learning para la detección de cáncer de pulmón: una revisión sistemática de la literatura," *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação (RISTI)*, no. E75, pp. 160–174, Nov. 2024.

[14] S. C. Casadiego, K. Y. S. Mojica, K. Puerto, C. Niño, B. M. Delgado, and D. Guevara-Ibarra, "Efecto de los filtros morfológicos en los procesos de detección de objetos en movimiento," *Mundo FESC*, vol. 11, no. 21, pp. 87–95, 2021.

[15] M. E. L. López, R. O. Flores, A. A. G. Cuellar, K. G. Hidalgo, and E. J. H. Nava, "De lo bidimensional a lo tridimensional: filtros para la caracterización morfológica y reconstrucción 3D," *Revista CiBIyT*, vol. 19, no. 55, p. 37, 2024.

[16] J. Zheng, Y. Gao, H. Zhang, Y. Lei, and J. Zhang, "OTSU multi-threshold image segmentation based on improved particle swarm algorithm," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 22, p. 11514, 2022.

[17] C. Huang, X. Li, and Y. Wen, "An otsu image segmentation based on fruit fly optimization algorithm," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 183–188, 2021.

[18] B. G. Chepino, R. R. Yacoub, A. Aula, M. Saleh, and B. W. Sanjaya, "Effect of minmax normalization on ORB data for improved ANN accuracy," *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, vol. 11, no. 2, p. 29, 2023.

[19] G. Ferreira, L. Ishiuchi, L. Teixeira, E. Oliveira, and W. D. Parreira, "Aprimoramento da classificação de linfócitos e monócitos em imagens médicas: o impacto do CLAHE em redes neurais convolucionais," in *Anais do Computer on the Beach*, vol. 16, 2025, pp. 199–212.

[20] M. V. D. dos Reis and P. M. de Sousa, "Quality assessment of coffee beans using convolutional neural networks with wavelet and CLAHE techniques," in *Anais do XV Workshop de Sistemas de Informação (WSIS)*, Rio Paranaíba, MG, Brazil, 2024, pp. 33–38.

[21] K. Bhatt, T. Kumar, S. Hassan, and S. Kimothi, "2D discrete wavelet transformation (2D-DWT) for nanoscale morphological analysis," *Prabha Materials Science Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 140–153, 2023.

[22] K. Ding, Z. Niu, J. Hui, X. Zhou, and F. T. S. Chan, "A weld surface defect recognition method based on improved MobileNetV2 algorithm," *Mathematics*, vol. 10, no. 19, p. 3678, 2022.

[23] R. Indraswari, R. Rokhana, and W. Herulambang, "Melanoma image classification based on MobileNetV2 network," *Procedia Computer Science*, vol. 197, pp. 198–207, 2022.

[24] X. Deng, M. Shi, B. Khan, Y. H. Choo, F. Ghaffar, and C. P. Lim, "A lightweight CNN model for UAV-based image classification," *Soft Computing*, vol. 29, no. 4, pp. 2363–2378, 2025.

[25] C. E. D. Vanegas, J. C. G. Mejía, F. A. V. Agudelo, and D. E. S. Durán, "A representation based on essence for the CRISP-DM methodology," *Computación y Sistemas*, vol. 27, no. 3, pp. 675–689, 2023.

[26] H. Alyasriy and M. AL-Huseiny, "The IQ-OTHNCCD lung cancer dataset," Mendeley Data, 2021.

[27] S. G. Armato III, L. Hadjiiski, G. D. Tourassi, K. Drukker, M. L. Giger, F. Li, G. Redmond, K. Farahani, J. S. Kirby, and L. P. Clarke, "SPIE-AAPM-NCI lung nodule classification challenge dataset," The Cancer Imaging Archive, 2015.

[28] P. P. Malla, S. Sahu, and A. I. Alutaibi, "Classification of tumor in brain MR images using deep convolutional neural network and global average pooling," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 679, 2023.

[29] A. V. Morozov, V. L. Levkivskyi, and D. D. Plechystyy, "Activation functions in neural networks: overview and comparison," *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 35, no. 3, pp. 144–151, 2024.

[30] I. Salehin and D.-K. Kang, "A review on dropout regularization approaches for deep neural networks within the scholarly domain," *Electronics*, vol. 12, no. 14, p. 3106, 2023.

[31] R. O. Ogundokun, S. Misra, A. O. Akinrotimi, and H. Ogul, "MobileNet-SVM: a lightweight deep transfer learning model to diagnose BCH scans for IoMT-based imaging sensors," *Sensors*, vol. 23, no. 2, p. 656, 2023.

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Adaptación de una cámara RGB para la visualización relativa del espectro UV cercano mediante filtro ZWB3

RGB camera adaptation for relative near-UV spectral visualization using ZWB3 filter

G. E. Balmori-Vera[1], I. Herrera-Aguilar[2] *, J. P. Rodríguez-Jarquin[3], B. E. Gonzáles-Sánchez[4], G. Águila-Rodríguez[5]
(*ignacio.ha@orizaba.tecnm.mx)

Recibido: 30 de abril de 2026 Aceptado: 18 de junio de 2026

Resumen

Cuando se habla de visión artificial generalmente las opciones accesibles están limitadas al espectro visible (VIS) y el infrarrojo (IR), esto debido al alto costo y poca accesibilidad en las cámaras especializadas en el espectro ultravioleta. Por esto se realizaron modificaciones en el sensor óptico CMOS OV2710, para mejorar la respuesta espectral relativa en el rango ultravioleta (UV) cercano (300 a 400nm) mediante la sustitución del filtro de corte UV/IR por un filtro excitador UV ZWB3. La metodología experimental se realizó en un ambiente controlado, empleando una botella de agua tónica como objeto de prueba de fluorescencia UV conocida, iluminada con una lámpara de luz negra de 9 W. La métrica de evaluación utilizada fue la luminancia media de la región de interés calculada mediante conversión a escala de grises. Los resultados muestran que la cámara modificada registró una luminancia media de 39.54 (a 100 μs de exposición), correspondiente a la respuesta relativa de la iluminación UV cercana incidente, mientras que la cámara sin modificar registró 90.89, valor que refleja la emisión fluorescente visible generada por la quinina del agua tónica. La diferencia entre ambas respuestas demuestra que la modificación permite discriminar la iluminación UV directa de la emisión visible secundaria, constituyendo una herramienta de bajo costo

[1]Estudiante de Maestria En Ingenieria en Electronica, Instituto Tecnologico de México Campus Orizaba , Orizaba, México.
[2]Doctor en Sistemas Autómaticos, Instituto Tecnologico de México Campus Orizaba , Orizaba, México.
[3]Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
[4]Doctora en Ciencias de la Ingeniería
[5]Doctor en Ciencias en la Espcialidad de Ingeniería Eléctrica

aplicable en contextos donde se requiera detectar la presencia de radiación UV cercana de manera cualitativa y relativa.

Palabras clave: Ultravioleta Cercano, Filtro Óptico, Sensor CMOS, Visión Artificial

ABSTRACT

When discussing computer vision, accessible options are generally limited to the visible (VIS) and infrared (IR) spectra due to the high cost and limited availability of cameras specialized for the ultraviolet (UV) spectrum. Therefore, modifications were performed on an OV2710 CMOS optical sensor to improve its relative spectral response in the near-ultraviolet (UV) range (300–400 nm) by replacing the original UV/IR-cut filter with a ZWB3 UV-pass filter. The experimental methodology was conducted in a controlled environment using a bottle of tonic water as a test object with known UV-induced fluorescence, illuminated by a 9 W black-light lamp. The evaluation metric was the mean luminance of the region of interest, calculated after grayscale conversion. The results show that the modified camera recorded a mean luminance value of 39.54 (at an exposure time of 100 μs), corresponding to the relative response to the incident near-UV illumination. In contrast, the unmodified camera recorded a mean luminance value of 90.89, reflecting the visible fluorescent emission generated by the quinine present in the tonic water. The difference between these responses demonstrates that the modification enables discrimination between direct UV illumination and secondary visible fluorescence emission, providing a low-cost tool applicable in contexts where qualitative and relative detection of near-ultraviolet radiation is required.

Keywords: Near Ultraviolet, Optic Filter, CMOS Sensor, Artificial Vision

INTRODUCCIÓN.

Las cámaras modernas comúnmente utilizadas para diversas aplicaciones, entre ellas la visión artificial, están limitadas en el rango del espectro visible (385 a 750 nm) por un filtro de corte ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR). La necesidad de este límite viene por la sensibilidad que tienen a los espectros vecinos al visible (UV e IR), los cuales pueden provocar desde distorsiones ópticas y cromáticas en las imágenes capturadas, hasta daños en los receptores de las cámaras, degradando la vida útil de las mismas, como se ve en los trabajos de *Crowther* [1], centrados en la selección de los filtros correctos en la fotografía de fluorescencia ultravioleta. Por esto, tomando como base trabajos de *Fujita et al.* [2] y de *Siles et al.* [3], los cuales se basan en la modificación de sensores ópticos CMOS para la visualización más amplia del espectro electromagnético y la caracterización en degradación de los receptores ópticos por el espectro UV, se realizó la adaptación de una cámara CMOS RGB para tener una visión relativa centrada en el

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28091 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 96- 109

espectro UV cercano (300 a 400nm), con la intención de limitar la degradación de los receptores por el impacto de fuentes más intensas de UV (menores a 200 nm), pero aun así permitir la obtención de señales del espectro. Señalando que la respuesta obtenida constituye una aproximación relativa, pues es influenciada por la transmitancia del filtro empleado y la fuga IR inherente al sensor, por lo que los resultados no representan una medición espectral calibrada, sino un índice relativo de detección.

Se comparó el efecto de la modificación contra una cámara del mismo modelo sin modificar, evaluando la respuesta visual y la relativa por cada canal (R, G, B) con respecto a lo informado por *Tucsen* [4] el pico mayor de eficiencia cuántica se encuentra en la región consistente entre el verde y amarillo (490 a 600nm) esto debido al filtro de color bayer (Figura1) el cual es se encarga de separar la luz incidente en los colores primarios (RGB) tiene una mayor cantidad de receptores para el color verde (G) lo cual centra los colores de la región visible del espectro, por lo que el cambio de este pico ayudara a entender el alcance de la modificación.

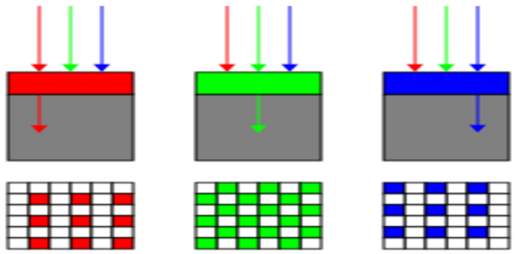


FIGURA 1. *Filtro-Color Bayer*

Esta experimentación ayudará a conseguir apoyo al realizar experimentaciones con el espectro ultravioleta, las cuales tienen a verse limitadas por los altos costos y la dificultad de obtención en sensores ópticos especializados aun así estas investigaciones son importantes para diversas áreas de desarrollo como lo presentan los trabajos de *Excelitas Technologies* [5] en el 2023 donde se describe su importancia y cómo permite la detección de componentes orgánicos e inorgánicos mediante la absorbencia de los materiales; de *Wojtowicz et al.* [6] y de *Du et al.* [7] en el 2024 y 2026 respectivamente, tiene aplicaciones en el área de la medicina, para problemas dermatológicos y para aplicaciones en supervisión de pacientes; y de *Stoddart et al.* [8] en los cuales la fotografía UV se utiliza en la ciencia forense para la detección de huellas dactilares latentes.

Materiales y métodos.

Selección de materiales.

En la experimentación los dos elementos más importantes que van a influir en el resultado del mismo son el sensor óptico, o cámara, y el filtro excitador. Con respecto al sensor, se seleccionó el OV2710 de



(a) *Cámara OV2710 de OmniVisión$_{TM}$.* (b) *Filtro Excitador UV ZWB3*

FIGURA 2. *Fotografía de los materiales utilizados.*

OmniVision$_{TM}$ (Figura 2a) principalmente al ser un sensor de gamma media altamente accesible y como se puede apreciar en la Tabla 1 es un sensor óptico de tipo CMOS con tamaño de pixel definido lo cual gracias a la investigación de *Gounela et al.* [9] se conoce que la respuesta espectral estos sensores es similar siempre que los pixeles sean tamaños similares.

Tabla 1. Especificaciones del Sensor Óptico OV2710.

Parámetros	**Valores**
Tipo	CMOS
Resolución	1920 × 1080 (captura a 640 × 480)
Frecuencia Max.	30Hz
Tamaño de Pixel	3 μm × 3 μm
Sensitividad	3300 mV/lux-sec
Rango Dinámico	69 dB
Formato de píxel	YUYV 4:2:2

El conocer la respuesta espectral de la cámara es importante a la hora de entender como reaccionará el sensor ante la incidencia de luz, en el caso del OV2710 al ser una cámara a color, implica que la luz pasara por un sistema de filtro-color tipo bayer, el cual separara la incidencia de luz en 3 canales, cada uno correspondiente a un color primario (R, G, B). Por lo que las curvas de respuesta espectral identifican es la eficiencia cuántica según el tamaño de longitud-onda y es definida en el libro *CMOS Photodetectors* [10] como la probabilidad de que el fotón incidente generara un par electrón-agujero que contribuya a la detección y como se puede ver en la Ec. (1) que la respuesta del sensor es directamente proporcional a la eficiencia cuántica medida.

$$R = \frac{q}{hv}\phi \tag{1}$$

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28091 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 96- 109

Donde R es la respuesta del sensor, q es la carga del electrón, h es la constante de Planck, v es frecuencia del fotón y ϕ es la eficiencia cuántica.

Por lo tanto al referirse la Figura 3 en este sensor se muestra en el canal azul (B) una respuesta en la eficiencia cuántica correspondiente al rango UV cercano implicando la capacidad de respuesta y por lo tanto visión. Mientras que el canal rojo (R) presenta una ligera excitación en lo que corresponde con el IR cercano, dejando al canal verde (G) como el canal más centrado en el espectro VIS. Generalmente son estos alcances en los espectros UV e IR los cuales son suprimidos con un filtro de corte IR/UV que son añadidos en las cámaras comerciales para mantener imágenes limpias, pero para nuestro caso de estudio, estos solapes, en especial el del canal azul, son justamente un punto de interés del cual partir.

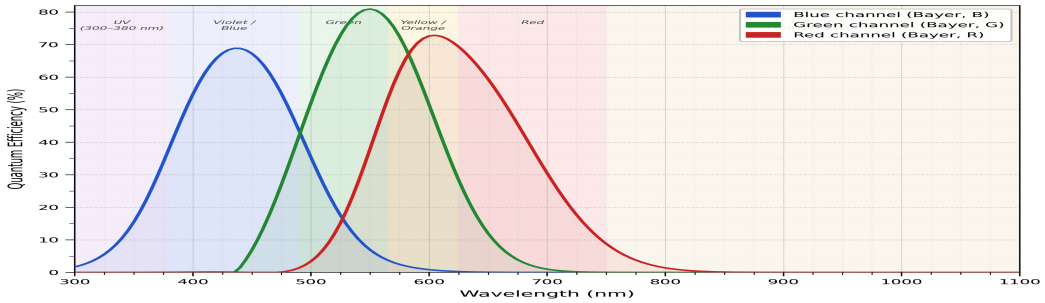


FIGURA 3. *Curva de Respuesta Espectral Relativa por Canal del Sensor OV2710 CMOS según modelo por Fujita et al. [2].*

Para obtener la mejor visión en el espectro UV cercano, el canal B da la región necesaria pero también se debe eliminar la mayor intromisión del espectro VIS para mantener la señal en el rango que se necesita. Esto logrado utilizando el filtro excitador UV ZWB3 (Figura 2b), este filtró perteneciente a la familia de filtros ZWB, se encargan principalmente de bloquear el paso de la luz en el espectro VIS y permitir el libre paso de los espectros IR e UV, el efecto del paso de la luz por esta familia de filtros esta dado en la Figura 4 donde se mide la transmitancia de 200 a 2500 nm. En la gráfica se puede apreciar que el filtro ZWB2 tiene la mejor respuesta en el espectro UV, viendo que tiene la menor transmitancia en el espectro IR, pese a esto la elección de utilizar el filtro ZWB3 viene en que posee una mayor transmitancia en el espectro UV y aunque permite un paso mayor de IR, recordando la Figura 3 se nota que en el canal B no hay efecto en la región IR, por lo que nos permite garantizar el mayor efecto en el rango UV sin necesidad de comprometer la señal registrada considerando un uso en ambientes no controlados.

Protocolo Experimental.

Con el fin de garantizar la reproducibilidad del experimento y limitar el efecto de las variables ambientales, el proceso experimental se realizó en una cámara oscura construida con una caja forrada interiormente con papel negro, eliminando las fuentes de luz externas. Ambas cámaras utilizadas, junto

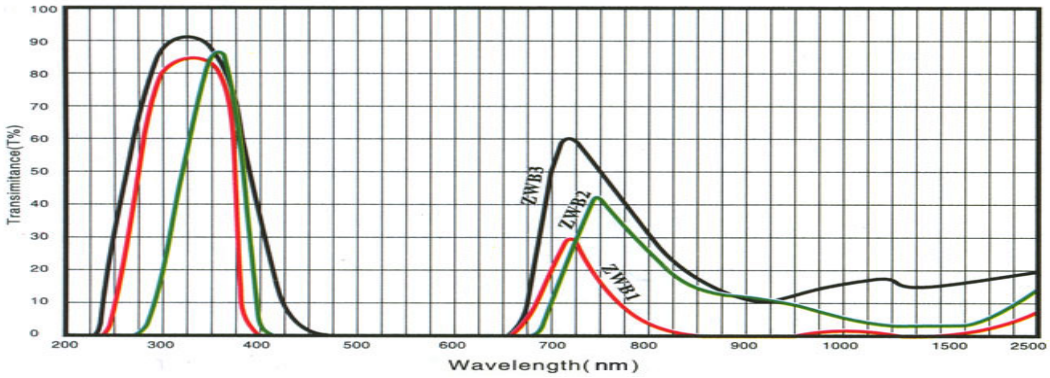


FIGURA 4. *Curvas de Respuesta Espectral de la Familia de Filtros ZWB* Segun Datos del Fabricante.*

con la fuente de iluminación, se posicionaron a aproximadamente 50cm del objeto de prueba. En la Tabla 2 está el concentrado de los parámetros utilizados durante la captura de datos.

El objeto de la prueba fue una botella de agua tónica, cuya fluorescencia UV está bien documentada en la literatura [11]. La quinina contenida en el agua tónica absorbe la radiación en el rango UV cercano y esta misma es emitida como luz visible azul (en el rango 450 nm), por lo que permite distinguir dos tipos de respuesta: la cámara sin modificar captura la emisión fluorescente visible secundaria generada por la quinina, mientras que la cámara modificada con el filtro ZWB3, al bloquear el espectro visible, responde a la iluminación UV cercana.

La luminancia media de la región de interés fue calculada para cada fotograma mediante OpenCV. Este valor se usó como indicador cuantitativo de la respuesta relativa de cada cámara ante la misma condición de iluminación. Analizando múltiples fotogramas para garantizar la estabilidad de la medición.

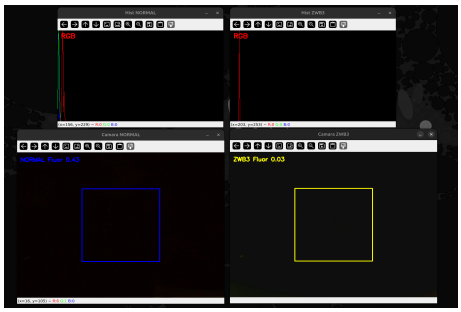


FIGURA 5. *Medición de línea base en cámara oscura.*

Modificación de la cámara.

El proceso de modificación se divide en dos pasos principales, primero como se ve en la Figura 5 el filtro de corte IR/UV se encuentra en el lente de la cámara en lugar de estar colocado sobre la superficie

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28091 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 96- 109

Tabla 2. Parámetros de configuración de las cámaras.

Parámetros	**Valores**
Resolución de captura	640 × 480
Modo de exposición	Manual
Tiempo de exposición	100μs y 78 μS
Balance de blancos	Desactivado
Temperatura de color	4080K
Ganancia	0
Brillo	0
Frecuencia	30fps
Fuente UV	Lámpara de luz negra (9 W)

del sensor, simplificando el paso. En caso de que el filtro se encontrará sobre la superficie del sensor, el proceso seria más complicado porque se tendría el riesgo de dañar la superficie del filtro-color bayer en el caso de las cámaras a color, y se dañaría los receptores del sensor en el caso de una cámara monocromática.



FIGURA 6. *Filtro de Corte IR/UV Colocado en el Lente de la Cámara.*

Después de haber removido el filtro de corte IR/UV se siguió con la instalación del filtro, en este casó la opción de colocarse sobre el sensor directamente o en el lente, como se ve en la Figura 7 el filtro fue colocado sobre el lente, esto por la alteración que tiene el filtro considerando su indice de difracción,

haciendo que el foco de la imagen quede distorsionado por las capas extra, por otro lado al colocarse sobre el lente, ajustar el foco visual es más simple debido a la facilidad de ajuste, disminuyendo el efecto de difracción.



FIGURA 7. *Mismo Lente de la Figura 6 con el Filtro Excitador UV ZWB3.*

Comparativa visual.

Se aprecia en la Figura 8 una imagen comparativa de una escena captada con ambas cámaras de manera simultanea, en la imagen con el filtro aplicado se ve predominancia de tonos azules/violetas, mostrando el efecto que tuvo el filtro en suprimir el paso de los colores rojos y verdes, lo cual pese a ser una demostración del efecto que genero el filtro sobre la cámara, esto no implica qué sea una visión del UV cercano.



FIGURA 8. *Comparativa de Escena Entre la Cámara Modificada y Sin Modificar.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Análisis de dispersión espectral.

Presentado en la Figura 8 existe una diferencia significativa entre la visión dada por la cámara normal y la modificada. En esta existe además del espectro UV cercano, una fuerte influencia IR, dada por la transmitancia propia del filtro, en la grafica de dispersión mostrada por la Figura 9 se nota la respuesta

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28091 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 96- 109

espectral de las cámaras donde en la normal al recibir datos del espectro VIS se nota una mayor dispersión en las intensidades de los pixeles, mientras que en la del filtro estos están mejor alineados demostrando que la respuesta espectral es de espectro reducido. Se nota también como esta dispersión está más prominente en el canal R, es decir, hay una influencia generada por el efecto de fuga IR, la cual hace que el sensor además de recibir señales del UV cercano, esta fuertemente influenciado por el espectro IR.

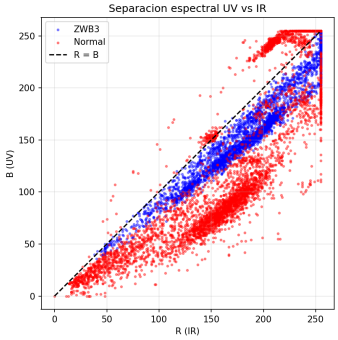


FIGURA 9. *Gráfica de Dispersión Entre La Señal del Canal B y La señal del canal R para las Cámaras.*

Índice espectral relativo B/R.

Para poder entonces tener una imagen limpia, donde se tenga una vista relativa del espectro UV cercano más limpia, se calculó la relación entre los datos del canal B, el cual mide la respuesta espectral de ondas cortas y el canal R que mide la respuesta espectral de ondas grandes. Esta relación se entiende como el índice espectral relativo, permite atenuar la influencia de la fuga IR y resaltar contribución de la respuesta espectral UV cercana del sensor [12]. Los datos de las cámaras procesados para la obtención de una curva espectral se aprecian en al Figura 10 donde se nota que la cámara con el filtro logró proveer una respuesta elevada y estable en comparación a la normal incluso a pocas intensidades, mostrando la recepción de espectros fuera del rango visible.

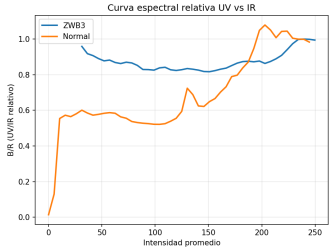


FIGURA 10. *Comparación de Curva Espectral Relativa B/R.*

Entonces se puede hacer un procesamiento digital donde en lugar de formar la imagen mediante los datos de cada canal, esta se forma utilizando la relación B/R, esta métrica al ser relativa, en lugar de formar la imagen como una construcción de pixeles, esta se forma como un mapa de calor, en donde los puntos calientes representan el mayor impacto del canal B en relación del canal R, es decir, presentan los puntos de mayor efecto UV cercano como se ve en la Figura 11.

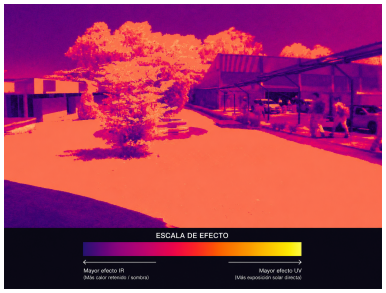


FIGURA 11. *Imagen de relación B/R como mapa de calor.*

Validación.

Con el fin de corroborar la capacidad de la cámara modificada, se realizó una segunda serie de experimentos en un ambiente más controlado, utilizando una botella de agua tónica como objeto de prueba. En la Tabla 3 se muestra un concentrado de la luminancia media obtenida en ambos conjuntos de captura.

Tabla 3. Comparativa de resultado de luminancia entre cámaras.

Condición	**Exposición**	**Cámara Normal**	**Cámara ZWB3**
Escena oscura	$100\mu s$	-0.48	-0.02
Agua Tónica bajo UV	$100\mu s$	90.89	39.54
Escena oscura	$78\mu s$	0.43	0.03
Agua Tónica bajo UV	$78\mu s$	86.84	34.68

Los valores de línea base cercanos a cero confirman que el ambiente oscuro eliminó la interferencia ambiental. Ante la presencia de una fuente de luz ultravioleta, ambas cámaras registraron una respuesta mayor, sin embargo las diferencias en estas respuestas son importantes. En la Figura 12 se aprecia

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28091 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 96- 109

como en la cámara sin modificar se registró el efecto de la emisión fluorescente visible generada por la quinina al absorber la radiación UV, mientras que en la cámara modificada, se registró un valor menor dado porque el filtro eliminó el efecto de la luz visible, permitiendo una visualización relativa de la luz ultravioleta que incide en la botella.

Esta distinción, sobre el efecto del filtro, es significativa, pues la cámara normal solo logra captar un efecto secundario, que es la emisión visible de energía, mientras que la cámara modificada logró captar el fenómeno causante, es decir, demostrar la incidencia de luz ultravioleta.

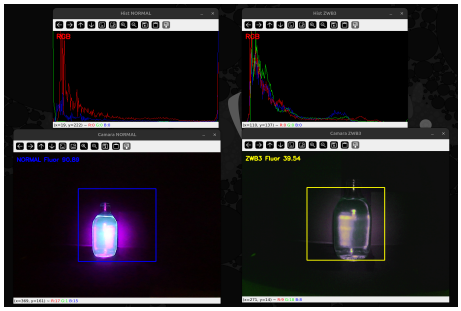


FIGURA 12. *Comparativa de Respuesta Ante Agua Tónica Bajo Iluminación UV.*

Comparaciones con semejantes.

Los resultados siguen corrientes como las de *Bhatt el al.* [13] los cuales de igual manera quisieron presentar una alternativa ante la problemática de tener un sensor espectral en rango UV, la diferencia principal viene en las corrientes que se usaron para alcanzar la meta, mientras que ellos adaptaron un equipo comercial a uno de alto nivel mediante alteraciones especializadas al sensor mismo, este trabajo está basado en mantener la accesibilidad comercial pese a las limitantes que eso implica. De manera similar *Tohuvavohu et al.* [14] presentaron un sistema UV compacto de bajo costo basado en sensores CMOS para aplicaciones astronómicas, confirmando la viabilidad de estos sensores para la imagen fuera del espectro visibles pese a ser fuera del enfoque para este estudio.

Por otro lado, *Crowther* [15] demostró que la conversión de cámaras estándar mediante la remoción del arreglo de filtros de color produce cambios medibles y cuantificables en la respuesta relativa hacia los rangos UV e IR, confirmando que las modificaciones físicas al sistema óptico de sensores CMOS comerciales son una vía viable para extender su respuesta más allá del espectro visible. Esta observación es consistente con los resultados de la Figura 10, donde la cámara modificada presentó una respuesta elevada y estable en el índice B/R, indicando la recepción consistente de señales fuera del espectro visible.

Conclusiones y futuras líneas de investigación.

La modificación del sensor OV2710 mediante la remoción del filtro de corte IR/UV y la aplicación del filtro excitador ZWB3 demostró ser una solución viable, de bajo costo y práctica, para obtener una respuesta asociada al rango UV cercano, constituyendo una alternativa accesible ante cámaras más especializadas. Los resultados obtenidos en el experimento controlado confirman la capacidad de la modificación en visualizar de manera directa el efecto de una fuente de luz UV.

Sin embargo, el método presenta limitaciones claras que deben ser consideradas. La ausencia de calibración con sensores de referencia patrón impiden asegurar valores reales de la longitudes de onda visualizadas. Adicionalmente la fuga IR inducida por el filtro ZWB3 introduce una influencia en el canal R, lo que limita la pureza de la señal recibida en ambientes no controlados. Por esto mismo, los resultados son meramente aproximaciones relativas.

Para futuras líneas de trabajo se propone principalmente la incorporación de un filtro de corte IR adicional al ZWB3 para reducir el efecto de fuga IR y mejorando la respuesta espectral UV; y realizar más pruebas en ambientes controlados y sin controlar con sensores de referencia espectral, permitiendo cuantificar la sensibilidad producida por la modificación.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Gabriel Eduardo Balmori Vera: Conceptualización, Metodología, Software, Redacción, Investigación. **Ignacio Herrera Aguilar**: Verificación, Redacción - Revisión y Edición. **José Pastor Rodríguez Jarquin**: Investigación, Verificación. **Blanca Estela Gonzáles Sánchez**: Supervisión, Redacción - Edición. **Gerardo Águila Rodríguez**: Software, Validación.

Referencias

[1] J. Crowther, “Ultraviolet fluorescence photography—choosing the correct filters for imaging,” *Journal of Imaging*, vol. 8, no. 6, p. 162, 2022. DOI: 10.3390/jimaging8060162. [Online]. Available: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9224984/

[2] K. Fujita *et al.*, “An optical filter-less CMOS image sensor with differential spectral response pixels for simultaneous UV-selective and visible imaging,” *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 13, 2020. DOI: 10.3390/s20010013. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/13

[3] P. Siles and D. Gäbler, “Quantification of uv light-induced spectral response degradation of cmos-based photodetectors,” *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 456, 2024. DOI: 10.3390/s24020456

[4] Tucsen Photonics, “Quantum efficiency in scientific cameras: A beginner’s guide,”

2025, technical educational article. [Online]. Available: https://www.tucsen.com/learning/quantum-efficiency-in-scientific-cameras/

[5] E. Technologies, "Understanding camera-based ultraviolet imaging and applications," https://www.excelitas.com/sites/default/files/2023-01/PCO_WhitePaper_Understanding%20Camera-Based%20Ultraviolet%20Imaging%20and%20Applications.pdf, 2023, white Paper.

[6] I. Wojtowicz and M. Żychowska, "Application of Ultraviolet-Enhanced Fluorescence Dermoscopy in Basal Cell Carcinoma," *Cancers*, vol. 16, no. 15, p. 2685, 2024. DOI: 10.3390/cancers16152685

[7] H. Du, Y. Wang, R. Zhang, M. Olivo, and R. Bi, "Ultraviolet Sensing-Guided Biomedical Systems: From Label-Free Imaging to Dosimetry and Therapy Feedback," *Biosensors*, vol. 16, no. 6, p. 322, 2026. DOI: 10.3390/bios16060322

[8] W. Stoddart, K. Georgiou, P. Deacon, L. Nichols-Drew, and K. J. Farrugia, "Technical Note: A Preliminary Assessment of UV-C Imaging Using the Full Spectrum Imaging System (FSIS-II) for the Detection of Latent Fingermarks," *Forensic Science International*, 2024. DOI: 10.1016/j.forsciint.2024.111945. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073824000264

[9] R. Gounella, G. M. Ferreira, M. L. M. Amorim, J. N. Soares, and J. P. Carmo, "A review of optical sensors in cmos," *Electronics*, vol. 13, no. 4, 2024. DOI: 10.3390/electronics13040691. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/13/4/691

[10] A. H. Titus, M. C.-K. Cheung, and V. P. Chodavarapu, "Cmos photodetectors," in *Photodiodes - World Activities in 2011*, J.-W. Park, Ed. London: IntechOpen, 2011, ch. 4.

[11] A. Harcher, C. Ricard, D. Connolly, I. Gibbs, J. Shaw, J. Butler, J. Perschbacher, L. Replogle, M. Eide, M. Grissom, O. O'Neal, Q. Nguyen, V. H. Nguyen, M. Hunnicutt, R. Mahmoud, and S. Dhakal, "Fluorescence Analysis of Quinine in Commercial Tonic Waters," *Methods and Protocols*, vol. 8, no. 1, p. 5, 2025. DOI: 10.3390/mps8010005

[12] J. Zhang, R. Su, Q. Fu, W. Ren, F. Heide, and Y. Nie, "A Survey on Computational Spectral Reconstruction Methods from RGB to Hyperspectral Imaging," *Scientific Reports*, vol. 12, p. 11905, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-16223-1

[13] N. Bhatt *et al.*, "High-performance modular and compact camera for ultraviolet instrumentation," in *Proceedings of SPIE*, vol. 11755, 2021, p. 1175503. DOI: 10.1117/12.2582215

[14] A. Tohuvavohu, M. Barnet, S. Chen, C. Damaren, M. Drout, J. Empey, J.-C. Fronteddu, B. Gail, A. Gill, G. Hay, S. Jeram, C. Matzner, P. Nkwari, D. Patel, E. Seabrook, M. Shaaban, S. Sivanandam, J. Taylor, and P. Van-Lane, "LUVCam the Little Ultraviolet Camera: a low-cost high-performance UV CMOS camera," in *Proc. SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray*, vol. 13093, 2024, p. 130930P. DOI: 10.1117/12.3020037

[15] J. Crowther, "Monochrome camera conversion: Effect on sensitivity for multispectral imaging (ultraviolet, visible, and infrared)," *Journal of Imaging*, vol. 8, no. 3, p. 54, 2022. DOI: 10.3390/jimaging8030054

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Simulación de la separación de isoamil acetato, de baja concentración, de una mezcla acuosa

Simulation of low concentrated isoamyl acetate separation from an aqueous mixture

Z. Gerónimo-Valencia[1] , C. Conde-Mejía[1] *, L. M. Valenzuela-Gómez[1]
(*carolina.conde@ujat.mx)

Recibido: 27 de abril de 2026 Aceptado: 19 de junio de 2026

Resumen

La preferencia de consumo de compuestos naturales ha impulsado el desarrollo de métodos sustentables para su obtención. La fermentación es uno de los procesos biotecnológicos con mayor potencial para obtener compuestos naturales que se destinen a las industrias alimenticia, cosmética y farmacéutica. Sin embargo, en la fermentación los productos de interés resultan en muy baja concentración en el medio acuoso. Entre estos compuestos figura el isoamil acetato (IA), un éster con olor a plátano. Este compuesto posee una baja solubilidad en agua, pero al encontrarse en muy baja concentración en el medio acuoso, una alternativa para su separación sería recurrir al uso de solventes. Además, para mantener el origen natural del compuesto el solvente a su vez debería provenir de fuentes naturales, lo que puede complicar y elevar los costos del proceso de separación. Es por ello que en este trabajo se ha propuesto diseñar un proceso eficiente para recuperar y purificar isoamil acetato de un medio acuoso evitando el uso de solventes. Se simuló un proceso en Aspen Plus V.14, que incluye desorción con aire, condensación y destilación. La columna de desorción con 8 etapas de equilibrio y flujo mínimo de aire de $585\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ alcanzó una recuperación del 99.7 % de IA; mientras que, en la columna de destilación con 6 etapas de equilibrio se mejoró la pureza al 99.1 %. El consumo energético total se cuantificó en $3{,}046\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ de producto. La propuesta evita el uso de solventes químicos y se obtienen una alta recuperación y una alta pureza del compuesto de interés.

Palabras clave: *Isoamil acetato, simulación de procesos, esteres volátiles, separación sustentable*

[1]Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez. Carretera estatal libre Villahermosa-Comalcalco km 27 S/N, Ranchería Ribera Alta, C.P. 86205. Jalpa de Méndez, Tabasco, México.

Abstract

The consumer preference for natural compounds has driven the development of sustainable methods for their production. Fermentation is one of the greatest potential biotechnological processes for obtaining natural compounds, that can be used in food, cosmetic, and pharmaceutical industries. However, in fermentation, the interest products are regularly found in very low concentrations in the aqueous medium. Among these compounds is isoamyl acetate (IA), an ester with a banana odor. This compound has low water solubility; however, when IA is at very low concentrations in the aqueous medium, one alternative for its separation would be the use of solvents. Furthermore, to maintain the natural origin of the compound, the solvent should come from natural sources, which can complicate the separation process and increase costs. Therefore, this work proposes the design of an efficient process to recover and purify isoamyl acetate from an aqueous medium without solvents use. An integrated system was simulated in Aspen Plus V.14, including air desorption, condensation and distillation. The desorption column with 8 equilibrium stages and a minimum air flow rate of $585\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ achieved a recovery of 99.7 %, while the distillation column with 6 equilibrium stages improved the purity to 99.1 %. The total energy consumption was quantified at $3{,}046\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ of product. This proposal avoids the use of chemical solvents, offering a viable alternative for sustainable processes.

Keywords: *Isoamyl acetate, Process simulation, Volatile esters, Sustainable separation*

Introducción

En la actualidad, muchos procesos industriales destinados a la extracción o purificación de compuestos naturales siguen dependiendo del uso de sustancias inorgánicas o disolventes tóxicos. Esto no solo representa un riesgo para el medio ambiente, sino también para la salud de quienes consumen o manipulan estos productos [1]. Por otro lado, la demanda global de aromas de origen natural sigue creciendo debido a regulaciones alimentarias más estrictas, como las implementadas por la Unión Europea (EC 1334/2008) y la *Food and Drug Administration* en Estados Unidos (21-CFR 101.22), que promueven el uso de saborizantes de origen biológico [2, 3]. El isoamil acetato (IA) conocido como "aceite de plátano" es una sustancia con aroma dulce y frutal a plátano que se utiliza ampliamente en la industria de alimentos, bebidas y fragancias [4]. De acuerdo con la página *EMERGEN RESEARCH*, para Estados Unidos se estimó un valor de mercado de este compuesto de 528.4 millones de dólares en 2025, y se prevé un crecimiento del 3.7 % anual hasta 2035 [5]. Por ello, es de interés desarrollar métodos más naturales y sostenibles para su producción.

Los procesos biotecnológicos como la fermentación son una alternativa para producir esteres volátiles como el isoamil acetato, usando levaduras [6]. Sin embargo, uno de los principales retos

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28056 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 110- 120

que presenta su obtención por fermentación es la baja concentración resultante [7]; ya que complica la separación y purificación del producto final. Existen propuestas basadas en el uso de solventes eutécticos profundos (DESs, por sus siglas en inglés) como agentes extractores considerados "verdes". No obstante, estudios recientes han revelado que algunos DESs pueden presentar toxicidad significativa y baja biodegradabilidad, lo cual pone en duda su sustentabilidad real [1]. Esto resalta la necesidad de utilizar procesos físicos más limpios, como la desorción, que permiten recuperar compuestos sin recurrir a productos químicos adicionales [8].

La desorción es un proceso que consiste en liberar un compuesto desde una superficie o fase líquida mediante medios físicos como el calor, vacío, agitación o contacto con una fase gaseosa, sin alterar su estructura o generar residuos [9]. Una de las aplicaciones de este proceso que ha tomado relevancia en la industria de bebidas es la elaboración de cerveza sin alcohol; una vez que termina la fermentación, el alcohol que se encuentra en baja concentración se remueve del medio [10]. La desorción por contacto con una fase gaseosa a escala industrial puede realizarse en columnas empacadas para favorecer la transferencia de masa del soluto desde el líquido al gas; estas columnas se conocen como *stripping*. Las técnicas de desorción térmica o el *stripping* con gases purgantes son especialmente adecuadas para compuestos aromáticos volátiles como el isoamil acetato, porque usan condiciones de operación suaves que evitan que el producto se dañe [11].

Este trabajo presenta el diseño de un proceso para la separación y purificación de IA, a partir de una mezcla acuosa que representa la salida de una fermentación, usando como primera operación unitaria la desorción. Se utiliza aire como fase gaseosa, que entra en contacto con la mezcla, para arrastrar el éster; seguido de otras operaciones unitarias, como la condensación y destilación para concentrar y purificar el compuesto. Para el diseño del proceso se emplea un enfoque de simulación usando Aspen Plus V.14. Este simulador es de tipo modular, determinista y la operación del proceso se encuentra en estado estable.

Materiales y Métodos

El proceso diseñado para separar el IA incluye dos secciones principales: una de separación y otra de purificación. La alimentación al proceso está compuesta por un flujo másico de $5{,}000\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ de una mezcla de agua, etanol e IA, con una composición porcentual en peso de 2.5 % de etanol y 0.9 % de IA. De acuerdo con los trabajos experimentales, la concentración de IA a la salida del proceso de fermentación varía de acuerdo con el tipo de sustrato usado y las condiciones del proceso empleadas [12–14], por lo que la composición propuesta en este trabajo corresponde a un valor entre el rango de concentraciones reportadas.

Para la predicción de las propiedades termodinámicas de los compuestos dentro del simulador, se definió el método termodinámico NRTL-HOC, que utiliza el modelo NRTL (Non-Random-Two-Liquid)

para predecir las propiedades de la fase líquida y la ecuación de Hayden y O'Conell para la predicción de las propiedades en la fase vapor.

Separación del isoamil acetato

La columna de desorción se simuló con el módulo RadFrac, este módulo está basado en modelos rigurosos para la resolución de los balances de masa y energía y puede ser empleado para simular procesos de destilación, absorción y *stripping* principalmente. Inicialmente, se definieron 8 etapas de equilibrio para la columna. Las condiciones de operación se supusieron constantes para todas las etapas de equilibrio y fueron definidas como 1 bar de presión y 30 °C de temperatura. A la columna ingresa la mezcla líquida en la parte superior y se pone en contacto a contracorriente con aire, el cual se utiliza como gas de arrastre, produciendo la transferencia del IA desde la mezcla acuosa a la fase gaseosa. Para determinar el mínimo flujo de aire que debe ser alimentado a la columna, se implementó un análisis de sensibilidad para analizar la recuperación del IA en la corriente de salida del gas, en función del flujo de aire alimentado. El objetivo del análisis es determinar la cantidad mínima de aire que permite alcanzar recuperaciones del IA de al menos el 99 % en peso.

Posteriormente, la corriente gaseosa pasa a través de una válvula para reducir la presión de 1 a 0.8 bares y se envía al condensador. El proceso de condensación se implementó en el módulo Heater; en el condensador la temperatura de la mezcla gaseosa se reduce a 10 °C y esto permite que los líquidos condensen, obteniendo una mezcla gas-líquido-líquido. En este punto del proceso la concentración de IA se ha incrementado al grado de formarse dos fases líquidas, debido a la inmiscibilidad del éster en el agua. Por ello, la mezcla se envía al módulo Flash3, separador basado en el equilibrio líquido-líquido-vapor, para separar las fracciones de líquidos y el vapor. Las condiciones de operación del tanque *flash* se mantienen iguales a las del condensador.

En la corriente de fondos que sale del tanque *Flash* se obtiene el agua residual; la corriente intermedia (segunda corriente líquida) se encuentra con una mayor concentración de IA. Este líquido rico en IA se introduce al bloque SEP, este tiene como objetivo eliminar el aire remanente de esta corriente; el separador SEP representa la operación de desgasificación, la cual aprovecha la agitación del líquido y la reducción de presión para facilitar la liberación de gases disueltos [15]. Después, la corriente concentrada en IA es impulsada mediante una bomba para incrementar la presión antes de ingresar a una columna de destilación para alcanzar la pureza deseada.

Purificación del isoamil acetato

La destilación permite purificar al IA a niveles de concentración superiores al 95 % en peso. Para obtener la configuración de la columna de destilación se realizó un prediseño usando el modelo DSTWU (método corto de diseño basado en las ecuaciones de Winn-Underwood-Gilliland), en el cual se evaluó la relación

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28056 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 110- 120

de reflujo más adecuada en función del número de etapas teóricas. A partir de los resultados obtenidos, se establecieron las condiciones iniciales para el diseño de la columna, utilizando el modelo RadFrac (modelo basado en métodos rigurosos de diseño) dentro del simulador. La presión en el condensador de la columna de destilación se definió igual a 1 bar. En la corriente de fondos de la columna se obtiene el IA, por su mayor punto de ebullición, mientras que por el domo se retira el agua residual.

En este diseño se habilitó la paquetería *Internals* del simulador para las columnas de desorción y destilación, lo cual permitió dimensionar las dos columnas.

Estimación de costos del proceso

Finalmente, se activó la paquetería de costos asociados al proceso; fueron dados de alta los siguientes servicios: refrigeración para el condensador inicial, electricidad para la bomba, y para la columna de destilación se usó agua de enfriamiento para el condensador y vapor para el rehervidor. Esta herramienta permitió obtener una estimación preliminar de costos de operación y el costo total anual del proceso (TAC).

Además, se estimó el costo de producción por kilogramo de IA relacionando el costo de operación anual con la producción de IA, según la Ec. (1). Esta estimación considera los costos de energía, servicios, mantenimiento, personal y otros aspectos operativos integrados en Aspen Plus V.14, lo cual proporciona una visión más integral del gasto real en la operación continua de la planta. Asimismo, se calculó el consumo energético por kilogramo de producto a partir de los datos de calor y enfriamiento obtenidos del balance de energía de los equipos involucrados, utilizando la Ec. (2).

$$\text{Costos}\left[\frac{\text{USD}}{\text{kg}}\right] = \frac{\text{Costo de operación}\left[\frac{\text{USD}}{\text{año}}\right]}{\text{Flujo másico del producto}\left[\frac{\text{kg}}{\text{año}}\right]} \tag{1}$$

$$\text{Consumo de energía}\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] = \frac{\text{Consumo de energía}\left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}}\right]}{\text{Flujo másico del producto}\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]} \tag{2}$$

Resultados y Discusión

Diagrama de flujo

En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo del proceso modelado en Aspen Plus V.14 para la separación y purificación del isoamil acetato. La Tabla 1 muestra las propiedades de las principales corrientes del proceso.

El proceso inicia con la alimentación de la mezcla líquida (Feed) y el flujo de aire a la columna de desorción (DSB), donde se facilita la transferencia de masa para arrastrar el IA hacia la fase gaseosa. La

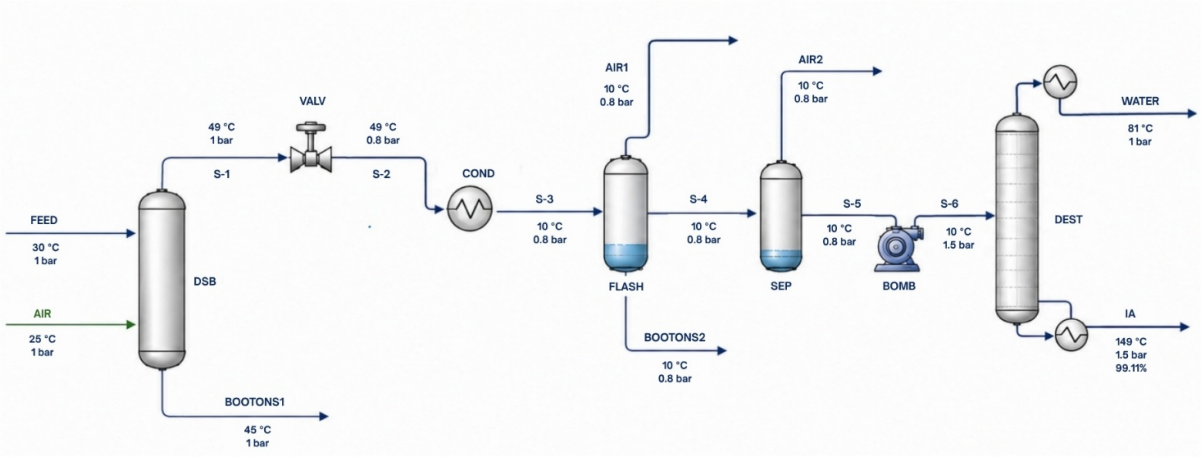


FIGURA 1. *Diagrama de flujo del proceso de separación y purificación del IA. Fuente: Elaboración propia mediante Aspen Plus V.14.*

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28056 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 110- 120

corriente gaseosa húmeda (S-1) pasa a una expansión mediante una válvula (VALV) y posteriormente a un condensador (COND) para enfriar y favorecer la separación de las fases. El líquido obtenido (S-3) se dirige a un separador *flash* (FLASH), donde se obtiene una corriente líquida intermedia (S-4) que contiene una mayor concentración de IA. La corriente líquida (S-4) se envía a un separador (SEP) para retirar el aire remanente (AIR2) y obtener la fase líquida purificada (S-5), la cual es impulsada mediante una bomba (BOMB). El flujo presurizado (S-6) se introduce en una columna de destilación (DEST), donde se logra la purificación final del IA con una pureza del 99.11 % en la corriente inferior (IA), mientras que por la corriente de destilado se obtiene principalmente agua.

Tabla 1. *Propiedades de las corrientes dentro del proceso. Fuente: Elaboración propia.*

	FEED	**AIR**	**S-2**	**S-3**	**S-4**	**S-6**	**IA**
Temperatura (°C)	30	25	49	10	10	10	149
Presión (bar)	1	1	0.8	0.8	0.8	1.5	1.5
Flujo másico ($\mathrm{kg\,h^{-1}}$)	5000	585	302	302	49	46	40.2
Porcentaje en masa (%)							
Agua	96.6	0	6.2	6.2	2.5	2.6	0.02
Etanol	2.5	0	1.6	1.6	6.7	7.2	0.85
Acetato de Isoamilo	0.9	0	14.8	14.8	84.4	90	99.1
Aire	0	100	77.2	77.2	6.2	0	0

Diseño de las columnas

Los resultados del análisis de sensibilidad de la recuperación del IA en función del flujo de aire de la columna de desorción se muestran en la Figura 2.

Se optó por tomar el flujo mínimo de aire de $585\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ para un número definido de 8 etapas en el desorbedor y así alcanzar una recuperación del 99.7 % en peso de IA en la corriente gaseosa. Se observa en el gráfico que con un flujo de $500\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ ya se alcanza una recuperación del 99 %.

Para la columna de destilación, la Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para las variables de diseño. El modelo indicó que con 6 etapas de equilibrio y una relación de reflujo de 1.05 es posible obtener un desempeño eficiente. Bajo estas condiciones, la recuperación del IA alcanzó el 96 %, logrando además una pureza del 99.1 % en la corriente de fondos.

Costos de operación total y energético

El proceso de producción de isoamil acetato presentó una demanda energética de $636{,}5\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ en calentamiento y $2{,}409{,}5\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ en enfriamiento; los valores fueron obtenidos del balance energético de los equipos involucrados. La planta alcanzó una producción anual de 346 473 kg de IA, con un costo

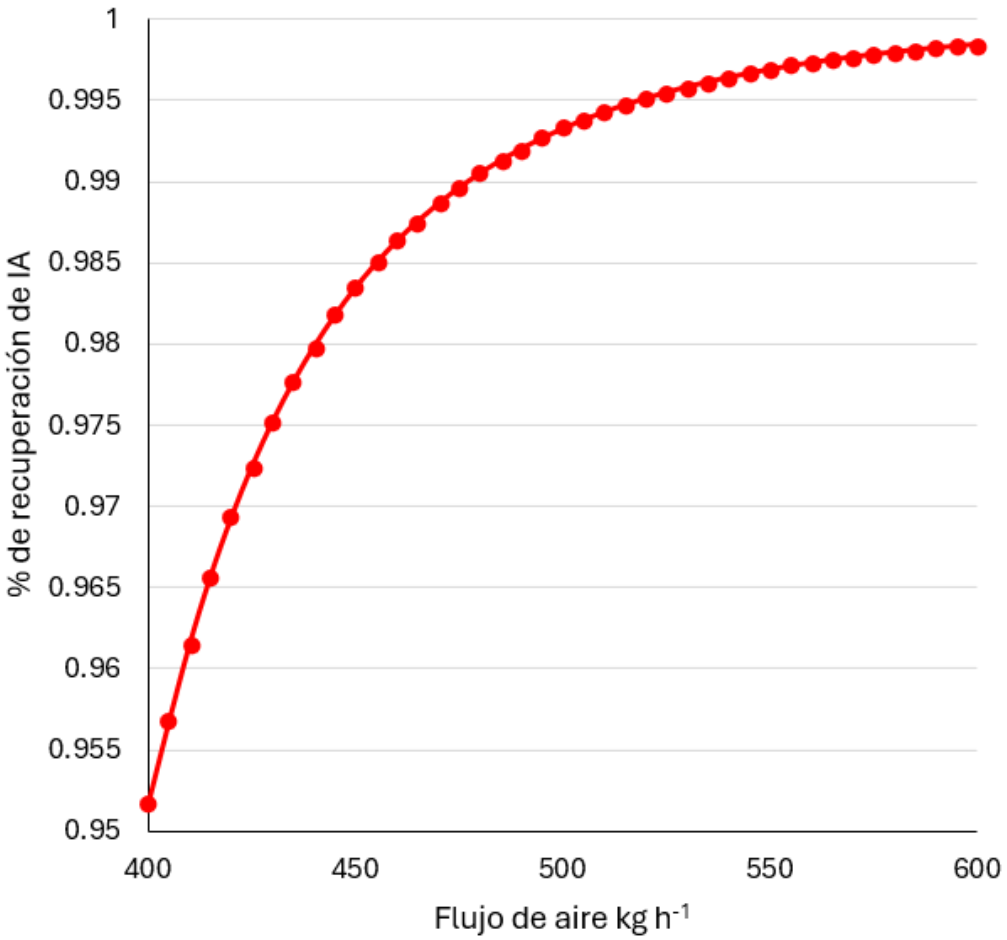


FIGURA 2. *Efecto del flujo de aire en la recuperación de IA. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 2. *Configuración de la columna de destilación. Fuente: Elaboración propia.*

Variable de diseño	**Valor**
Número de etapas	6
Relación de reflujo	1.05
Etapa de alimentación	4
Presión etapa superior (atm)	1
Caída de presión (atm)	0.5
Flujo másico de destilado ($\mathrm{kg\,h^{-1}}$)	40.27
Consumo de energía	
Rehervidor ($\mathrm{kJ\,h^{-1}}$)	27 905.47
Condensador ($\mathrm{kJ\,h^{-1}}$)	−11 689.55

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28056 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 110- 120

total anual de 974 408 USD, lo que representa un costo unitario, para el proceso de separación, de $2{,}81\ \mathrm{USD\,kg^{-1}}$ de producto. Este resultado evidencia un potencial económico del proceso de separación propuesto, ya que el precio en el mercado del isoamil acetato grado alimenticio puede rondar los 90 dólares por kilogramo [16].

Conclusiones y Líneas Abiertas

Se logró diseñar y evaluar el proceso para recuperar y purificar el isoamil acetato, utilizando una columna de desorción asistida con aire, condensación y destilación. La simulación mostró que la columna de desorción con 8 etapas de equilibrio y un flujo mínimo de aire de $585\ \mathrm{kg\,h^{-1}}$ alcanzó una recuperación del 99.7 %. La purificación por destilación logró una recuperación del 96 % en peso de IA y una pureza final del 99.11 % en peso. Energéticamente, el proceso requirió $636{,}5\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ de producto en calentamiento y $2{,}409{,}5\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}}$ de producto en enfriamiento. La producción anual fue de 346 473 kg con un costo total anual de 974 408 USD. Este proceso muestra un potencial económico positivo y no requiere el uso de solventes. La metodología desarrollada no solo es aplicable a la recuperación de IA, sino que también puede adaptarse a otros esteres volátiles de interés, particularmente en las industrias alimentaria, cosmetológica y farmacéutica. Al reducir la dependencia de solventes y minimizar el impacto ambiental, este diseño contribuye a la transición hacia los procesos más sustentables.

Cabe destacar que el enfoque de diseño conceptual de procesos que se ha empleado en este trabajo permitió obtener un esquema de separación con potencial técnico y económico para complementar la producción de isoamil acetato vía fermentación. Sin embargo, se requiere de la validación experimental de los resultados y posterior escalamiento en planta piloto para asegurar la implementación exitosa del proceso a mayor escala.

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Zaira Gerónimo Valencia: Estado del arte, Conceptualización, Metodología, Manejo de Software, Escritura del Manuscrito. **Carolina Conde Mejía**: Conceptualización, Metodología, Manejo de Software, Escritura y Revisión del Manuscrito. **Luis Miguel Valenzuela Gómez**: Conceptualización, Metodología, Revisión del Manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa de Verano de la Investigación Científica UJAT-2025, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] J. Marchel, H. Cieśliński, and G. Boczkaj, "Deep eutectic solvents microbial toxicity: Current state of art and critical evaluation of testing methods," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 425, p. 127963, 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127963

[2] Diario Oficial de la Unión Europea, "Reglamento (CE) no. 1334/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo," https://www.boe.es/doue/2008/354/L00034-00050.pdf, 2008.

[3] Food and Drug Administration, "Normativa federal 21-CFR 101.22," https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-101/subpart-B/section-101.22, 2024.

[4] G. Guan, Y. Zhang, J. Qian, F. Wang, L. Qu, and B. Zou, "Advancements in the research on the preparation of isoamyl acetate catalyzed by immobilized lipase," *Materials*, vol. 18, no. 11, p. 2476, 2025. DOI: 10.3390/ma18112476

[5] EMERGEN RESEARCH, "Isoamyl acetate market (2025–2035)," https://www.emergenresearch.com/industry-report/isoamyl-acetate-market, consultada 12/06/2026.

[6] O. Rentería-Martínez, J. B. Páez-Lerma, J. A. Rojas *et al.*, "Enhancing isoamyl acetate biosynthesis by *Pichia fermentans*," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 20, no. 2, pp. 621–633, 2021. DOI: 10.24275/rmiq/Bio2125

[7] I. I. López-Álvarez, A. López-Molina, and C. Conde-Mejía, "Biorrefinería integral, producción de etanol y isoamil acetato a partir de lactosuero: una aproximación a su diseño," 2021. DOI: 10.19136/Jeeos.a5n2.4776

[8] A. Inayat, S. R. Ahmad, S. J. Awan *et al.*, "In vivo and in vitro toxicity profile of deep eutectic solvents," *Scientific Reports*, vol. 13, p. 1777, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-28928-y

[9] J. D. Seader and E. J. Henley, *Separation Process Principles*. John Wiley & Sons, 1998.

[10] A. Ammari and K. Schroen, "Effect of ethanol and temperature on partition coefficients of ethyl acetate, isoamyl acetate, and isoamyl alcohol: instrumental and predictive investigation," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 64, no. 7, pp. 3224–3230, 2019. DOI: 10.1021/acs.jced.8b01125

[11] W. Zhang, G. Li, H. Yin, K. Zhao *et al.*, "Adsorption and desorption mechanism of aromatic VOCs onto porous carbon adsorbents for emission control and resource recovery: recent progress and challenges," *Environmental Science: Nano*, vol. 9, no. 1, pp. 81–104, 2022. DOI: 10.1039/D1EN00929J

https://doi.org/10.36677/rici.v4i2.28056 ISSN: 2992-7447 Julio - Diciembre 2026 págs. 110- 120

[12] C. A. Gómez-Aldapa, J. Castro-Rosas, A. López-Molina *et al.*, "Best conditions for the production of natural isopentyl acetate (Banana aroma) from cheese industry waste: an experimental precursor approach," *Processes*, vol. 9, no. 11, p. 1880, 2021. DOI: 10.3390/pr9111880

[13] A. K. Sánchez-Castañeda, V. Athès, M. Moussa *et al.*, "Modeling of isoamyl acetate production by fermentation with *Pichia fermentans* in an aerated system coupled to *in situ* extraction," *Process Biochemistry*, vol. 60, pp. 11–20, 2018. DOI: 10.1016/j.procbio.2017.10.010

[14] M. A. Hernández-Cruz, A. Cadena-Ramírez, J. Castro-Rosas *et al.*, "Comparative analysis of three types of whey as substrate for fermentation by *Kluyveromyces marxianus* and its influence on isoamyl acetate synthesis," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 15, pp. 3413–3424, 2024. DOI: 10.1007/s12649-023-02380-5

[15] E. V. Ibarra Hernández, M. Dupin Fonseca, and B. F. Guerra Valdez, "El sistema de agitación en equipos empleados en la industria química," *Revista Centro Azúcar*, 2024.

[16] Millipore Sigma, "Isoamyl acetate, W205508," https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/w205508, consultada 16/06/2026.