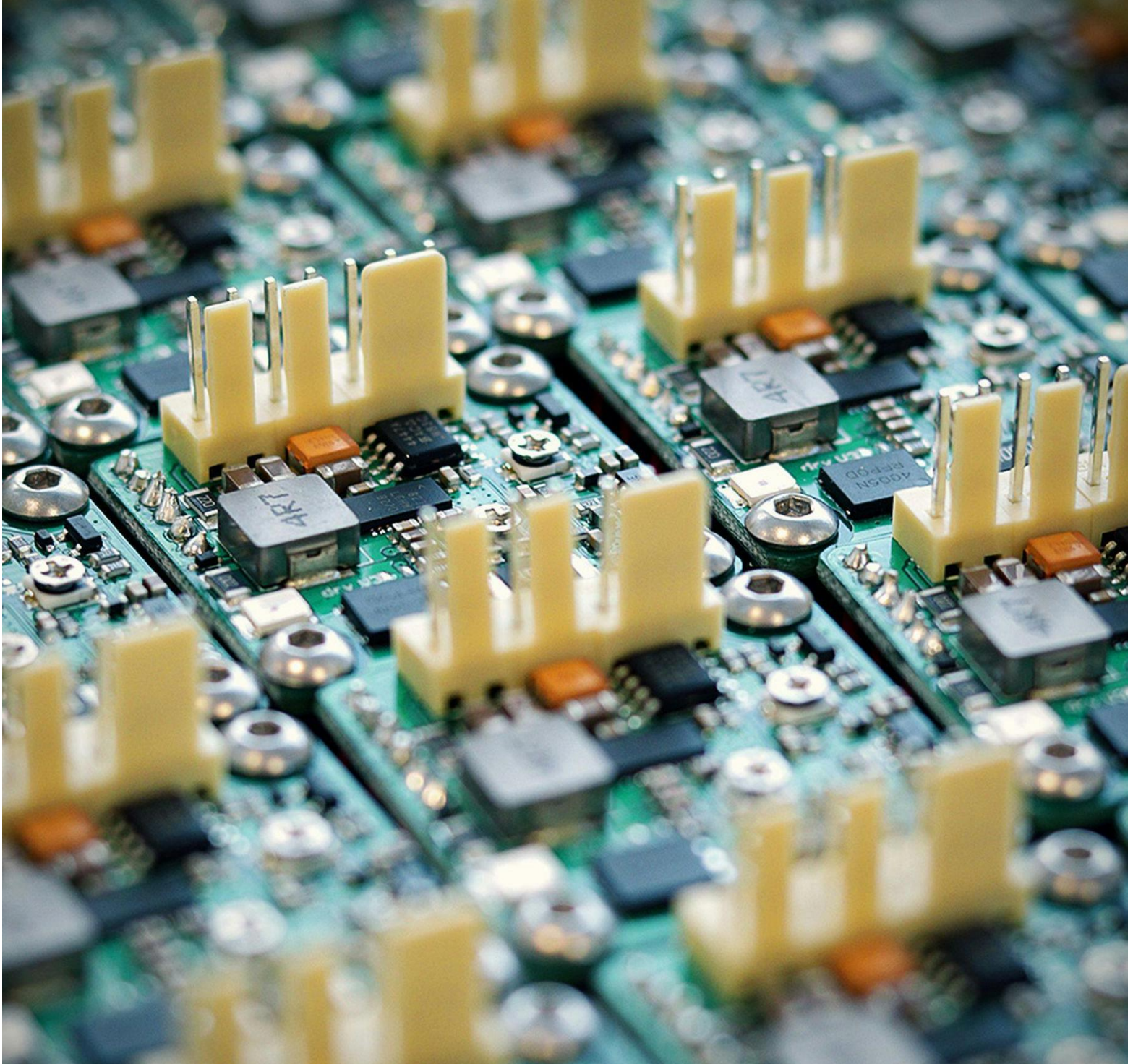


ISSN 2594-2921

Científica

Científica: Journal of Electromechanical Engineering | vol. 30, no. 1 | January-June 2026 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



Volumen 30 Issue 1, January-June 2026

Microclima automatizado para el cultivo de seta *Pleurotus djamor*

Automated microclimate for the cultivation of *Pleurotus djamor* mushrooms

Mauricio Aarón **Pérez Romero**, Oswaldo **De los Santos Hernández**,
Jair de Jesús **Nava Cisneros**, Armando Josué **Piña Díaz**.

PDF
Científica

Evaluación comparativa de los modelos DMST y LLFVW para la predicción del desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical

Comparative evaluation of DMST and LLFVW models for predicting the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines

Raúl Alberto **Bernal Orozco**, Oliver Marcel **Huerta Chavez**,
Daniel Enrique **Constantino Recillas**.

PDF
Científica

Detection of Microcracks in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Endoprostheses Using Wavelet Analysis

Detección de microfisuras en endoprótesis de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) mediante análisis wavelet

Israel **Pérez Martínez**, Cesar **Murillo Martínez**.

PDF
Científica

Erosive wear of AISI S1 and AISI H13 steels caused by spherical and angular particles

Desgaste erosivo de los aceros AISI S1 y AISI H13 causado por partículas esféricas y angulares

Juan Rodrigo **Laguna Camacho**, Aldo Santos **Calderon Lored**, Víctor **Velázquez Martínez**,
Javier **Calderón Sánchez**, Héctor Daniel **López Calderón**.

PDF
Científica

Effect of high temperature on hardness and abrasive resistance of AISI 304 austenitic stainless steel

Efecto de la alta temperatura en la dureza y la resistencia a la abrasión del acero inoxidable austenítico AISI 304

Josué O. **Arreola Vargas**, María E. **Sedano Hernández**, Sara I. **Topete Velasco**,
Francisco J. **Aranda García**, César **Sedano de la Rosa**.

PDF
Científica

Validation of the prototype of L-CADEL.v5 elbow assisting device

Validación del prototipo del dispositivo L-CADEL.v5 de asistencia para el codo

Sergei **Kotov**, Marco **Ceccarelli**.

PDF
Científica

iWILL+VISER: A Blueprint for a Decision-Making Support System for Individuals and Emergency Agencies

iWILL+VISER: Un Plano para un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para Individuos y Agencias de Emergencia

Johany **Negrón**, Hecny **Pérez**, Andrea **Belvis**, Wynhec **Ramos**,
Verónica **Díaz Pacheco**, Mauricio **Cabrera Ríos**, Clara E. **Isaza**.

PDF
Científica

Detección y mitigación de ataques evil twin en redes inalámbricas: una revisión sistemática de la literatura

Detection and Mitigation of Evil Twin Attacks in Wireless Networks:
A Systematic Literature Review

Andres **Santacruz Menendez**, Joel **Caguasango León**, Martha **Sevilla Abarca**.

PDF
Científica

Estudio sobre agentes de inteligencia artificial aplicados a la ciberseguridad y pruebas de penetración en sistemas

Study on Artificial Intelligence Agents Applied to Cybersecurity and Penetration Testing in Systems

Gerardo **Cruz Espinosa**, Mariana **Velasco Trejo**.

PDF
Científica

Interacción, creatividad práctica y desempeño académico en entornos digitales de educación superior: un análisis multivariado desde learning analytics

Interaction, Practical Creativity, and Academic Performance in Digital Higher Education Environments:
A Multivariate Analysis from Learning Analytics

Nancy Patricia **Flores Azcanio**, Jorge Daniel **González Hernández**, Jonathan **Martínez Paredes**.

PDF
Científica

Análisis en tiempo real de micropartículas de desgaste mediante microabrasión por ball cratering: integración de captura óptica, calibración de fuerza y cuantificación tribológica

Real-time Analysis of Wear Microparticles by Microabrasion through Ball Cratering:
Integration of Optical Capture, Force Calibration, and Tribological Quantification

Mitzi **Matias Matias**, Leonardo **Martínez Marcelo**, Minerva Teresa **Chimal Benhumea**, Tomas **De la Mora Ramirez**.

PDF
Científica

FOOTGGY: Diseño de un dispositivo inteligente para entrenamiento futbolístico

FOOTGGY: Design of a smart football training device

Adriana Paola **Bueno Hernández**, Luis Adrián **Zúñiga Avilés**, Juana Mariel **Dávila Vilchis**,
Karla Flores **Sánchez**, Mariana **Cuenca Chávez**.

PDF
Científica

Hacia un currículo de ingeniería basado en microcredenciales para la era de la inteligencia artificial

Towards a Micro-credential-based Engineering Curriculum for the Age of Artificial Intelligence

Juan Carlos **Jáuregui Correa**, Mihir **Sen**.

PDF
Científica

Output Regulation Based on Object Detection and High Gain Observers in Liquid Handling Robots

Regulación de la salida basada en detección de objetos y observadores de alta ganancia
en robots de manipulación de líquidos

Ricardo **Tapia Herrera**, Edith Sayuri **Chirinos Martinez**, Tonatiuh **Hernández Cortes**,
Beatriz Adriana **Jaime Fonseca**, Jesús Alberto **Meda Campaña**.

PDF
Científica

Evaluation of corrosion behavior of a pipeline carbon steel (API 5L-X52) subjected to a short-term immersion test in a sour aqueous media

Evaluación del comportamiento corrosivo de un acero al carbón para tuberías (API 5L-X52)
sometido a una prueba de inmersión de corta duración en un medio amargo

Javier Alejandro **Frias Flores**, Jesús Gilberto **Godinez Salcedo**, Manuel **Vite Torres**.

PDF
Científica

CIENTIFICA, year 30, issue 1 January-June 2026. Biannual Journal online published (under a continuous publication model) by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: cientifica@ipn.mx, Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Cover-Photo Opt Lasers from Poland: <https://www.pexels.com/es-es/foto/placa-base-componentes-electronica-microprocesador-7097230/>. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

The responsibility of the materials published in Científica rests solely with their authors and their content does not necessarily reflect the criteria of the Editorial Board or the Instituto Politécnico Nacional. The total or partial reproduction of the texts hereby published is authorized as long as the complete source and the electronic address of the publications are cited, they are distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, there is no fee for article processing, submission or publication.

Microclima automatizado para el cultivo de seta *Pleurotus djamor*

Automated microclimate for the cultivation of *Pleurotus djamor* mushrooms

Mauricio Aarón **Pérez Romero**¹
Oswaldo **De los Santos Hernández**²
Jair de Jesús **Nava Cisneros**³
Armando Josué **Piña Díaz**⁴

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0005-5639-770X / maperezro@ipn.mx

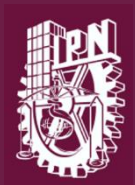
² ORCID: 0009-0008-5695-3421 / odelossantosh1700@alumno.ipn.mx

³ ORCID: 0009-0005-6249-7272 / jnavac1700@alumno.ipn.mx

⁴ ORCID: 0000-0002-2723-6369 / apinad@ipn.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 19/12/2025, aceptado 20/01/2026, publicado 30-01-2026.



Resumen

El cultivo de setas comestibles del género *Pleurotus* requiere condiciones ambientales estrictas para un desarrollo micelial adecuado y una fructificación eficiente. En particular, *Pleurotus djamor* presenta alta sensibilidad a variaciones de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono e iluminación, lo que limita su producción bajo métodos artesanales. En este trabajo se presenta el diseño, implementación y evaluación experimental de un sistema automatizado para el control de microclima aplicado al cultivo de *Pleurotus djamor*. El sistema propuesto integra un microcontrolador ESP32-S3, sensores ambientales para la medición de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, así como actuadores para el control de riego por nebulización, ventilación, calefacción e iluminación LED específica. Se implementó una estrategia de control jerárquico con modos de operación diferenciados para las etapas de incubación y fructificación, con monitoreo remoto mediante interfaces móviles y mensajería instantánea. Los resultados experimentales demostraron que el sistema automatizado mantuvo las variables ambientales dentro de los rangos óptimos establecidos para cada etapa del cultivo, con desviaciones inferiores al $\pm 1\%$ respecto al valor de referencia. En comparación con un testigo artesanal, el sistema automatizado incrementó la producción total de cuerpos fructíferos de 0.451 kg a 2.49 kg y elevó la eficiencia biológica del 15.03 % al 83 %. Asimismo, se observó una mejora significativa en la calidad sensorial de las setas obtenidas. Los resultados confirman que el control automático del microclima constituye una alternativa eficiente, reproducible y de bajo costo para optimizar el cultivo de *Pleurotus djamor*, con aplicaciones potenciales en sistemas productivos a pequeña y mediana escala.

Palabras clave: cultivo de setas, IoT agrícola, eficiencia biológica.

Abstract

The cultivation of edible mushrooms of the genus *Pleurotus* requires strict environmental conditions to ensure proper mycelial development and efficient fructification. In particular, *Pleurotus djamor* exhibits high sensitivity to variations in temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, and lighting, which limits its production under artisanal cultivation methods. This work presents the design, implementation, and experimental evaluation of an automated microclimate control system applied to the cultivation of *Pleurotus djamor*. The proposed system integrates an ESP32-S3 microcontroller, environmental sensors for measuring temperature, relative humidity, and CO₂ concentration, as well as actuators for controlling mist irrigation, ventilation, heating, and specific LED lighting. A hierarchical control strategy with differentiated operating modes for the incubation and fructification stages was implemented, along with remote monitoring through mobile interfaces and instant messaging services. Experimental results demonstrated that the automated system maintained the environmental variables within the optimal ranges established for each cultivation stage, with deviations below $\pm 1\%$ with respect to the reference values. Compared to an artisanal control system, the automated system increased the total production of fruiting bodies from 0.451 kg to 2.49 kg and raised the biological efficiency from 15.03% to 83%. In addition, a significant improvement in the sensory quality of the harvested mushrooms was observed. These results confirm that automatic microclimate control represents an efficient, reproducible, and low-cost alternative for optimizing the cultivation of *Pleurotus djamor*, with potential applications in small and medium scale production systems.

Index terms: mushroom cultivation, agricultural IoT, biological efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de hongos comestibles ha adquirido una relevancia creciente dentro de los sistemas agroalimentarios debido a su alto valor nutricional, su capacidad para aprovechar residuos agroindustriales como sustrato y su potencial para desarrollarse en espacios reducidos. Estas características han posicionado a los hongos como una alternativa sostenible para la producción de alimentos con bajo impacto ambiental y alto valor agregado [1]. Entre las especies más estudiadas se encuentra el género *Pleurotus*, el cual presenta ciclos de crecimiento cortos, elevada eficiencia biológica y una amplia adaptabilidad a distintos sustratos lignocelulósicos. No obstante, el cultivo de *Pleurotus djamor*, conocida como seta rosa, se distingue por su alta sensibilidad a las condiciones ambientales, lo que convierte al control del microclima en un factor determinante para su productividad y calidad comercial [2].

Diversos estudios han documentado que variables ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono y la iluminación influyen directamente en las etapas de incubación y fructificación de las setas [3]. Estas variables regulan procesos fisiológicos fundamentales, como la actividad metabólica del micelio y el balance hídrico de los cuerpos fructíferos. Cuando las condiciones ambientales se alejan de los rangos adecuados, se presentan retrasos en la colonización del sustrato, alteraciones morfológicas y reducciones en el rendimiento del cultivo [4].

En los sistemas de producción tradicionales o artesanales, el ajuste de la temperatura y la humedad relativa suele realizarse de forma manual y depende en gran medida de las condiciones climáticas externas y de la experiencia del productor, lo que introduce incertidumbre y limita la trazabilidad del proceso [5]. Este enfoque introduce incertidumbre operativa, limita la repetibilidad del proceso y dificulta la trazabilidad de las condiciones de cultivo, lo que se traduce en variaciones significativas en la calidad y cantidad de la producción obtenida. Ante estas limitaciones, la automatización del control ambiental ha sido ampliamente explorada como una estrategia para mejorar la estabilidad del microclima en el cultivo de hongos [6], [7].

En particular, los sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) han emergido como una alternativa viable para el monitoreo y la regulación en tiempo real de variables críticas como la temperatura y la humedad relativa. Estas plataformas permiten la integración de sensores, actuadores y sistemas de comunicación inalámbrica para la supervisión continua del proceso productivo y la toma de decisiones automatizada [8], [9]. En [10] se presentó una comparación entre un sistema de cultivo artesanal y un sistema automatizado basado en IoT, donde se reportó un incremento en el rendimiento promedio por ciclo de cultivo, atribuible a la estabilidad de las condiciones ambientales. Dichos resultados evidencian que el control consistente de la temperatura y la humedad relativa favorece un crecimiento más uniforme del micelio y una fructificación más abundante.

Otros trabajos han ampliado este enfoque mediante la incorporación de sistemas electrónicos de monitoreo y control ambiental. En [11] se desarrolló un sistema para la supervisión de parámetros como temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono en cultivos de hongos, demostrando que las plataformas autónomas basadas en sensores permiten mantener condiciones ambientales más estables durante el proceso productivo. De manera complementaria, estudios enfocados en sistemas de producción agrícola bajo invernadero han señalado que la automatización reduce los errores asociados a la intervención humana y favorece la estabilidad operativa continua, independientemente del tipo de cultivo [12].

Desde una perspectiva de accesibilidad económica y tecnológica, diversos autores han demostrado la viabilidad de implementar invernaderos inteligentes de bajo costo mediante el uso de microcontroladores, sensores comerciales y plataformas IoT para el monitoreo remoto [13]. Aunque estos trabajos no se enfocan específicamente en el cultivo de hongos, aportan evidencia relevante sobre la escalabilidad, flexibilidad y reducción de costos de las arquitecturas IoT

aplicadas al control ambiental. Sin embargo, a pesar de los avances reportados, una parte significativa de los estudios existentes se concentra principalmente en el monitoreo de variables ambientales, sin integrar estrategias de control claramente definidas ni evaluaciones experimentales comparativas a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Asimismo, son limitados los trabajos que analizan de forma integral el impacto del control automático del microclima sobre la eficiencia biológica y la calidad sensorial del *Pleurotus djamor* frente a sistemas de producción artesanales.

En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño e implementación de un sistema automatizado para el control del microclima aplicado al cultivo de *Pleurotus djamor*. El sistema integró sensores ambientales, actuadores eléctricos y un microcontrolador con conectividad inalámbrica, junto con una estrategia de control jerárquico diferenciada para las etapas de incubación y fructificación. El objetivo principal consistió en evaluar experimentalmente el desempeño del sistema automatizado mediante una comparación directa con un sistema de cultivo artesanal, considerando la estabilidad ambiental, la producción de cuerpos fructíferos, la eficiencia biológica y la calidad sensorial del producto obtenido.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental comparativo, orientado a evaluar el desempeño de un sistema automatizado de control del microclima frente a un sistema testigo de tipo artesanal. Ambos sistemas emplearon sacos de cultivo comercialmente preparados, con el objetivo de garantizar condiciones iniciales homogéneas en términos del material biológico y del sustrato, y de esta manera aislar el efecto del sistema de control ambiental como principal variable de análisis.

4

Los sacos de cultivo utilizados fueron adquiridos de manera comercial y se entregaron previamente preparados e inoculados por el proveedor. El sustrato estuvo conformado principalmente por paja y aserrín, junto con otros compuestos orgánicos propios de la formulación comercial, cuya composición exacta no fue especificada por el fabricante. Este tipo de sustratos se emplea de forma habitual en sistemas de producción artesanal y semitecnificada de hongos comestibles, ya que proporciona una formulación balanceada y condiciones iniciales adecuadas para el desarrollo del micelio del género *Pleurotus*.

En el contexto del presente trabajo, el uso de sacos comerciales permitió reducir la variabilidad asociada a la preparación manual del sustrato y asegurar la repetibilidad del experimento al enfocar el análisis en la evaluación del impacto del control automático del microclima sobre el desempeño del cultivo. Una representación general del esquema experimental se muestra en la Figura 1.



Fig. 1. Bolsa de cultivo.

El experimento contempló dos etapas del ciclo de cultivo: incubación y fructificación. En ambas etapas se monitorearon las variables ambientales críticas de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono, consideradas determinantes para el desarrollo fisiológico del hongo. Adicionalmente, en el sistema automatizado se implementó el control del fotoperiodo durante la etapa de fructificación, de acuerdo con los requerimientos fisiológicos reportados para la especie, mientras que en el sistema testigo estas condiciones dependieron del manejo manual y de las condiciones ambientales del entorno.

El hábitat experimental consistió en una estructura portátil de tipo invernadero, fabricada con tubular plástico y cubierta de polivinilo, cuyas dimensiones fueron de 91.95 cm × 91.95 cm × 107.95 cm (véase Figura 2). En el interior del hábitat se colocaron tres bolsas de cultivo de *Pleurotus djamor*, con dimensiones estándar de 23 cm de altura, 17.5 cm de base y 13 cm de ancho (la capacidad del invernadero es de 24 bolsas). La distribución interna consideró el espacio necesario para la ubicación estratégica de los sensores ambientales y los sistemas de riego, ventilación e iluminación.

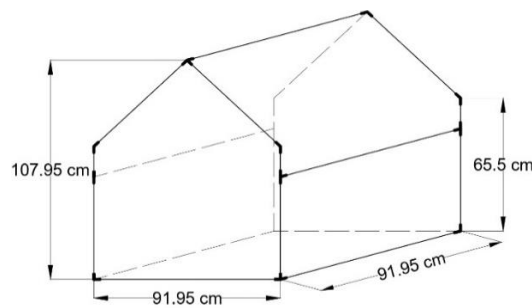


Fig. 2. Dimensiones del hábitat experimental.

El sistema automatizado se diseñó bajo una arquitectura modular con sensores, actuadores y un controlador central. Como unidad de procesamiento se utilizó un microcontrolador ESP32-S3, seleccionado por su capacidad de cómputo, conectividad Wi-Fi integrada y compatibilidad con entornos de desarrollo de código abierto. Para la medición de las variables ambientales se empleó un sensor ambiental BME680, el cual permitió registrar temperatura, humedad relativa y estimaciones de concentración de CO₂, en una arquitectura típica de sensado y control distribuido empleada en sistemas agrícolas automatizados [14]. Los actuadores del sistema incluyeron una bomba de agua para riego por nebulización, un extractor de aire para la renovación y control de CO₂, un resistor eléctrico de potencia para calefacción y luminarias LED de cultivo de espectro completo para la etapa de fructificación (véase Figura 3).



Fig. 3. Hábitat experimental.

El diagrama mostrado en la Figura 4, representa las etapas de comunicación del sistema. El microcontrolador ESP32-S3 se comunica mediante el protocolo I²C con el sensor ambiental BME680, que integra un termistor, un sensor capacitivo y uno resistivo para medir temperatura, humedad relativa y gases, para la estimación de CO₂. La librería *bsec.h* procesa internamente los datos de calidad del aire. Con esta información, el ESP32-S3 envía la señal para accionar los actuadores (bomba de agua, un extractor, una resistencia y una lámpara). Se utiliza la librería *Dimmer.h* para regular las variables de control de cada actuador. Además del control físico del entorno, el sistema cuenta con capacidad de interacción remota. Esto se logra mediante conexión Wi-Fi, gestionada por la librería *WiFiManager.h*, para la configuración de la red. Para el monitoreo y control desde una interfaz móvil o en línea, se emplean las plataformas *RemoteXY* y *Telegram*. La comunicación con estas plataformas se habilita por medio de *WiFiClientSecure.h* y *UniversalTelegramBot.h*, lo que permite al usuario recibir notificaciones, visualizar parámetros y enviar comandos al sistema desde cualquier lugar. Por último, las configuraciones personalizadas del usuario, como umbrales de activación o valores de referencia, se almacenan al utilizar la librería *Preferences.h*.

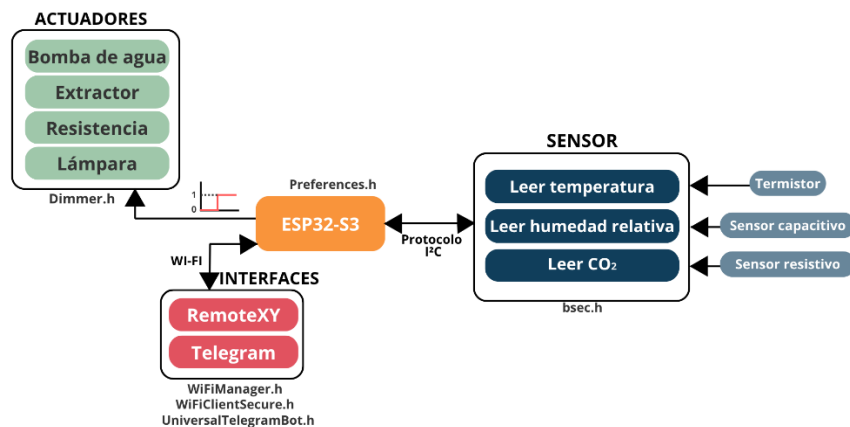


Fig. 4. Comunicación del sistema.

Para el control de la humedad relativa se seleccionó un sistema de riego por nebulización, debido a su capacidad para generar una fina nube de agua que incrementa la humedad ambiental sin dañar los cuerpos fructíferos. El sistema de riego por nebulización se alimentó con agua potable de red, utilizada de manera habitual en sistemas de cultivo artesanal de hongos. En el presente estudio no se realizó un análisis fisicoquímico de la calidad del agua, debido a que el objetivo del trabajo se centró en la evaluación del control del microclima y no en el efecto de la composición del agua sobre el crecimiento del hongo. No obstante, al emplearse un sistema de nebulización de baja presión y periodos cortos de activación, se minimizó la acumulación de sales o residuos sobre los cuerpos fructíferos y los componentes del sistema.

Cada nebulizador seleccionado presentó un caudal nominal promedio de 7 L/h. Se consideró la instalación de tres aspersores dentro del hábitat, el caudal total requerido se calculó mediante la ecuación (1):

$$Q = n \cdot q \quad (1)$$

donde Q representa el caudal total del sistema, n el número de aspersores y q el caudal nominal de cada aspersor. Para analizar el comportamiento hidráulico del sistema, el caudal volumétrico se relacionó con el área transversal de la manguera y la velocidad del flujo mediante la ecuación (2):

$$Q = A \cdot v \quad (2)$$

donde A corresponde al área de la sección transversal y v a la velocidad del fluido. Una vez conocida la velocidad del flujo, se procedió a estimar la pérdida de presión a lo largo del sistema de riego empleando la ecuación (3) de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = \frac{f \cdot \ell \cdot \rho \cdot v^2}{D \cdot 2} \quad (3)$$

donde f es el factor de fricción, ℓ la longitud total de la tubería, D el diámetro interno y ρ la densidad del agua. Para determinar el régimen de flujo y el factor de fricción correspondiente, se calculó el número de Reynolds mediante la ecuación (4):

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

Finalmente, la potencia hidráulica P_h requerida por la bomba se estimó a partir de la ecuación (5):

$$P_h = \frac{Q \cdot ((H \cdot \rho \cdot g) + \Delta P)}{1000} \quad (5)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y H la altura equivalente del sistema.

El sistema de ventilación se diseñó con el objetivo de regular la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y el exceso de humedad relativa. Para ello, se calculó el volumen interno del hábitat a partir de sus dimensiones geométricas, modelándolo como un prisma rectangular con sección triangular superior. Una vez determinado el volumen total, se seleccionó un extractor axial con capacidad para renovar el aire del hábitat.

El control de la temperatura se realizó mediante un resistor eléctrico de potencia, el cual calentó el aire suministrado por el extractor. Durante la etapa de fructificación se implementó un sistema de iluminación LED de cultivo con espectro específico, compuesto por longitudes de onda azul (~455 nm) y roja (~610 nm). La selección se realizó al considerar que la combinación de ambos espectros favorece la formación de cuerpos fructíferos y mejora la calidad visual del producto. Las luminarias se instalaron en la parte superior del hábitat y se controlaron mediante un relevador de estado sólido con fotoperiodos de 8 horas diarias. Los actuadores del sistema fueron controlados mediante circuitos electrónicos de potencia con detección de cruce por cero y control de ángulo de disparo.

A. Filosofía de operación

La filosofía de operación del sistema se fundamentó en el ajuste automático de las variables ambientales críticas para el cultivo de *Pleurotus djamor*, específicamente la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono y los fotoperiodos, mediante una estrategia de control basada en jerarquía y modos de operación.

Una vez energizado el sistema, el usuario realiza la configuración inicial de la red Wi-Fi. Tras completar este proceso, el sistema establece la conexión inalámbrica y queda habilitado para su operación y supervisión remota mediante las interfaces disponibles. Al configurarse por primera vez, el sistema inicia automáticamente la etapa de incubación y establece el “día cero” del ciclo de cultivo.

La etapa de incubación se estableció con una duración de 15 días, durante los cuales el sistema fijó los parámetros de operación en una temperatura de 28°C, una humedad relativa del 65% y un límite máximo de 1800 ppm para la concentración de CO₂. Durante esta etapa no se aplicaron fotoperiodos, manteniéndose el hábitat en condiciones de oscuridad controlada, conforme a los requerimientos fisiológicos de la especie.

El sensor ambiental realiza mediciones cada tres segundos. Con base en estas lecturas, el sistema evalúa de manera periódica el estado de la humedad relativa y, en caso de detectarse un valor inferior al de referencia establecido (*setpoint*), activa el sistema de riego por nebulización durante un periodo de cuatro segundos. Esta decisión se valida cada quince minutos y se ejecuta de forma independiente al funcionamiento del extractor de aire y del sistema de calefacción.

En primer lugar, el sistema verifica si la humedad relativa es mayor o igual al *setpoint* más un margen del 4%. En caso afirmativo, el extractor modula su velocidad de giro para reducir el exceso de humedad. En segundo lugar, se evalúa la temperatura; si esta supera el *setpoint* en un margen igual o superior a 3°C, el extractor incrementa su potencia para la disipación térmica. Posteriormente, se analiza la concentración de CO₂ y, si esta excede el *setpoint* en 200 ppm, el sistema aumenta la renovación de aire para disminuir la concentración del gas. Finalmente, si ninguna de las variables supera los rangos establecidos, el extractor opera a una potencia predefinida con el objetivo de introducir aire fresco al hábitat. Este ciclo de evaluación se repite de manera continua durante toda la etapa de incubación.

Al concluir la incubación, el sistema realiza de forma automática la transición a la etapa de fructificación. En esta segunda etapa, los parámetros de operación se ajustan a una temperatura de 24°C, una humedad relativa del 85% y un límite máximo de 2200 ppm de CO₂. Adicionalmente, se activa el sistema de iluminación mediante lámparas LED con longitudes de onda azul de 455 nm y roja de 610 nm, con un fotoperiodo de ocho horas diarias, programado de 00:00 a 08:00 h bajo un formato de 24 horas.

Durante ambas etapas del cultivo, el sistema mantiene un contador interno que registra el tiempo transcurrido en horas y días. Cada hora, el sistema envía una notificación automática a través de la plataforma *Telegram*, para informar al usuario el estado actual del hábitat y los valores de las variables ambientales. De manera simultánea, la interfaz gráfica *RemoteXY* se actualiza de forma continua, para mostrar las mediciones realizadas por el sensor cada tres segundos.

Durante la operación real del sistema, las variables ambientales fueron reguladas de manera continua a lo largo de las etapas de incubación y fructificación, mediante la aplicación repetitiva de la lógica de control descrita. El comportamiento real de la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂ se mantuvo dentro de bandas cercanas a los valores de referencia establecidos, como resultado de la interacción permanente entre el sistema de medición, los controladores y los actuadores. Esta regulación continua permitió reproducir condiciones ambientales estables durante periodos prolongados de tiempo, lo cual resulta fundamental en procesos biológicos como el cultivo de hongos.

B. Filosofía de control

El sistema de control se estructuró mediante una arquitectura de lazo cerrado, donde a cada variable ambiental se le asignó un lazo de control independiente (véase Figura 5). La estrategia adoptada fue de tipo modular, en la cual cada lazo se integró por los bloques de referencia, controlador, planta y sistema de medición, conforme al esquema general de control realimentado.

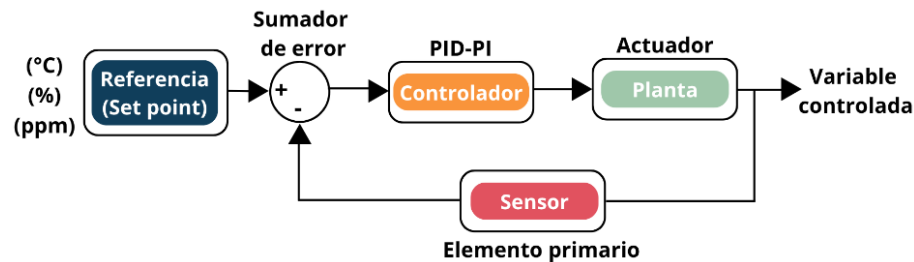


Fig. 5. Diagrama esquemático de lazo de control.

Desde el punto de vista matemático, la dinámica de cada variable fue representada mediante funciones de transferencia obtenidas a partir de pruebas experimentales a lazo abierto. Los modelos identificados correspondieron a sistemas de primer o segundo orden, descritos por las ecuaciones generales (6) y (7):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (6)$$

para modelos de primer orden, y

$$G(s) = \frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (7)$$

para modelos de segundo orden, donde K representa la ganancia del sistema, τ la constante de tiempo, y a_0 , a_1 , b los coeficientes dinámicos obtenidos mediante ajuste matemático.

La identificación de estas funciones de transferencia se realizó mediante los métodos de mínimos cuadrados y de distancias ortogonales, seleccionándose en cada caso el modelo que presentó el menor error respecto a la respuesta experimental. El esquema de control empleado para cada variable se definió mediante controladores de tipo PI o PID. La selección del tipo de controlador se realizó en función de la dinámica identificada de cada planta y de los criterios de desempeño establecidos.

En el caso del control de la temperatura, la dinámica del sistema fue representada adecuadamente por un modelo de primer orden, lo que justificó el uso de un controlador PID para mejorar la rapidez de respuesta y reducir el error en estado estacionario. A continuación, se muestra la respuesta de la temperatura ante una entrada escalón a lazo cerrado (véase Figura 6).

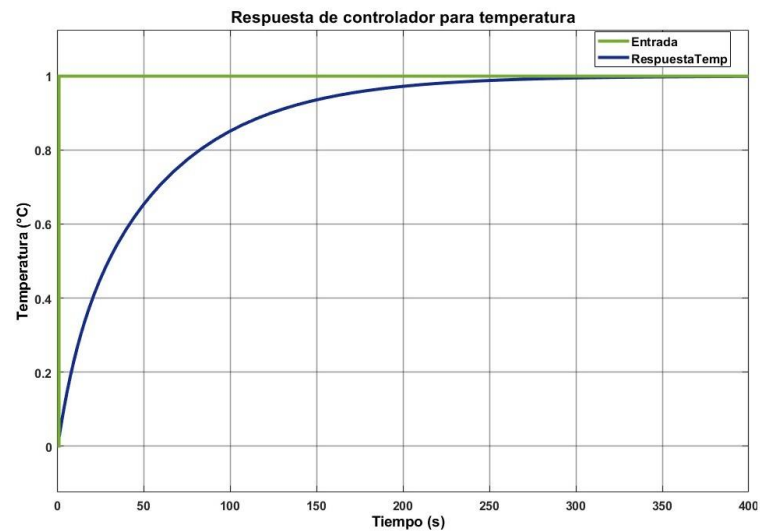


Fig. 6. Respuesta del lazo de control de temperatura.

Para la humedad relativa, la planta presentó una ganancia negativa, asociada al carácter inverso del proceso de extracción de humedad; en este caso, el control se formuló mediante una acción inversa respecto al error, para estabilizar la variable alrededor del punto de referencia (véase Figura 7). En este lazo se empleó también un controlador PID.

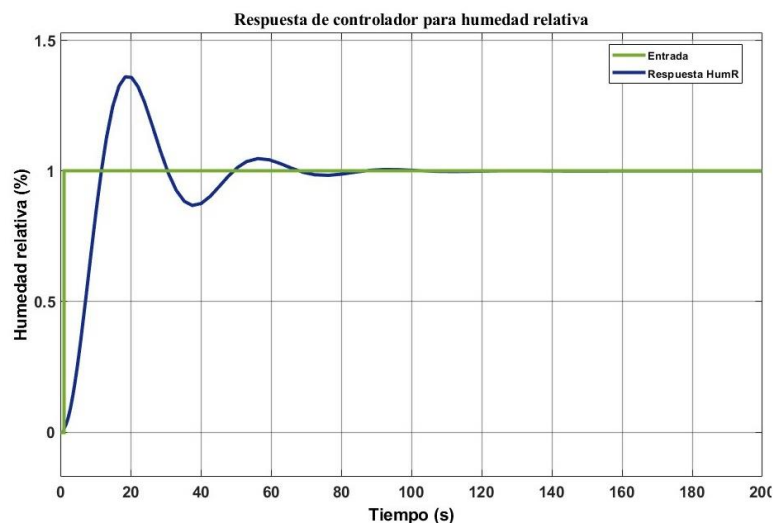


Fig. 7. Respuesta del lazo de control de humedad relativa.

Por su parte, el control de la concentración de CO_2 se basó en un modelo de segundo orden, lo que motivó la implementación de un controlador PI, para una respuesta rápida ante excesos de concentración y evitar oscilaciones innecesarias en el sistema de ventilación (véase Figura 8).

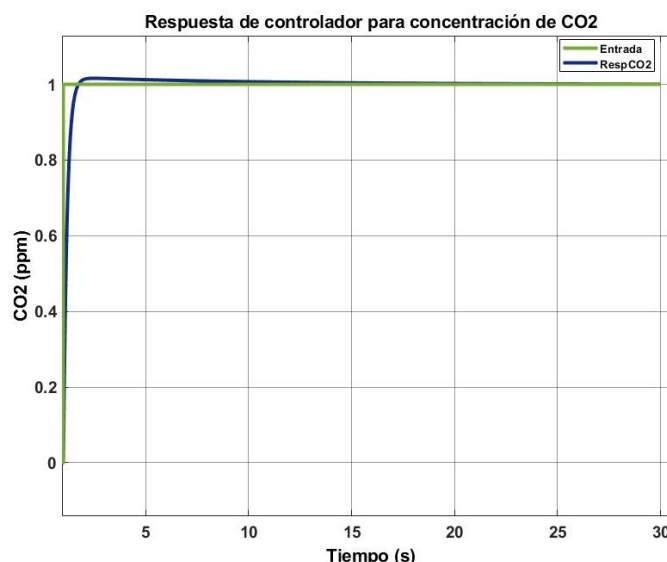


Fig. 8. Respuesta del lazo de control de concentración de CO₂.

11

En conjunto, la filosofía de control adoptada permite regular de forma estable y autónoma las variables ambientales del hábitat. La combinación de identificación dinámica, control modular y sintonización por asignación de polos proporciona una estrategia robusta y reproducible, adecuada para sistemas de cultivo automatizados de pequeña y mediana escala.

Es importante señalar que las respuestas de los lazos de control presentadas en las Figuras 6, 7 y 8 corresponden a pruebas de validación dinámica del diseño de los controladores, realizadas para verificar la estabilidad, rapidez de respuesta y error en estado estacionario de cada variable ambiental. Dichas gráficas no representan directamente la evolución temporal de las variables durante el ciclo completo de cultivo, sino que permiten confirmar que la estrategia de control implementada es capaz de regular de forma adecuada cada variable alrededor de su punto de referencia bajo condiciones controladas.

C. Criterios de comparación entre sistemas

La comparación entre el sistema automatizado y el sistema artesanal se realizó en consideración de los resultados finales de producción y el comportamiento temporal de las variables ambientales durante el ciclo de cultivo. En el sistema artesanal, la regulación de la temperatura, la humedad relativa y la ventilación dependió del ajuste manual y de las condiciones ambientales externas, lo que generó variaciones amplias a lo largo del tiempo.

En contraste, el sistema automatizado permitió mantener dichas variables dentro de rangos estrechos alrededor de los valores de referencia establecidos, mediante la aplicación continua de la estrategia de control descrita. Esta diferencia en la estabilidad temporal del microclima constituyó uno de los principales criterios de comparación entre ambos métodos, complementando el análisis de rendimiento y calidad del producto final.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

Para el desarrollo de este estudio se implementó un sistema embebido orientado a la adquisición y análisis de señales PPG, diseñado específicamente para evaluar parámetros de frecuencia cardíaca (BPM) y variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV). El sistema está compuesto por un microcontrolador PSoC 4200M (modelo CY8C4247AZI-M485) encargado de adquirir la señal analógica proveniente de la salida de un JFET 2N5457 en conjunto con un LED como fotosensor, para procesar localmente y transmitir los datos hacia una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en Python mediante la biblioteca PyQt5. La GUI permite la visualización en tiempo real de la señal PPG, el cálculo de métricas cardíacas y la exportación de los datos adquiridos en formato CSV. Además, el sistema cuenta con una máquina de estados y un protocolo de comandos para iniciar y detener la adquisición de manera controlada, garantizando así una interacción estable entre el firmware y el entorno de análisis. La frecuencia de muestreo fue configurada a 500 Hz, permitiendo una resolución adecuada para el análisis detallado de la señal y sus variaciones.

En la Tabla 1 se presenta una comparación técnica entre familias PSoC 4 (4200M), PSoC 5LP y PSoC 6. Aunque el PSoC 5LP se destaca como la mejor opción para procesamiento analógico gracias a su combinación de ADCs Delta-Sigma de alta resolución, múltiples Opamps, Mixers analógicos y un módulo de filtrado digital (DFB), en este trabajo se utilizó el PSoC 4200M debido a su disponibilidad en el laboratorio. Esta familia, a pesar de sus limitaciones frente al 5LP, ofrece un núcleo Cortex-M0 y bloques analógicos suficientes para implementar de manera eficiente el filtrado analógico de señales PPG. En comparación, el PSoC 6 representa una evolución significativa con capacidades de procesamiento dual y mayor rendimiento, pero carece de algunas herramientas analógicas dedicadas que distinguen al 5LP como la mejor opción cuando se prioriza el tratamiento analógico de la señal.

12

En la Fig. 1, se muestra el esquema experimental utilizado en el presente trabajo. Aquí se muestran los módulos principales: Señal PPG (salida Filtro pasa altas), Temporizador (SamplingTimer), UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), Opamp y un ADC (ADC_SAR_1), los cuales son descritos a continuación.

Durante la etapa de incubación (15 días), el sistema automatizado mantuvo las variables ambientales cercanas a los valores de referencia establecidos. La Tabla 1 resume los valores promedio registrados y su comparación con el sistema testigo.

TABLA 1
VARIABLES AMBIENTALES PROMEDIO DURANTE LA INCUBACIÓN

Sistema	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO ₂ (ppm)	Días
Testigo (artesanal)	22.31	28.68	—	15
Automatizado	28.06	65.31	937.28	15

La Figura 9 muestra el comportamiento temporal de la temperatura durante la incubación, donde se observa que el sistema automatizado mantuvo el valor cercano al *setpoint* de 28°C, con variaciones menores a ±1°C, mientras que el sistema testigo presentó fluctuaciones asociadas a las condiciones ambientales externas.

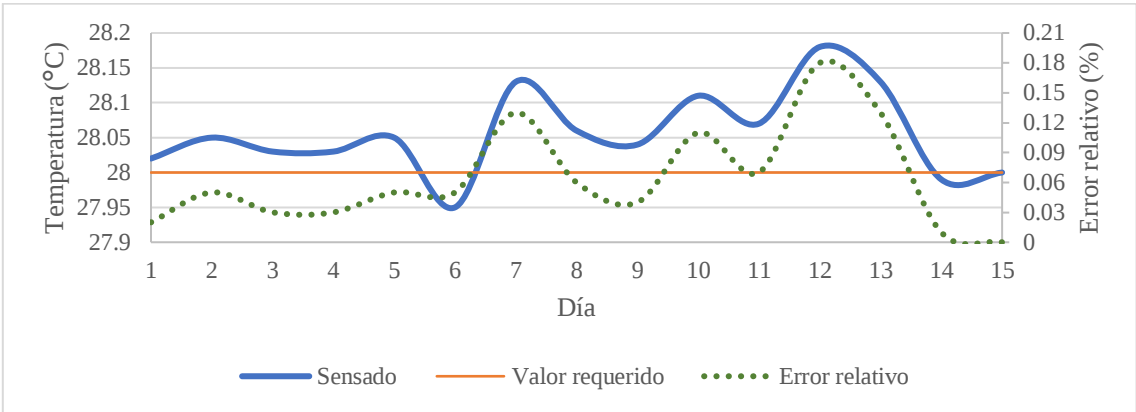


Fig. 9. Registro de temperatura.

La Figura 10 presenta la evolución de la humedad relativa, donde se muestra que el sistema automatizado logró mantener un nivel estable cercano al 65%, condición indispensable para el desarrollo micelial.

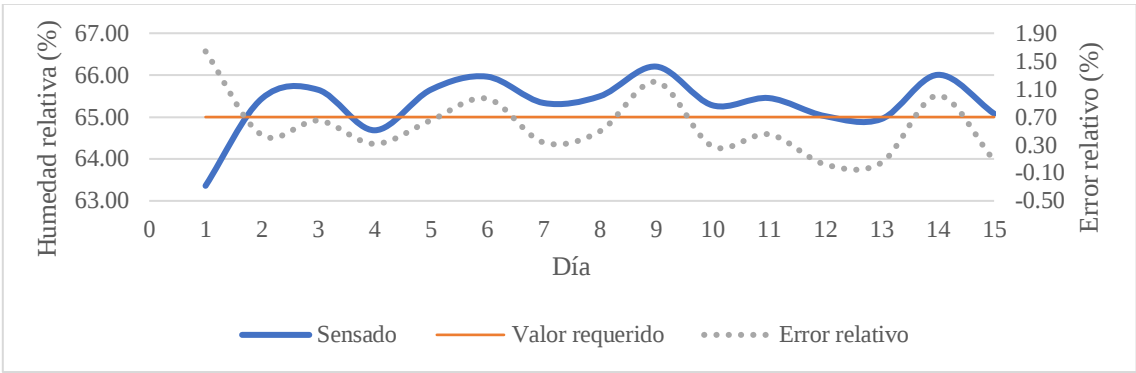


Fig. 10. Registro de humedad relativa

Durante la etapa de fructificación (15 días para el microclima y 20 para el testigo), el sistema automatizado ajustó automáticamente los parámetros ambientales conforme a los requerimientos fisiológicos de *Pleurotus djamor*. Los valores promedio registrados se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2
 VARIABLES AMBIENTALES PROMEDIO DURANTE LA FRUCTIFICACIÓN

Sistema	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO ₂ (ppm)	Días
Testigo (artesanal)	23.18	38.13	—	20
Automatizado	24.59	83.09	842.44	15

Se realizó una comparativa visual entre el sistema de cultivo artesanal utilizado como testigo y el sistema de cultivo automatizado (véase Figura 11). En dicha comparativa se obtuvieron imágenes representativas del desarrollo de los cuerpos fructíferos en ambos sistemas, tomadas bajo las mismas condiciones de observación y en instantes equivalentes del ciclo productivo. Las imágenes permitieron evidenciar de manera cualitativa las diferencias en el ritmo de

crecimiento, la uniformidad del desarrollo, el tamaño de los sombreros y la morfología general de las setas, lo que constituye un complemento visual al análisis cuantitativo de producción y eficiencia biológica obtenido durante la etapa de fructificación.

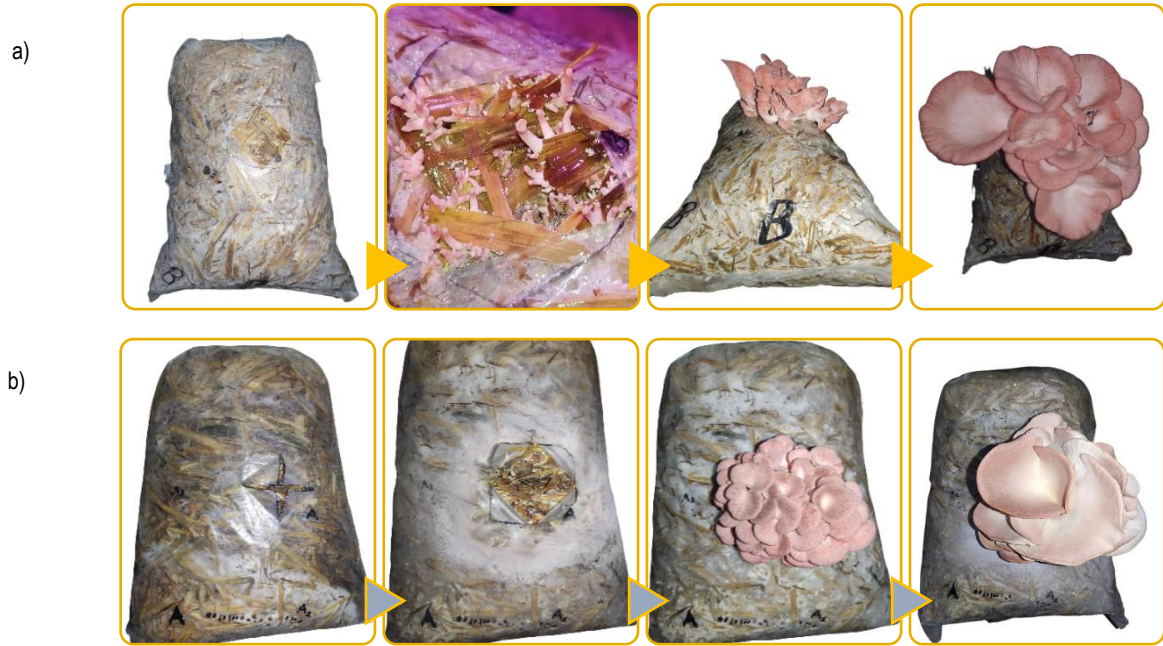


Fig. 11. Avance de fructificación: a) En hábitat y b) testigo artesanal.

El sistema automatizado permitió una producción sostenida a lo largo de seis cosechas por bolsa de cultivo, lo que evidenció un mejor aprovechamiento del sustrato y una prolongación de la fase productiva. En contraste, el sistema testigo artesanal únicamente alcanzó dos cosechas por bolsa, para una disminución temprana en la capacidad de producción. En la Figura 12 se observa la recolección de los cuerpos fructíferos en ambos sistemas, tanto en el hábitat automatizado como en el cultivo testigo, lo que permitió documentar visualmente las diferencias en cantidad, tamaño y uniformidad de las setas obtenidas durante cada corte.

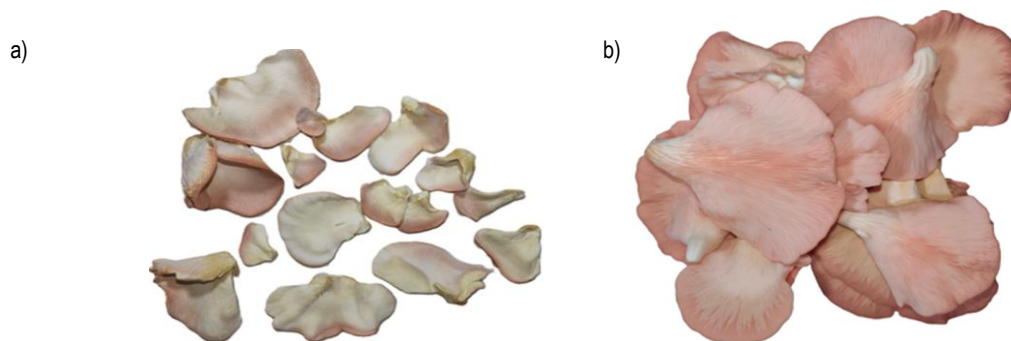


Fig. 12. Recolección del cuerpo fructífero: a) Testigo artesanal y b) Hábitat.

La Tabla 3 presenta la producción total de cuerpos fructíferos obtenida en el sistema automatizado y en el sistema testigo artesanal al término del ciclo de cultivo. Esta comparación muestra el impacto del control automático del microclima sobre el rendimiento global, con una diferencia significativa en la masa total producida entre ambos sistemas.

TABLA 3
PRODUCCIÓN TOTAL DE CUERPOS FRUCTÍFEROS

Sistema	Cosechas	Masa total (kg)
Testigo (artesanal)	6 (2 por bolsa)	0.451
Automatizado	18 (6 por bolsa)	2.49

La eficiencia biológica (EB) se calculó como la relación porcentual entre la masa de cuerpos fructíferos obtenida y la masa seca del sustrato. Los resultados por bolsa se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4
EFICIENCIA BIOLÓGICA OBTENIDA

Bolsa	EB sistema testigo (%)	EB sistema automatizado (%)
1	21.9	86.51
2	11.5	83.50
3	11.7	78.99
Promedio	15.03	83.00

Se realizaron pruebas organolépticas que consistieron en la evaluación cualitativa de las características sensoriales de los cuerpos fructíferos obtenidos, con el propósito de analizar su calidad desde el punto de vista visual, táctil y sensorial. En estas pruebas se consideraron atributos como color, tamaño del sombrero, longitud del pie, textura, aroma y percepción del sabor, para identificar diferencias asociadas a las condiciones de cultivo. Este análisis se enfoca en una valoración integral de la calidad de las setas producidas en el sistema automatizado y en el sistema testigo artesanal. Las pruebas organolépticas evidenciaron diferencias claras entre los cuerpos fructíferos obtenidos en ambos sistemas. La Tabla 5 resume los principales resultados.

TABLA 5
COMPARACIÓN DE CALIDAD SENSORIAL DE LOS CUERPOS FRUCTÍFEROS

Característica	Sistema testigo	Sistema automatizado
Color	Blanco rosado	Rosa-salmón
Sombrero	Mediano	Grande
Pie	Alargado	Corto
Textura	Seca y fibrosa	Húmeda y suave
Aroma	Ausente	Intenso
Sabor	Débil	Umami

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirmaron que el control automático del microclima influyó de manera determinante en el desempeño productivo del cultivo de *Pleurotus djamor*. La estabilidad lograda en las variables ambientales durante las etapas de incubación y fructificación permitió reproducir condiciones óptimas de crecimiento, lo que se reflejó en un incremento significativo tanto en la producción de cuerpos fructíferos como en la eficiencia biológica del sistema.

Durante la etapa de incubación, el sistema automatizado mantuvo la temperatura y la humedad relativa dentro de los rangos recomendados para el desarrollo micelial. Este comportamiento contrastó claramente con el sistema testigo artesanal, donde la baja humedad relativa y las fluctuaciones térmicas limitaron la colonización del sustrato. Resultados similares fueron reportados por [10], quienes señalaron que la inestabilidad ambiental en sistemas tradicionales afecta negativamente la expansión del micelio y reduce el rendimiento posterior del cultivo. En este estudio, la colonización homogénea observada en el sistema automatizado explicó la diferencia significativa en la productividad registrada en las etapas posteriores.

Los valores promedio de temperatura y humedad relativa alcanzados durante la incubación en el sistema automatizado se encuentran dentro de los rangos comúnmente reportados para especies del género *Pleurotus*, donde se señalan temperaturas cercanas a 25-30°C y humedades relativas superiores al 60 % como condiciones favorables para la expansión micelial. En comparación con estos estudios, el comportamiento observado en el sistema propuesto mostró una estabilidad equivalente o superior, lo que contribuyó a una colonización más eficiente del sustrato.

16

En la etapa de fructificación, el control automático de la humedad relativa resultó ser uno de los factores más relevantes. Adicionalmente, la regulación de la concentración de dióxido de carbono mediante ventilación controlada resulta un aspecto crítico durante la fructificación, ya que la acumulación de CO₂ es un fenómeno inherente al metabolismo del cultivo y puede afectar el desarrollo morfológico de los cuerpos fructíferos [15]. Mientras que el sistema testigo presentó valores promedio cercanos al 38 %, el sistema automatizado mantuvo niveles superiores al 80 %, condición indispensable para la formación de primordios y el desarrollo adecuado de los cuerpos fructíferos. El número de cosechas obtenidas constituye otro indicador relevante del impacto del sistema automatizado. En el presente estudio se alcanzaron seis cosechas por bolsa, frente a únicamente dos en el sistema artesanal. Este comportamiento evidenció un aprovechamiento más eficiente del sustrato, asociado a la estabilidad del microclima durante todo el ciclo productivo. En [11] se señaló que los sistemas autónomos de control ambiental favorecen una fructificación sostenida en el tiempo, lo cual coincide con los resultados aquí obtenidos.

El número de cosechas obtenidas por bolsa en el sistema automatizado es comparable e incluso superior a lo reportado en estudios donde se emplean sistemas de control ambiental básico o monitoreo pasivo, en los cuales la fase productiva suele limitarse a dos o tres cortes. Esta diferencia pone de manifiesto que la estabilidad del microclima no solo incrementa la producción total, sino que prolonga la vida productiva del sustrato.

La eficiencia biológica promedio del 83 % alcanzada por el sistema automatizado se ubicó dentro del rango superior reportado para el cultivo de especies del género *Pleurotus*, donde se documentan eficiencias típicas entre 60 % y 85 % bajo condiciones de control ambiental [16]. En contraste, el valor obtenido en el sistema artesanal se ubicó muy por debajo de dichos rangos, lo que evidencia el impacto directo del control automático del microclima sobre la conversión eficiente del sustrato en biomasa útil.

Desde el punto de vista de la calidad sensorial, las diferencias observadas entre ambos sistemas reforzaron la importancia del control ambiental. Las setas producidas bajo el sistema automatizado presentaron coloración aceptable, mayor tamaño de sombrero, textura húmeda y un perfil organoléptico superior al testigo. Diversos estudios han

señalado que las condiciones ambientales durante la etapa de fructificación influyen directamente en la morfología y calidad física de los cuerpos fructíferos, particularmente en el tamaño del sombrero, la textura y la uniformidad del desarrollo [17].

Un aspecto relevante de este trabajo fue la integración de una estrategia de control jerárquico con modos de operación diferenciados por etapa de cultivo. A diferencia de otros estudios centrados principalmente en el monitoreo, el sistema desarrollado permitió actuar de forma priorizada sobre las variables críticas, lo que garantizó una respuesta rápida ante desviaciones del *setpoint*. Esta característica representó una ventaja frente a sistemas que únicamente notifican cambios ambientales sin ejecutar acciones correctivas automáticas.

Finalmente, los resultados demostraron que es posible implementar un sistema de control de microclima eficiente, reproducible y con el uso de microcontroladores comerciales, sensores integrados y plataformas de monitoreo remoto de bajo costo. Esta aproximación resulta especialmente relevante para productores a pequeña y mediana escala, ya que reduce la dependencia de la experiencia empírica y permite estandarizar las condiciones de cultivo sostenible de *Pleurotus djamor*.

Se identificaron diversas líneas de trabajo futuro orientadas a mejorar el alcance del sistema. En primera instancia, se plantea la integración de sensores específicos para la medición del consumo energético. La inclusión de estas variables permitiría realizar un análisis detallado del impacto del control ambiental sobre el consumo de recursos para el desarrollo de estrategias de optimización energética del hábitat. Asimismo, se propone evaluar el desempeño del sistema automatizado en el cultivo de otras especies del género *Pleurotus* u hongos comestibles con requerimientos ambientales distintos. Esta extensión permitiría validar la adaptabilidad del sistema y su potencial como plataforma modular para diferentes escenarios productivos en contextos agrícolas diversos.

Desde el punto de vista del control, la implementación y comparación de estrategias avanzadas, tales como control predictivo basado en modelo (MPC) o control adaptativo permitiría identificar mejoras en términos de rapidez de respuesta, estabilidad y robustez ante perturbaciones externas. Adicionalmente, se considera pertinente el desarrollo de una etapa de validación a largo plazo que contemple múltiples ciclos productivos consecutivos. Esta evaluación permitiría analizar la durabilidad de los componentes electrónicos, la estabilidad del sistema de control en operación continua y el comportamiento del cultivo frente a variaciones estacionales.

V. CONCLUSIONES

El sistema diseñado operó de manera autónoma y mantuvo las variables críticas dentro de los rangos definidos para las etapas de incubación y fructificación, sin requerir intervención manual constante. Los resultados obtenidos evidenciaron que la automatización del microclima incrementó la producción total de cuerpos fructíferos y prolongó la fase productiva del sustrato. Este comportamiento indicó un aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles y una reducción del impacto de factores ambientales externos que tradicionalmente limitan el cultivo artesanal.

El incremento significativo en la eficiencia biológica alcanzada por el sistema automatizado confirmó que el control de la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono constituye un factor determinante para optimizar la conversión del sustrato en biomasa útil. En este sentido, el sistema propuesto se posicionó como una alternativa técnicamente viable para mejorar el rendimiento del cultivo sin incrementar de forma significativa la complejidad operativa.

La arquitectura basada en microcontrolador, sensores integrados y actuadores eléctricos de bajo costo demostró ser adecuada para aplicaciones agrícolas a pequeña escala. La estrategia de control jerárquico permitió priorizar la corrección de las variables críticas en cada momento del proceso, lo que aseguró una respuesta estable ante perturbaciones y transiciones entre etapas de cultivo.

Adicionalmente, la implementación de interfaces de monitoreo remoto facilitó la supervisión del sistema y la gestión de parámetros operativos, lo que redujo la dependencia de la experiencia empírica del productor. Esta característica aportó un valor adicional al sistema, al permitir su operación continua y su adaptación a distintos escenarios productivos. En conjunto, los resultados confirmaron que el control automático del microclima constituye una herramienta eficaz para mejorar la productividad, la eficiencia biológica y la calidad del cultivo de *Pleurotus djamor*.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: ODH; JJNC; Methodology: MAPR; Software: ODH; Investigation: ODH; JJNC; Writing-original draft preparation MAPR; Writing-review and editing: AJPN; Supervision: MAPR; Formal analysis: ODH; JJNC; Project administration: MAPR; Funding acquisition: AJPN.

Funding: The authors declare that no external funding was received.

Data Availability Statement: The data are available within the article.

Acknowledgments: The authors acknowledge the Instituto Politécnico Nacional and the Secretaría de Investigación y Posgrado through the SIP Project 20251296 for supporting the development of this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

18

REFERENCIAS

- [1] K. Miśkiewicz, D. Gendaszewska, K. Sieczyńska, et al., “Agri-food wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation and their agricultural potential,” *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 42617, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26843-y>
- [2] R. S. Jarial, K. Jarial, J. N. Bhatia, “Comprehensive review on oyster mushroom species (*Agaricomycetes*): Morphology, nutrition, cultivation and future aspects,” *Heliyon*, vol. 10, no. 5, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26539>
- [3] S. Patil, S. Chonde, G. Pathade, “Production of mushrooms: A short review,” *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 30, pp. 296–304, 2024, <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i02s.061>
- [4] H. T. Hoa, C. Wang, “The effects of temperature and nutritional conditions on mycelium growth of oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*,” *Food Technology and Biotechnology*, 2015, <https://doi.org/10.5941/myco.2015.43.1.14>
- [5] C. Sánchez, “Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 85, no. 5, pp. 1321–1337, 2010, <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- [6] P. Badoni, S. A. Siddiqui, “Metamorphosis of mushroom production from tradition to automation,” *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 9, Art. no. 974, 2025, <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07517-w>
- [7] R. R. Shamshiri, J. W. Jones, K. R. Thorp, D. Ahmad, H. Che Man, S. Taheri, “Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of agricultural crops,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 150, pp. 239–257, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.010>

- [8] A. R. Villafuerte, et al., “Precision microclimate control using IoT for enhanced production of *Pleurotus ostreatus*,” in IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, vol. 1572, no. 1, Art. no. 012016, 2025, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1572/1/012016>
- [9] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, E. H. M. Aggoune, “Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1788–1818, 2019, <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2932620>
- [10] M. Rukhiran, C. Sutanthavibul, S. Boonsong, P. Netinant, “IoT-based mushroom cultivation system with solar renewable energy integration: Assessing the sustainable impact of the yield and quality,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, Art. no. 13968, 2023, <https://doi.org/10.3390/su151813968>
- [11] Ž. Kavaliauskas, et al., “Intelligent control of mushroom growing conditions using an electronic system for monitoring and maintaining environmental parameters,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, Art. no. 13040, 2022, <https://doi.org/10.3390/app122413040>
- [12] A. Sivagami, M. A. Kandavalli, B. Yakkala, “Design and evaluation of an automated monitoring and control system for greenhouse crop production,” in *Next-Generation Greenhouses for Food Security*, IntechOpen, 2021, <https://doi.org/10.5772/intechopen.97316>
- [13] A. Mellit, et al., “Design of a novel remote monitoring system for smart greenhouses using the internet of things and deep convolutional neural networks,” *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 5045, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14165045>
- [14] Y. Kim, R. G. Evans, W. M. Iversen, “Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 7, pp. 1379–1387, 2008, <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
- [15] M.-A. Meilleur, D. Bastien, D. Monfet, “Modeling Mushrooms’ Carbon Dioxide Emission and Heat Exchange Rates for Synergistic Cultivation with Leafy Greens,” *Sustainability*, vol. 15, no. 24, Art. no. 16740, 2023, <https://doi.org/10.3390/su152416740>
- [16] A. N. Philippoussis, “Production of mushrooms using agro-industrial residues as substrates,” in *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 163–196, 2009, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_7
- [17] D. J. Royse, J. Baars, Q. Tan, “Current overview of mushroom production in the world,” in *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications*, pp. 5–13, 2017, <https://doi.org/10.1002/9781119149446.ch2>

Evaluación comparativa de los modelos DMST y LLFVW para la predicción del desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical

Comparative evaluation of DMST and LLFVW models for predicting the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines

Raúl Alberto **Bernal Orozco**¹
Oliver Marcel **Huerta Chavez**²
Daniel Enrique **Constantino Recillas**³

Tecnológico Nacional de México,
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec,
División de Ingeniería Aeronáutica, MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0002-1141-6357 / rbeorz@gmail.com

³ ORCID: 0000-0001-9806-9329 / danielcr@tese.edu.mx

Instituto Politécnico Nacional,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Ticomán, MÉXICO

² ORCID: 0000-0002-2932-2033 / ohuertac@ipn.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 5/01/2026, aceptado 20/02/2026, publicado 25/02/2026.



Resumen

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) requieren modelos aerodinámicos eficientes que permitan predecir su desempeño con un costo computacional reducido, especialmente en etapas preliminares de diseño y análisis paramétrico. En este trabajo se presenta una evaluación comparativa de dos modelos aerodinámicos simplificados ampliamente utilizados: el modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST) y el modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW). Ambos enfoques se aplican a una turbina tipo Darrieus-H de pequeña escala y se validan mediante datos experimentales reportados en la literatura. Se analizan dos configuraciones de modelado con distinto nivel de complejidad física, considerando la influencia de las pérdidas por inducción, la expansión de la estela y los efectos aerodinámicos no estacionarios. Los resultados muestran que el modelo DMST tiende a sobreestimar el coeficiente de potencia máximo y a desplazar el punto de operación óptimo hacia valores mayores de la razón de velocidad de punta (TSR), incluso cuando se incorporan correcciones por pérdidas en punta y factores de inducción variables. En contraste, el modelo LLFVW reproduce con mayor fidelidad la dinámica de la estela y los efectos no estacionarios, logrando un mejor acuerdo con los datos experimentales a lo largo de todo el rango operativo. En particular, el LLFVW captura con mayor precisión tanto la magnitud como la posición del pico de desempeño, identificándose como un modelo más confiable para la predicción aerodinámica de VAWTs.

Palabras clave: turbinas eólicas de eje vertical, energía eólica, desempeño aerodinámico, DMST, LLFVW.

Abstract

Vertical axis wind turbines (VAWTs) require efficient aerodynamic models that can predict their performance at a low computational cost, especially in the preliminary stages of design and parametric analysis. This paper presents a comparative evaluation of two widely used simplified aerodynamic models: the Double Multiple Stream Tube (DMST) model and the Lift Line with Free Vortex Trail (LLFVW) model. Both approaches are applied to a small-scale Darrieus-H turbine and validated using experimental data reported in the literature. Two modeling configurations with different levels of physical complexity are analyzed, considering the influence of induction losses, wake expansion, and unsteady aerodynamic effects. The results show that the DMST model tends to overestimate the maximum power coefficient and shift the optimum operating point toward higher tip speed ratio (TSR) values, even when corrections for tip losses and variable induction factors are incorporated. In contrast, the LLFVW model more accurately reproduces wake dynamics and non-stationary effects, achieving better agreement with experimental data across the entire operating range. In particular, the LLFVW more accurately captures both the magnitude and position of peak performance, identifying itself as a more reliable model for the aerodynamic prediction of VAWTs.

Index terms: vertical axis wind turbine, wind energy, aerodynamic performance, DMST, LLFVW.

I. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos más sostenibles ha impulsado el desarrollo y la adopción de tecnologías de generación eléctrica basadas en fuentes renovables. En este contexto, la energía eólica se ha consolidado como una de las alternativas más maduras y ampliamente implementadas a nivel mundial. No obstante, la mayor parte de las instalaciones eólicas comerciales emplean turbinas de eje horizontal, las cuales presentan limitaciones cuando se consideran aplicaciones a pequeña escala o entornos urbanos, donde predominan flujos altamente variables y restricciones espaciales.

En México, la expansión metropolitana y la densificación poblacional plantean retos adicionales para los esquemas convencionales de generación y distribución de energía. Proyecciones demográficas estiman que la población nacional alcanzará aproximadamente 138 millones de habitantes en 2030 y 146 millones en 2050 [1], mientras que una fracción significativa de los municipios presentará características predominantemente urbanas [2]. En este escenario, la integración de tecnologías de generación distribuida, incluyendo sistemas eólicos de pequeña escala, representa una alternativa relevante para complementar la matriz energética y fortalecer la resiliencia de los sistemas urbanos.

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) han resurgido como una opción de interés para este tipo de aplicaciones (Fig. 1), debido a su capacidad de operar independientemente de la dirección del viento, su configuración compacta y su potencial para funcionar bajo condiciones de flujo altamente turbulentas. Estas características las hacen particularmente atractivas para entornos urbanos y para esquemas de generación distribuida.

3

El diseño y análisis aerodinámico de las VAWT requiere herramientas que permitan predecir su desempeño de manera eficiente y con un costo computacional reducido. Si bien las simulaciones numéricas de alta fidelidad, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), ofrecen un elevado nivel de detalle, su uso resulta limitado en etapas tempranas de diseño y en estudios paramétricos extensos. En este contexto, los modelos aerodinámicos simplificados desempeñan un papel fundamental al permitir evaluaciones rápidas del comportamiento de la turbina, manteniendo un equilibrio adecuado entre precisión y esfuerzo computacional.

En este trabajo se presenta una evaluación comparativa de dos de los modelos aerodinámicos simplificados más utilizados para el análisis de turbinas eólicas de eje vertical: el modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST) y el modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW). El desempeño predictivo de ambos enfoques se analiza mediante su aplicación a una turbina tipo Darrieus-H y su validación con datos experimentales reportados en la literatura, con el objetivo de identificar sus alcances y limitaciones en distintos regímenes de operación.

II. MODELOS AERODINÁMICOS SIMPLIFICADOS

Los modelos aerodinámicos simplificados permiten estimar las fuerzas aerodinámicas y el desempeño global de una turbina eólica mediante una representación reducida del campo de flujo. En lugar de resolver directamente las ecuaciones completas de Navier-Stokes, estos modelos se apoyan en hipótesis físicas y relaciones semiempíricas que capturan los mecanismos dominantes del intercambio de cantidad de movimiento entre el rotor y el flujo incidente.

Su principal ventaja radica en el bajo costo computacional, lo que los hace adecuados para estudios comparativos, análisis paramétricos y validación preliminar de configuraciones geométricas. No obstante, su precisión depende del grado en que los supuestos adoptados representen adecuadamente los fenómenos aerodinámicos relevantes, particularmente en regímenes no estacionarios característicos de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT).

A. Modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST)

El modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (Double–Multiple Streamtube, DMST) es una extensión del modelo clásico de tubo de corriente basado en la teoría del momentum de Rankine–Froude [3]. Esta formulación fue originalmente desarrollada para el análisis de hélices y rotores, y posteriormente adaptada al estudio de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical. Su formulación combina la conservación unidimensional de la cantidad de movimiento con la teoría de elemento de pala (BET), permitiendo estimar el desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) con bajo costo computacional.

El modelo se fundamenta en las hipótesis de flujo incompresible, cuasi-estacionario y unidimensional dentro de cada tubo de corriente, asumiendo que no existe interacción lateral entre tubos adyacentes ni expansión radial de la estela. La estela no se modela explícitamente; su efecto se incorpora de manera implícita mediante el factor de inducción axial.

En este enfoque, la turbina se modela como un disco actuador permeable que induce una reducción de la velocidad del flujo a medida que extrae energía cinética del viento [4]. Para capturar la marcada asimetría del flujo en VAWT, el dominio se divide en dos regiones independientes: la mitad a barlovento (upwind) y la mitad a sotavento (downwind). Cada región se discretiza en múltiples tubos de corriente distribuidos azimutalmente, dentro de los cuales se resuelve localmente el equilibrio entre cargas aerodinámicas e inducción.

Para cada tubo de corriente, la interacción rotor–flujo se caracteriza mediante el factor de inducción axial a , que relaciona la velocidad en el plano del rotor U_i y la velocidad en la estela U_e con la velocidad de flujo libre U_∞ :

$$U_i = U_\infty(1 - a) \quad (1)$$

$$U_e = U_\infty(1 - 2a) \quad (2)$$

Desde la teoría del momentum lineal [5], el coeficiente de carga axial del tubo de corriente se expresa como:

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3)$$

En el modelo DMST, esta relación se aplica de manera independiente en las regiones a barlovento y sotavento, utilizando factores de inducción distintos a_u y a_d . La velocidad incidente en la región a sotavento se calcula a partir de la velocidad de salida de la región a barlovento (ecuación (2)), lo que introduce un acoplamiento parcial entre ambas mitades del rotor y permite capturar, de forma promedio, la interacción del flujo a través del plano del rotor.

Las cargas aerodinámicas se obtienen mediante teoría de elemento de pala. Para una posición azimutal θ , la velocidad relativa adimensional U_r puede escribirse como:

$$U_r = \sqrt{[(\lambda + (1 - a) \cos \theta)]^2 + [(1 - a) \sin \theta]^2} \quad (4)$$

donde $\lambda = \omega R / U_\infty$ es la razón de velocidad de punta, ω la velocidad angular del rotor y R el radio de la turbina.

El ángulo de ataque α instantáneo de la pala, que varía de manera periódica a lo largo del ciclo de rotación, se obtiene a partir de la relación geométrica entre las componentes del flujo relativo, y se calcula como:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a)\sin\theta}{\lambda + (1-a)\cos\theta} \right) \quad (5)$$

A partir del ángulo de ataque y del número de Reynolds local, se obtienen los coeficientes aerodinámicos de sustentación C_L y arrastre C_D , que se proyectan en componentes normal y tangencial al movimiento de la pala mediante:

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (6)$$

$$C_t = -C_D \cos \alpha + C_L \sin \alpha \quad (7)$$

La carga axial del rotor por unidad de altura se expresa como:

$$T' = \frac{1}{2} \rho U_r^2 c (C_n \sin \theta - C_t \cos \theta) \quad (8)$$

5

donde ρ es la densidad del aire y c la cuerda de la pala. La carga axial del rotor calculada mediante la ecuación (8) se iguala iterativamente con el coeficiente de carga axial obtenido a partir de la teoría del momentum (ecuación (3)), ajustando el valor del factor de inducción a hasta alcanzar la convergencia.

El procedimiento descrito se aplica de manera independiente en las regiones a barlovento y sotavento, considerando que la velocidad incidente en la región a sotavento corresponde a la velocidad de la estela definida por la ecuación (2). De este modo, el modelo DMST permite capturar la interacción asimétrica del flujo a través del rotor.

En la Fig. 1(a) se muestra el esquema general del modelo DMST, donde se representan los tubos de corriente independientes en las regiones de barlovento y sotavento, así como las velocidades características del flujo: la velocidad de corriente libre U_∞ , la velocidad inducida en barlovento U_u , la velocidad de salida o de estela intermedia U_e , la velocidad inducida en sotavento U_d y la velocidad en la estela lejana U_w . Estas velocidades describen la disminución progresiva del momento lineal del flujo a medida que el rotor extrae energía cinética.

La Fig. 1(b) complementa esta representación mostrando el triángulo local de velocidades en un elemento de pala. La velocidad tangencial U_t asociada a la rotación del rotor (ωR) se combina vectorialmente con la velocidad normal inducida U_n para generar la velocidad relativa U_r , que determina el ángulo de ataque instantáneo α . Este ángulo gobierna los coeficientes aerodinámicos de sustentación C_L y arrastre C_D , cuyas proyecciones en las direcciones normal y tangencial producen las fuerzas F_n y F_t . La componente tangencial es responsable de la generación de torque y potencia, mientras que la componente normal contribuye a la carga axial del rotor.

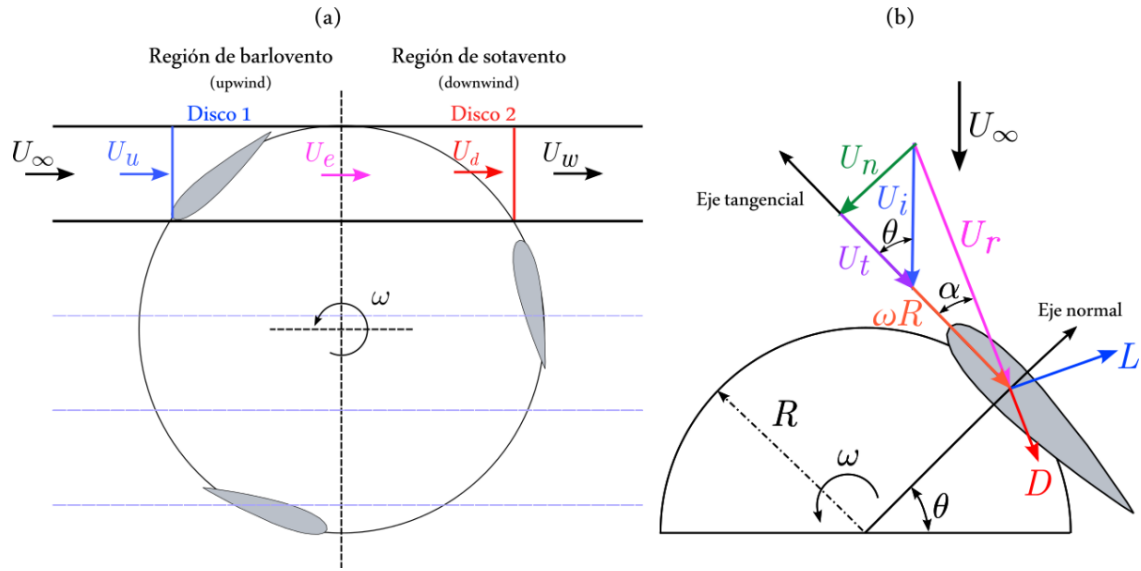


Fig. 1. Esquema del modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST) aplicado a una turbina eólica de eje vertical.

6

Una vez determinadas las fuerzas aerodinámicas instantáneas normal F_n y tangencial F_t para cada posición azimutal, las cargas globales promedio del rotor se obtienen mediante integración sobre una revolución completa.

La carga axial media T y el torque medio Q se calculan como:

$$T = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} (F_t \cos \theta - F_n \sin \theta) d\theta \quad (9)$$

$$Q = \frac{NR}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (10)$$

donde N es el número de palas, R el radio del rotor. Finalmente, la potencia mecánica se obtiene como:

$$P = Q\omega \quad (11)$$

donde ω es la velocidad angular.

Si bien el modelo DMST constituye una herramienta computacionalmente eficiente para el análisis preliminar del desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical, su precisión depende en gran medida de la calidad de los datos aerodinámicos disponibles y de las correcciones empíricas empleadas. Al no resolver explícitamente la estela ni los efectos no estacionarios, puede presentar desviaciones en regímenes de operación con valores elevados de la razón de velocidad de punta (λ), donde la interacción dinámica pala-estela, los fenómenos no estacionarios y la separación dinámica adquieren mayor relevancia.

B. Modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW)

El modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (Lifting Line Free Vortex Wake, LLFVW) representa un enfoque de mayor fidelidad física dentro de los modelos aerodinámicos de orden reducido. Se fundamenta en la hipótesis de flujo potencial incompresible y combina la teoría clásica de línea sustentadora con una representación explícita y lagrangiana de la estela mediante vórtices libres. Esta formulación permite describir de manera consistente la generación de cargas aerodinámicas y la interacción no estacionaria pala-estela, incorporando efectos tridimensionales ausentes en modelos basados exclusivamente en teoría del momentum.

En el modelo LLFVW, cada pala se representa como una línea sustentadora ubicada, de manera convencional, en el cuarto de cuerda del perfil aerodinámico. Sobre esta línea se distribuye una circulación variable Γ , a lo largo de la pala y del tiempo. La circulación asociada genera vórtices ligados, mientras que sus gradientes temporales y espaciales originan vórtices liberados y vórtices de borde de salida, los cuales conforman una estela tridimensional que evoluciona libremente en el tiempo. La intensidad y conservación de dichos vórtices se rige por los teoremas de Helmholtz y Kelvin, garantizando la conservación global de la circulación. En la Fig. 2 se presenta un esquema del modelo LLFVW.

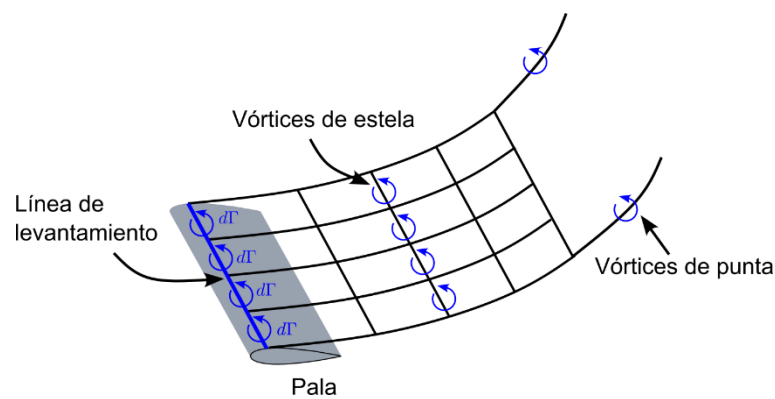


Fig. 2. Esquema del modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW).

En la formulación de línea sustentadora, la fuerza de sustentación diferencial que actúa sobre un elemento de pala se relaciona con la circulación en la sección mediante la relación de Kutta-Joukowski [6]:

$$\partial F_L = \rho U_r \partial \Gamma \quad (12)$$

donde ρ es la densidad del aire, U_r es la velocidad relativa experimentada por el elemento de pala, y $\partial \Gamma$ representa la variación de circulación asociada a dicho elemento. La velocidad relativa U_r incluye la contribución del flujo libre, la velocidad tangencial debida a la rotación y las velocidades inducidas por los vórtices ligados y por la estela.

Las velocidades inducidas por los vórtices ligados y por los vórtices de la estela se calculan a partir de la ley de Biot–Savart, que permite evaluar la influencia de cada vórtice sobre un punto del dominio fluido. En su forma integral general, la velocidad inducida puede expresarse por:

$$\mathbf{U}_i = -\frac{1}{4\pi} \int \Gamma \frac{\mathbf{r} \times d\mathbf{l}}{r^3} \quad (13)$$

donde $\mathbf{r}$ es el vector que conecta el vórtice con el punto evaluado y $d\mathbf{l}$ es el vector diferencial asociado al segmento de vórtice.

Dado que la expresión (13) presenta una singularidad cuando $r \rightarrow 0$, se emplea una formulación desingularizada de la ley de Biot–Savart [7], introduciendo un radio de núcleo r_c que modela la estructura finita del vórtice y permite representar de manera aproximada la difusión viscosa:

$$\mathbf{U}_i = -\frac{1}{4\pi} \int \Gamma \frac{\mathbf{r} \times d\mathbf{l}}{(r^2 + r_c^2)^{3/2}} \quad (14)$$

El radio de núcleo r_c evoluciona temporalmente según leyes empíricas de difusión, lo que permite incorporar efectos viscosos de manera simplificada sin recurrir al elevado costo computacional de simulaciones completas de dinámica de fluidos computacional.

La evolución temporal de la estela se modela explícitamente mediante un enfoque lagrangiano. En cada paso de tiempo se desprenden nuevos vórtices de borde de salida y vórtices asociados a variaciones de circulación, los cuales son posteriormente transportados con la velocidad local del flujo (suma de la velocidad libre y la velocidad inducida). Este procedimiento permite capturar de manera natural la deformación, interacción y autoinducción de la estela.

Gracias a esta representación explícita, el modelo LLFVW es capaz de reproducir fenómenos aerodinámicos no estacionarios y tridimensionales, tales como la interacción pala–estela, la liberación periódica de vórtices y la formación de vórtices de punta. Estas capacidades resultan particularmente relevantes en turbinas eólicas de eje vertical, donde el ángulo de ataque varía cíclicamente durante cada revolución y los efectos no estacionarios dominan la generación de cargas.

En las simulaciones realizadas, los efectos de desplome dinámico (*dynamic stall*) se modelaron mediante los dos modelos de desplome dinámico: el modelo Øye [8], [9], y el modelo IAG [10], [11]. El modelo de Øye representa la pérdida dinámica a través de una función de separación que interpola entre flujo adherido y flujo separado. La evolución temporal de dicha función se describe mediante una ecuación de relajación dependiente de la cuerda y de la velocidad relativa, utilizando polares aerodinámicas estáticas como referencia.

Por su parte, el modelo IAG [10], [11], formulado en espacio de estados, permite representar con mayor fidelidad la dinámica no estacionaria del flujo, incluyendo efectos de histéresis aerodinámica, formación y convección de vórtices dinámicos y respuesta ante variaciones rápidas del ángulo de ataque, características del funcionamiento de turbinas eólicas de eje vertical.

Con el objetivo de evaluar la influencia del modelado del desplome dinámico dentro del marco LLFVW, se consideraron dos configuraciones: en el Caso 1 se empleó el modelo de Øye [8], [9], mientras que en el Caso 2 se implementó el modelo IAG [10], [11]. Esta comparación permite analizar la sensibilidad de las predicciones aerodinámicas al nivel de complejidad del modelo de pérdida dinámica.

En conjunto, el modelo LLFVW ofrece un equilibrio adecuado entre fidelidad física y eficiencia computacional. En comparación con modelos basados en teoría del momentum, como el DMST, el LLFVW permite resolver explícitamente la estructura y evolución de la estela, resultando más robusto en regímenes con altos valores de la razón de velocidad de punta y fuerte interacción no estacionaria pala–estela. Por esta razón, en el presente trabajo el LLFVW se emplea tanto como herramienta de predicción del desempeño aerodinámico como referencia de mayor fidelidad para evaluar los resultados obtenidos mediante el modelo DMST.

El presente trabajo impacta principalmente en el diseño aerodinámico y geométrico de turbinas eólicas de eje vertical, especialmente en etapas conceptual y preliminar, donde es fundamental estimar de manera rápida y confiable el desempeño del rotor bajo diferentes configuraciones y condiciones de operación. El modelo DMST proporciona una herramienta eficiente para explorar geometrías y parámetros generales del rotor, mientras que el modelo LLFVW, al capturar explícitamente la interacción pala–estela y los efectos no estacionarios, permite un análisis preliminar avanzado de cargas aerodinámicas más realista. De manera indirecta, la predicción más precisa de las fuerzas sobre las palas también tiene implicaciones para el diseño mecánico y estructural, contribuyendo a la evaluación de esfuerzos, fatiga y dimensionamiento en fases posteriores del desarrollo.

9

III. METODOLOGÍA

A. Selección del aerogenerador

Con el objetivo de aislar el efecto de los modelos aerodinámicos empleados y evitar la influencia de variaciones geométricas, se utilizó una única configuración de turbina eólica de eje vertical a lo largo de todo el estudio. De esta forma, cualquier diferencia observada en el desempeño aerodinámico puede atribuirse directamente al modelo de simulación y no a cambios en la geometría del rotor.

La geometría seleccionada se basa en un aerogenerador de pequeña escala ampliamente documentado en la literatura y utilizado como caso de referencia experimental [12], [13]. El sistema analizado corresponde a una turbina Darrieus tipo H, compuesta por tres palas rectas dispuestas simétricamente alrededor del eje de rotación y equipadas con perfiles aerodinámicos NACA 0021.

Este tipo de configuración resulta representativa de aplicaciones urbanas y de microgeneración, debido a su simplicidad constructiva, su facilidad de fabricación y su capacidad de operar bajo condiciones de viento variables. Además, las turbinas Darrieus tipo H presentan variaciones cíclicas pronunciadas del ángulo de ataque, lo que las convierte en un caso de estudio adecuado para evaluar las diferencias entre modelos aerodinámicos estacionarios y no estacionarios.

Las dimensiones principales del rotor y los parámetros geométricos considerados se resumen en la Tabla 1, mientras que la configuración general del aerogenerador se ilustra esquemáticamente en la Fig. 3. En todos los casos se mantuvieron constantes el radio del rotor, la altura de las palas y el número de álabes.

TABLA 1
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL AEROGENERADOR ANALIZADO

	Parámetro	Valor
1	Número de Palas (N)	3
2	Radio del rotor (R)	0.0515 m
3	Cuerda (c)	0.085m
4	Altura de las palas (H)	1.5 m
5	Área (A_s)	1.5 m ²
6	Solidez ($\sigma = NcH/A_s$)	0.247

La solidez del rotor, definida como la relación entre el área total de las palas y el área barrida por el rotor, se mantuvo dentro de valores típicos reportados para turbinas eólicas de eje vertical de pequeña escala [14].

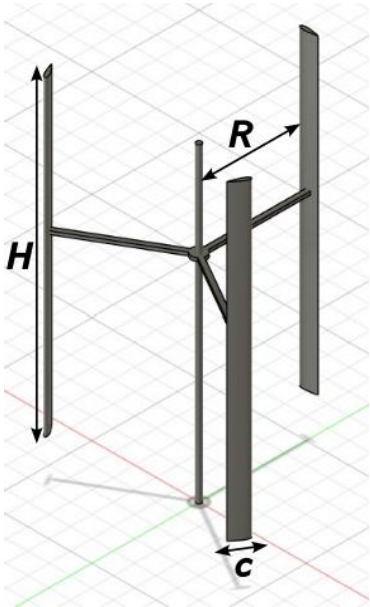


Fig. 3. Turbina VAWT tipo Darrieus-H de tres palas.

B. Configuración de las simulaciones en QBlade

El análisis aerodinámico se llevó a cabo utilizando QBlade, un software de código abierto ampliamente empleado en investigación académica para el estudio del desempeño de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical. QBlade integra distintos modelos aerodinámicos de complejidad variable, lo que permite realizar comparaciones sistemáticas bajo condiciones numéricas controladas y reproducibles.

Con el fin de asegurar la coherencia metodológica, se adoptó un flujo de trabajo estandarizado, ilustrado esquemáticamente en la Fig. 4, que comprende la definición de los perfiles aerodinámicos, el cálculo de sus polares,

la configuración geométrica del rotor y la simulación del desempeño global del aerogenerador mediante distintos modelos aerodinámicos.

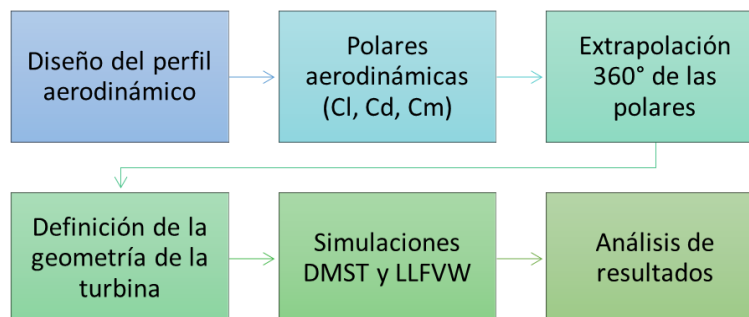


Fig. 4. Flujo de trabajo en QBlade.

En una primera etapa, se definieron los perfiles aerodinámicos de las palas utilizando el generador interno de perfiles NACA disponible en QBlade. Posteriormente, se calcularon sus características aerodinámicas mediante el módulo XFOIL integrado, considerando números de Reynolds representativos de aerogeneradores de pequeña escala. Dado que las turbinas eólicas de eje vertical operan bajo condiciones de flujo inherentemente no estacionarias, las polares aerodinámicas se extendieron a un rango completo de ángulos de ataque, permitiendo describir de forma más realista el comportamiento aerodinámico de las palas a lo largo de todo el ciclo de rotación. Para extrapolar las polares se utilizó el método de Montgomerie [15].

Una vez definidos los perfiles, se configuró la geometría del rotor manteniendo constantes los parámetros geométricos descritos en la Sección 3.1. A partir de esta configuración, se realizaron simulaciones del desempeño aerodinámico empleando tanto el modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST) como el modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW), con el objetivo de comparar su capacidad predictiva bajo condiciones equivalentes.

En ambos casos de estudio, el modelo DMST se empleó para realizar análisis estacionarios del desempeño del aerogenerador. El rotor se discretizó en 20 elementos por pala, lo que permitió capturar la variación azimutal de las fuerzas aerodinámicas a lo largo de la rotación. Para cada condición de operación, el sistema de ecuaciones se resolvió de manera iterativa hasta alcanzar un criterio de convergencia de 10^{-5} , con un máximo de 500 iteraciones.

En el Caso 1, el modelo DMST se aplicó en su formulación básica, sin correcciones adicionales. En el Caso 2, se incorporaron correcciones por pérdidas de punta y el uso de factores de inducción variables, con el fin de evaluar el impacto de estos refinamientos sobre la predicción del desempeño aerodinámico.

Las simulaciones no estacionarias se realizaron mediante el modelo LLFVW, el cual permite resolver explícitamente la evolución de la estela y los efectos aerodinámicos transitorios. La discretización azimutal se estableció en incrementos de 4° y cada pala se representó mediante 20 paneles, manteniendo coherencia con la discretización empleada en el modelo DMST. Cada simulación se extendió durante un total de 10 revoluciones completas del rotor, garantizando que los efectos transitorios iniciales se disiparan y que los resultados correspondieran a un régimen periódico establecido.

Con el objetivo de evaluar la influencia del modelado del desplome dinámico, se consideraron dos formulaciones dentro del marco LLFVW. En el Caso 1 se empleó el modelo de Øye [8], [9]. En el Caso 2 se implementó el modelo IAG [10], [11].

Los parámetros ambientales, operativos y numéricos empleados en las simulaciones DMST y LLFVW, incluyendo las condiciones de viento, rangos de razón de velocidad de punta (TSR) y ajustes específicos de cada modelo, se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL AEROGENERADOR ANALIZADO

	Parámetro	Magnitud
1	Densidad del aire (ρ)	1.225 kg/m ³
2	Viscosidad cinemática (ν)	1.647x10 ⁻⁵ m ² /s
3	Velocidad del viento (U)	6 - 16 m/s
4	Velocidad angular (ω)	400 rpm
5	TSR (λ)	1.3 - 3.5

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

12

A. Caso 1: DMST sin correcciones y LLFVW con modelo Øye

La Fig. 5 presenta la comparación del coeficiente de potencia (CP) en función de la razón de velocidad de punta (λ), obtenida mediante los modelos DMST y LLFVW, junto con los datos experimentales de referencia.

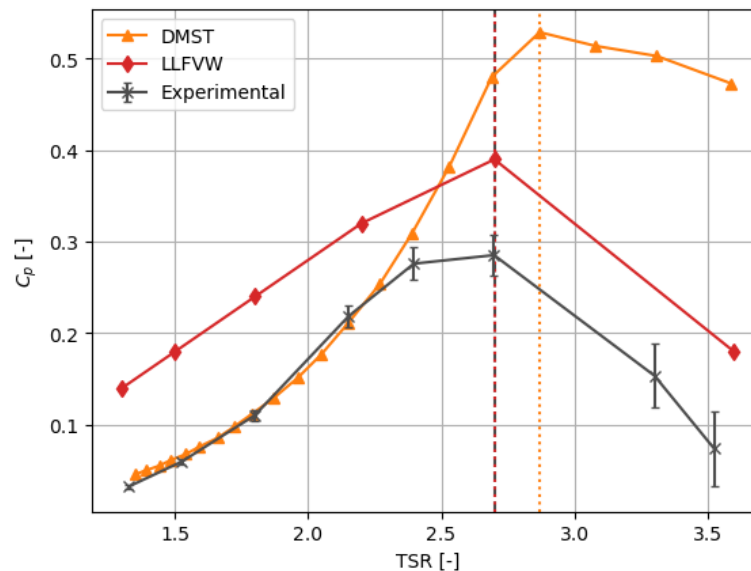


Fig. 5. Comparación del coeficiente de potencia en función del TSR empleando modelos aerodinámicos sin correcciones avanzadas. Las líneas verticales indican la posición del pico de desempeño predicho por cada modelo.

En términos generales, ambos modelos sobrepredicen el valor máximo del coeficiente de potencia, aunque con diferencias significativas tanto en magnitud como en la localización del punto de operación óptimo. El modelo DMST predice un valor máximo de $C_p \approx 0.53$, casi el doble del valor experimental reportado ($C_p \approx 0.28$). Esta sobreestimación sugiere que, en su formulación básica, el modelo DMST no representa adecuadamente las pérdidas por inducción ni la interacción entre las palas y la estela, particularmente en regímenes de operación cercanos al máximo desempeño.

El modelo LLFVW presenta una predicción más conservadora, con un valor máximo de $C_p \approx 0.53$. Aunque este valor sigue siendo superior al experimental, la discrepancia es significativamente menor en comparación con el modelo DMST, lo que refleja una representación más realista de la aerodinámica no estacionaria y de la dinámica de la estela.

Una diferencia clave entre ambos modelos se observa en la posición del pico de potencia. El modelo DMST desplaza el punto de máximo desempeño hacia valores más altos de razón de velocidad de punta (λ), prediciendo un valor óptimo de $\lambda \approx 2.87$ (indicado por la línea punteada naranja en la Fig. 5). En contraste, el modelo LLFVW reproduce el máximo de potencia prácticamente en el mismo valor de λ que los datos experimentales, alrededor de $\lambda \approx 2.70$ (línea discontinua roja). Este resultado es particularmente relevante desde el punto de vista del diseño y la operación, ya que indica que el modelo LLFVW es considerablemente más confiable para determinar la velocidad de rotación óptima de la turbina.

En el régimen de bajos valores de razón de velocidad de punta ($\lambda < 2.0$), el modelo DMST muestra un ajuste razonable con los datos experimentales, mientras que el modelo LLFVW tiende a sobrepredicir el coeficiente de potencia. Este comportamiento puede atribuirse al tratamiento del desplome dinámico empleado en el Caso 1, donde se utilizó el modelo de Øye [8], [9].

En particular, el modelo de Øye asume una representación simplificada de la pérdida no estacionaria basada en la evolución temporal de la separación del flujo a partir de polares aerodinámicas estáticas, siendo más adecuado para regímenes de comportamiento cuasi-bidimensional y variaciones moderadas del ángulo de ataque, típicos de valores de λ superiores a 2.0. Cuando se aplica a condiciones de bajo λ , caracterizadas por separación y dinámica altamente no estacionaria, esta simplificación conduce a una predicción menos precisa de las cargas aerodinámicas y, en consecuencia, del coeficiente de potencia.

Sin embargo, para valores de $\lambda < 2$, las palas de la turbina de eje vertical (VAWT) operan bajo ángulos de ataque elevados y variaciones rápidas de velocidad relativa, entrando en regímenes de pérdida profunda caracterizados por separación extensa del flujo, formación de vórtices de borde de ataque, fuertes efectos tridimensionales e intensa interacción con la estela. Estos fenómenos exceden las capacidades del modelo de Øye, lo que conduce a una representación inexacta de las cargas aerodinámicas y, en consecuencia, a una sobrepredicción del desempeño en este régimen operativo.

En conjunto, los resultados del Caso 1 evidencian que, aun sin correcciones adicionales, el modelo LLFVW ofrece una mejora sustancial frente al DMST en la predicción de la localización del punto de máximo desempeño, aunque la precisión a bajos valores de razón de velocidad de punta depende de manera crítica del modelo de desplome dinámico empleado.

B. Caso 2: DMST con correcciones y LLFVW con modelo IAG

La Fig. 6 muestra la comparación del coeficiente de potencia (C_p) en función de la razón de velocidad de punta (λ) para el Caso 2, donde el modelo DMST incorpora correcciones por pérdidas en punta y factores de inducción variables, mientras que el modelo LLFVW se acopla con el modelo de dynamic stall IAG [9], [13].

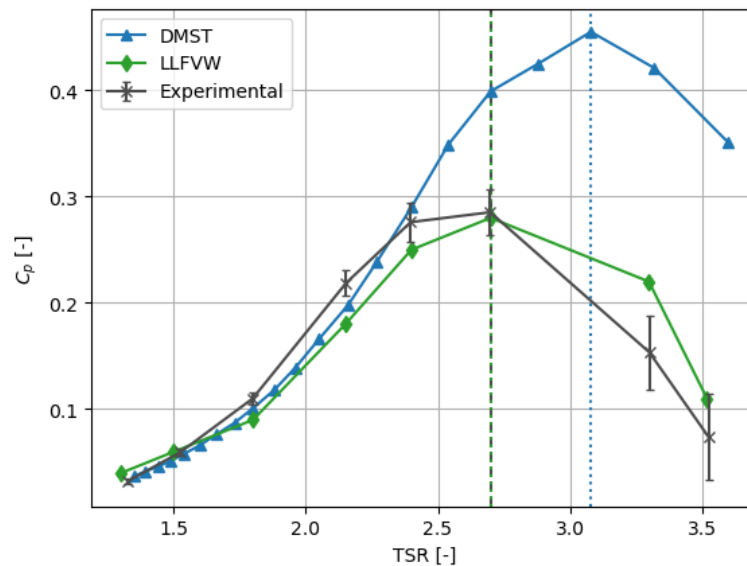


Fig. 6. Comparación del coeficiente de potencia en función del TSR empleando modelos aerodinámicos sin correcciones avanzadas. Las líneas verticales indican la posición del pico de desempeño predicho por cada modelo.

En este caso, el modelo LLFVW (línea verde con marcadores de rombo) presenta una mejora sustancial en la predicción del desempeño aerodinámico. El valor máximo del coeficiente de potencia se predice en torno a $C_p \approx 0.28$, en concordancia con el valor experimental. A diferencia de los resultados del Caso 1, la inclusión del modelo de pérdida dinámica IAG permite representar de forma más realista los efectos de histéresis asociados a ángulos de ataque elevados, evitando la sobreestimación significativa de la potencia observada previamente.

Asimismo, el modelo LLFVW identifica correctamente el punto de operación óptimo de la turbina, prediciendo el máximo de eficiencia a una razón de velocidad de punta de $\lambda = 2.7$, exactamente coincidente con el valor experimental, como se indica mediante la línea discontinua verde en la Fig. 7. Este resultado confirma la capacidad del enfoque LLFVW–IAG para capturar tanto la magnitud del desempeño como la localización precisa del punto de diseño.

Por otro lado, aunque el modelo DMST incorpora correcciones por pérdidas en punta y el uso de factores de inducción variables, continúa sobreestimando de manera significativa el coeficiente de potencia máximo. En particular, el valor pico predicho se sitúa alrededor de $C_p \approx 0.45$, lo que representa un error cercano al 55 % respecto al valor

experimental ($C_p \approx 0.28$). Este comportamiento indica que, si bien las correcciones mejoran parcialmente el modelo, no son suficientes para compensar las limitaciones inherentes a la formulación basada en tubos de corriente.

Adicionalmente, el modelo DMST desplaza el punto de máximo desempeño hacia valores más altos de razón de velocidad de punta, sugiriendo un valor óptimo de $\lambda \approx 3.1$ (línea punteada azul en la Fig. 6). Este desplazamiento persiste incluso con las correcciones aplicadas y pone de manifiesto que la falta de una representación explícita y detallada de la estela y de las interacciones pala–estela limita la capacidad del modelo DMST para predecir correctamente el punto de diseño aerodinámico.

En el régimen de bajos valores de razón de velocidad de punta ($\lambda < 1.8$), el modelo DMST muestra un acuerdo notable con los datos experimentales. En esta región de operación, caracterizada por bajas revoluciones y una estructura de estela menos compleja, las hipótesis del modelo DMST resultan más aceptables y permiten una representación razonable del comportamiento global de la turbina.

En conjunto, los resultados del Caso 2 demuestran que la combinación del modelo LLFVW con un modelo avanzado de desplome dinámico como el IAG constituye una herramienta robusta para la predicción del desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), tanto en términos de magnitud del coeficiente de potencia como en la correcta identificación del punto de operación óptimo. Por el contrario, incluso con correcciones aerodinámicas adicionales, el modelo DMST mantiene limitaciones estructurales que afectan su precisión en regímenes cercanos al máximo desempeño.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo una comparación sistemática entre dos modelos aerodinámicos simplificados ampliamente utilizados para el análisis de turbinas eólicas de eje vertical: el modelo de Doble Tubo de Corriente Múltiple (DMST) y el modelo de Línea Sustentadora con Estela de Vórtices Libres (LLFVW). La evaluación se realizó mediante la validación con datos experimentales disponibles en la literatura [12] y considerando dos configuraciones de modelado con distinto nivel de complejidad física.

Los resultados muestran que el modelo DMST presenta limitaciones importantes en la predicción del desempeño aerodinámico máximo del rotor. En el primer caso analizado, el DMST sobreestimó el coeficiente de potencia máximo en aproximadamente un 90 %, prediciendo un valor de $C_p \approx 0.53$ frente al valor experimental de $C_p \approx 0.28$, además de desplazar el punto de operación óptimo hacia una razón de velocidad de punta de $\lambda \approx 2.9$, superior al valor experimental de $\lambda \approx 2.7$. En el segundo caso, aun incorporando correcciones por pérdidas en punta y factores de inducción variables, el modelo DMST continuó sobreestimando el desempeño máximo en alrededor de 55 %, situando el pico de potencia en $C_p \approx 0.45$ y desplazando el TSR óptimo hasta $\lambda \approx 3.1$.

En contraste, el modelo LLFVW demostró una mayor fidelidad física al reproducir los resultados experimentales, especialmente cuando se acopló con el modelo de desplome dinámico IAG. En esta configuración, el LLFVW predijo un coeficiente de potencia máximo de $C_p \approx 0.28$, en excelente acuerdo con el valor experimental, y localizó correctamente el punto de máxima eficiencia en $\lambda \approx 2.7$. Esta mejora se atribuye a la capacidad del modelo para representar de forma explícita la estela inducida y los efectos no estacionarios asociados a ángulos de ataque elevados, incluyendo la histéresis aerodinámica y la separación profunda del flujo.

Asimismo, se observó que el modelo DMST presenta un buen acuerdo con los resultados experimentales en regímenes de bajos valores de razón de velocidad de punta, donde la complejidad del flujo es menor y los efectos tridimensionales y no estacionarios son menos dominantes. Esto sugiere que el DMST puede ser una herramienta adecuada para estudios

preliminares, análisis de arranque o evaluaciones rápidas del desempeño relativo, siempre que se reconozcan explícitamente sus limitaciones.

En conjunto, los resultados de este trabajo ponen de manifiesto que la elección del modelo aerodinámico debe realizarse en función del objetivo del análisis. Mientras que los modelos basados en tubos de corriente ofrecen eficiencia computacional y simplicidad, los modelos de mayor fidelidad, como el LLFVW con modelos avanzados de desplome dinámico, resultan indispensables para la predicción precisa del desempeño y la correcta identificación del punto de diseño en turbinas eólicas de eje vertical.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: RABO, OMHC; Metodología: RABO, OMHC; Software: RABO, DECR; Investigación: RABO, DECR; Redacción y preparación del borrador original: RABO, OMHC, DECR; Redacción, revisión y edición: RABO, OMHC, DECR; Supervisión: OMHC, DECR; Análisis formal: RABO, OMHC; Administración del proyecto: OMHC, DECR; Adquisición de fondos: OMHC, DECR.

Financiamiento: Los autores declaran que parte del proyecto se financió gracias al Programa Investigadoras e Investigadores COMECYT CAT2025-0128.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) y a la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN por los apoyos otorgados.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

16

REFERENCIAS

- [1] Consejo Nacional de Población (CONAPO), *Indicadores demográficos de la República Mexicana*, 2025, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://conapo.segob.gob.mx/work/models/CONAPO/pry23/PP/index.html>
- [2] A. V. Mendoza Ponce, R. O. Corona Núñez, L. Galicia Sarmiento, V. M. García Guerrero, “Proyecciones poblacionales y económicas bajo diferentes escenarios para México,” *Papeles Poblac.*, vol. 25, n.o 99, pp. 9-43, 2019, doi: <https://doi.org/10.22185/24487147.2019.99.02>
- [3] L. Roy, K. Kincaid, R. Mahmud, D. W. MacPhee, “Double-Multiple Streamtube Analysis of a Flexible Vertical Axis Wind Turbine,” *Fluids*, vol. 6, n.o 3, p. 118, mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids6030118>
- [4] I. Paraschivoiu, “Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines,” *J. Propuls. Power*, vol. 4, n.o 4, pp. 370-377, 1988.
- [5] D. De Tavernier, C. Ferreira, A. Goude, “Vertical-Axis Wind Turbine Aerodynamics”, en *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*, B. Stoevesandt, G. Schepers, P. Fuglsang, y S. Yeping, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1-45. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05455-7_64-2
- [6] D. Marten, G. Pechlivanoglou, C. Navid Nayeri, C. Oliver Paschereit, “Nonlinear Lifting Line Theory Applied to Vertical Axis Wind Turbines: Development of a Practical Design Tool,” *J. Fluids Eng.*, vol. 140, n.o 2, p. 021107, feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4037978>
- [7] T. Sant, *Improving BEM-based aerodynamic models in wind turbine design codes*. Delft: DUWIND Delft University Wind Energy Research Institute, 2007.
- [8] M. H. Hansen, M. Gaunaa, H. Aagaard Madsen, *A Beddoes-Leishman type dynamic stall model in state-space and indicial formulations*, Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1354, 2004. Disponible en: <https://findit.dtu.dk/en/catalog/537f0cea7401dbcc12006a16>

- [9] QBlade Documentation, “OYE model”, QBlade, 2026. [En línea]. Disponible en: https://docs.qblade.org/src/theory/aerodynamics/dynamic_stall/OYE_stall.html#id1
- [10] G. Bangga, S. Parkinson, W. Collier, “Development and Validation of the IAG Dynamic Stall Model in State-Space Representation for Wind Turbine Airfoils,” *Energies*, vol. 16, n.o 10, p. 3994, may 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16103994>
- [11] G. Bangga, T. Lutz, y M. Arnold, “An improved second-order dynamic stall model for wind turbine airfoils,” *Wind Energy Sci.*, vol. 5, n.o 3, pp. 1037-1058, ago. 2020, doi: <https://doi.org/10.5194/wes-5-1037-2020>
- [12] L. Battisti et al., “Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures,” *Renew. Energy*, vol. 125, pp. 425-444, sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.098>
- [13] S. Shubham, K. Naik, S. Sachar, A. Ianakiev, “Performance analysis of low Reynolds number vertical axis wind turbines using low-fidelity and mid-fidelity methods and wind conditions in the city of Nottingham,” *Energy*, vol. 279, p. 127904, sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127904>
- [14] O. Eboibi, L. A. M. Danao, R. J. Howell, “Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers,” *Renew. Energy*, vol. 92, pp. 474-483, jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.028>
- [15] B. Montgomerie, *Methods for root effects, tip effects and extending the angle of attack range to $\pm 180^\circ$ for a blade element momentum calculation code*, Swedish Defence Research Agency (FOI), Division of Aeronautics, FFA, Stockholm, Sweden, Technical Report FOI-R-1305-SE, jun. 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.vindenergi.org/AEROBIG/FOI-R--1305--SE.pdf>

Detection of Microcracks in Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Endoprostheses Using Wavelet Analysis

Detección de microfisuras en endoprótesis de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) mediante análisis wavelet

Israel Pérez Martínez ¹

Cesar Murillo Martínez ²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de ingeniería, División de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Electrónica, Ciudad de México, MÉXICO

ORCID: 0009-0003-3791-9117 / israelperez@gmail.com

² Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado,
Hospital Regional Primero de Octubre,
Servicio de Ortopedia y Traumatología, Ciudad de México, MÉXICO

ORCID: 0009-0007-0891-9280 / cesarmurillomtz1607@gmail.com

<https://cientifica.site>

Recibido 15/01/2026, aceptado 10/04/2026, publicado 20/04/2026.



Abstract

Recently, there has been an increased interest in developing new techniques for damage inspection in materials, especially those used to create ultra-high-molecular-weight polyethylene prosthesis. Damage inspection techniques, such as Field Microscopy, Optical Microscopy, Immersion Ultrasonic Testing, and Micro-Computed Tomography (Micro-CT), are among the most widely used to detect internal microscopic damage. However, although the Micro-CT is one of the best, its high cost allows us to propose a new inspection method. This research presents a new vision for microcrack detection using the Wavelet transform as a signal-processing technique, providing a theoretical and experimental framework. The result shows the use of ultrasonic equipment for its detection, supported by the pulse-echo technique, in UHMWPE endoprosthesis tests.

Index terms: microcracks, endoprosthesis, wavelet transform, pulse-echo technique.

2

Resumen

Recientemente, ha habido un creciente interés en el desarrollo de nuevas técnicas para la inspección de daños en materiales, especialmente aquellos utilizados para la fabricación de prótesis de polietileno de ultra alto peso molecular. Las técnicas de inspección de daños, tales como la microscopía de campo, la microscopía óptica, los ensayos por ultrasonido por inmersión y la microtomografía computarizada (Micro-CT), se encuentran entre las más utilizadas para detectar daños microscópicos internos. Sin embargo, aunque la Micro-CT es una de las mejores, su elevado costo nos permite proponer un nuevo método de inspección. Esta investigación presenta una nueva perspectiva para la detección de microfisuras utilizando la transformada wavelet como técnica de procesamiento de señales, proporcionando un marco teórico y experimental. El resultado muestra el uso de equipos de ultrasonido para su detección, respaldado por la técnica de pulso-eco, en ensayos de endoprótesis de UHMWPE.

Palabras clave: microfisuras, endoprótesis, transformada de wavelet, técnica de pulso-eco.

I. INTRODUCTION

Several methods have been reported for detecting microcracks in UHMWPE inserts, including microscopy, Optical Microscopy, and Ultrasonic Immersion Testing [1]. However, none yields results as accurate as those obtained with Microcomputed Tomography (Micro-CT) [2]. The main factors related to the appearance of cracks, microcracks, and other fractures have been studied from different perspectives, including their formation, detection, autonomous repair, and non-destructive testing (NDT) [3], [4], [5]. This research aims to provide a new vision in the detection of microcracks through the use of the Wavelet transform [6], [7], [8], [9], [10], [11], with the help of adaptive noise cancellation [12], [13], [14], [15], [16], [17] and cross-correlation techniques applied [18], [19], [20] to the ultrasonic technique known as pulse-echo [21], [22], [23], as well as the use of ultrasonic equipment based on the pulse-echo technique [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34]. This work is organized as follows: Materials and methods describe the equipment used for the pulse-echo technique and the use of the signal processing system in Matlab® via the Wavelet transform. The results exhibit experiments on tube tests and endoprosthesis elements. The discussion and conclusions present the limitations of the present method and its contribution to the current investigation.

II. MATERIALS AND METHODS

In polymer composite materials, the pulse-cracking technique is one of the main methods used to detect fatigue-induced damage induced by cyclic bending loading [1]. This research aims to detect microcracks using the Wavelet transform as a theoretical-experimental approximation technique. For experimental equipment, an ultrasonic pulse transmitter for double-crystal piezoelectric transducers was used. The block diagram is shown in Fig. 1. The transmitter is a device that generates a high negative-voltage pulse, which excites one of the crystals of the 5 MHz/2 MHz ultrasonic transducer. One of the crystals functions as a transmitter, and the other as a receiver. One advantage of this type of ultrasonic transducer is that crystals are independent. The duration of the high-voltage negative pulse should be as short as possible to achieve higher sensitivity and resolution. By decreasing the wavelength, it has better sensitivity to locate small discontinuities in the measurement, and it can also detect very close microcracks.

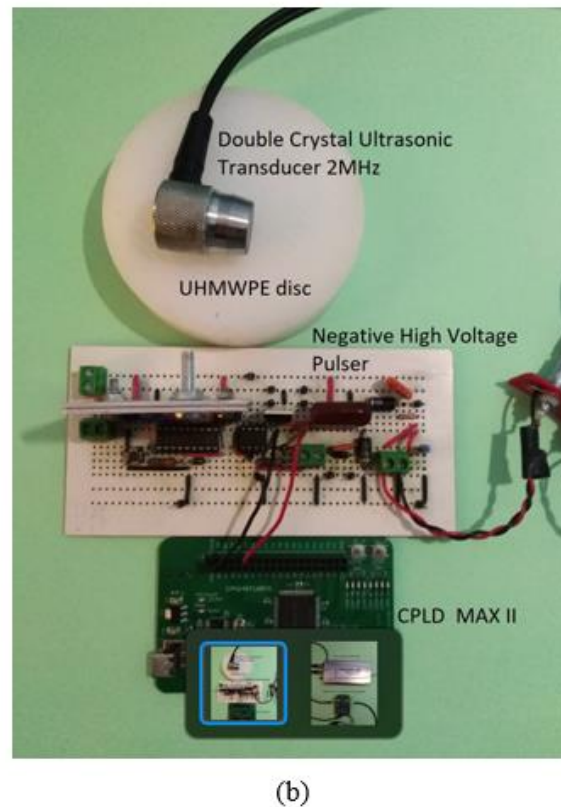
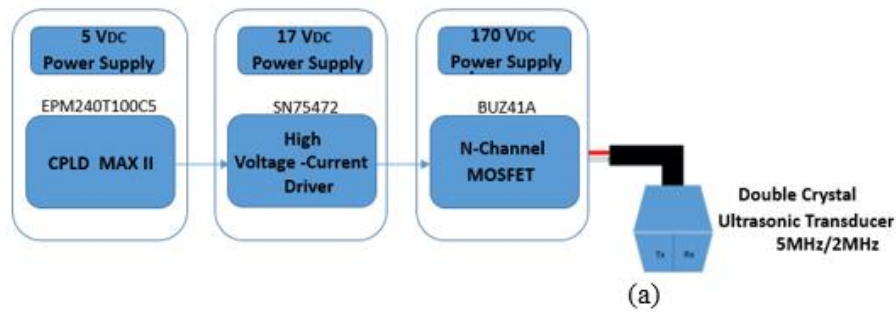
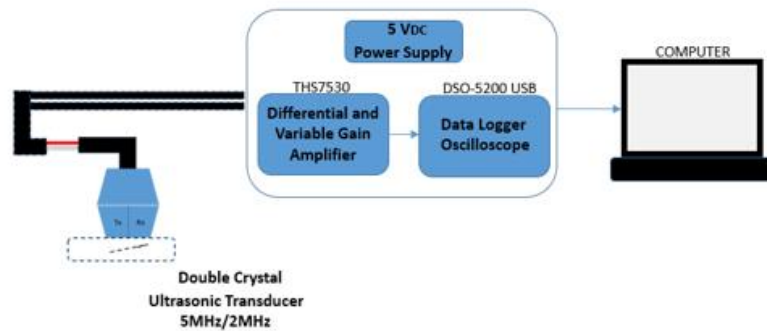


Fig. 1. Block diagram: (a) Ultrasonic pulse transmitter; (b) Ultrasonic transmitter equipment.

The receiver equipment acquired the signal via the receiving piezoelectric transducer, which was further processed by a differential, variable-gain amplifier with signal adequacy. The signal adequacy is recorded via a data logger oscilloscope and processed in the computer using the signal processing system (Fig. 2).

The methodology applied in this work is based on experimental tests conducted on various materials. The specimens used for this investigation consisted of a flat bar aluminum, a UHMWPE disc, and two endoprotheses. The flat bar aluminum is 9.56mm thick, with three central perforations of 1mm in diameter at different depths from the surface: 2mm, 4mm, and 6mm. It was considered that the measurements of the three induced perforations at different depths could represent the defects that you want to detect by using the Wavelet transform. Measurements were carried out using the 5Mhz transducer.



(a)



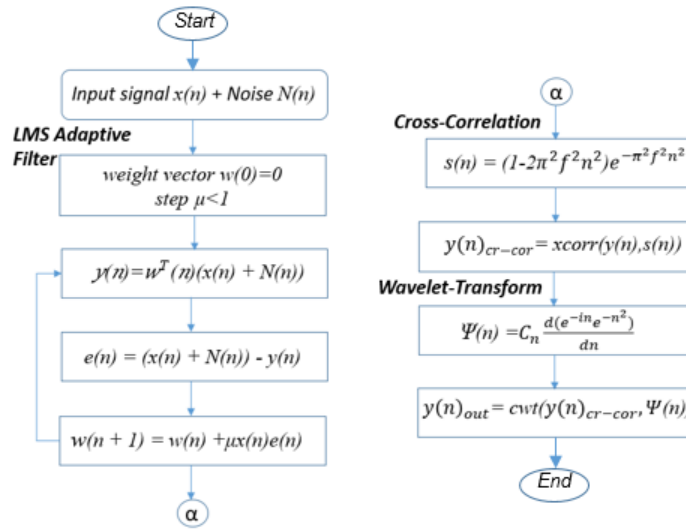
(b)

Fig. 2. (a) Receiver equipment with signal adequacy; (b) Ultrasonic receiver equipment.

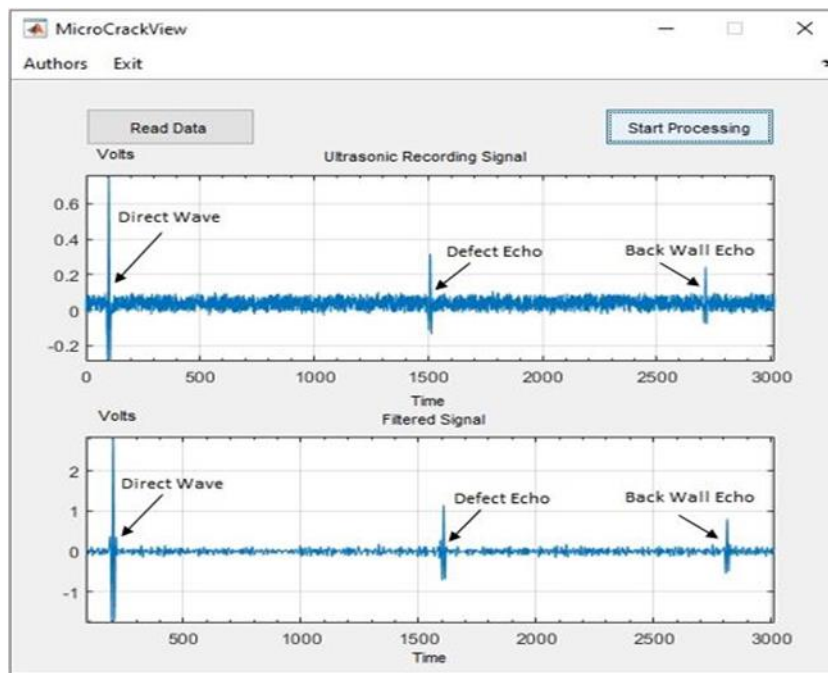
To verify this methodology and measure accurately on the UHMWPE disc, a 2 MHz transducer was used, given that UHMWPE is a material that is more difficult to penetrate. The UHMWPE disc is 25.5 mm thick, with three central perforations of 1mm in diameter at different depths from the surface: 3mm, 8 mm, and 13 mm.

Previous measurements served as a basis for using it in an endoprosthesis. The last measurements were made on two total knee joint UHMWPE prostheses. A 2MHz transducer was used. The first total knee joint was new, and the second was removed from a patient. In none of them were perforations induced. It was measured directly, hoping to detect possible defects.

The signal processing system is carried out using the MicroCrack View program, developed in MATLAB®, through adaptive filtering, cross-correlation, and the Wavelet transform [35], (Fig. 3).



(a)



(b)

Fig. 3. Processing System: (a) Program flowchart; (b) Graphical Interface.

The Wavelet Transform is used to obtain a profile of the filtered output signal and to visualize the signal in time-frequency simultaneously.

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt = \langle f(t), \psi_{\tau, s}(t) \rangle \quad (1)$$

$\psi(t)$ is a variable-size window function that helps to analyze the signal of interest at different frequencies with different resolutions. The window size is large for low-frequency components and small for high-frequency components.

$$\psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad \tau, s \in \mathbb{R}; \quad s > 0 \quad (2)$$

The wavelet transform helps to measure the degree of similarity between the signal of interest and a series of scaled (s) and translated (τ) functions of the mother wavelet. The translation " τ " is related to the window's location since the window moves through the signal. This term corresponds to the information in the time domain of the transformation. The " s " parameter is a scale defined as the inverse frequency, which helps us to compress or expand the Wavelet. Wavelet compression compresses small time intervals in high-frequency regions of the analyzed signal, whereas expansion compresses long time intervals in low-frequency regions. The graphical representation obtained with the Wavelet Transform is shown in Fig.4.

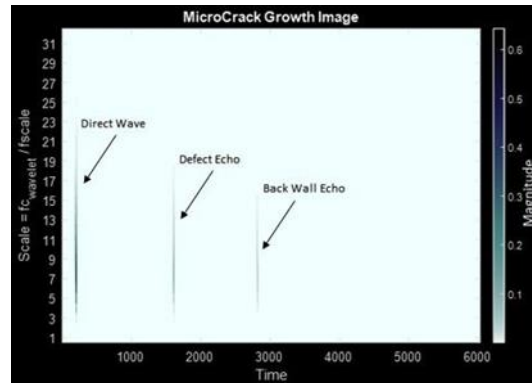


Fig. 4. Graphic representation of the Time-Frequency Wavelet Transform.

III. RESULTS

The specimens used for this investigation consisted of a flat bar of aluminum, a UHMWPE disc, and two endoprostheses. It was proposed to conduct tests on a 9.56 mm-thick flat-bar aluminum, with three central perforations of 1mm in diameter at different depths from the surface: A-2 mm, B-4 mm, and C-6 mm, Fig. 5.

Measurements were carried out on the flat bar aluminum at three perforations at different depths, obtaining the following results (Fig. 6). The flaw echo indicates the depth of the borehole from the surface (direct wave) to the bottom (bottom echo).

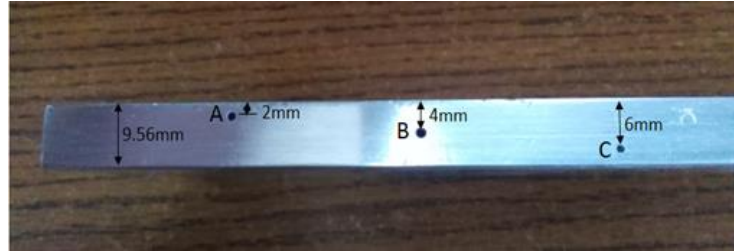


Fig. 5. Thick flat-bar aluminum with three central perforations of 1 mm in diameter at different depths from the surface: A-2mm, B-4mm, and C-6mm.

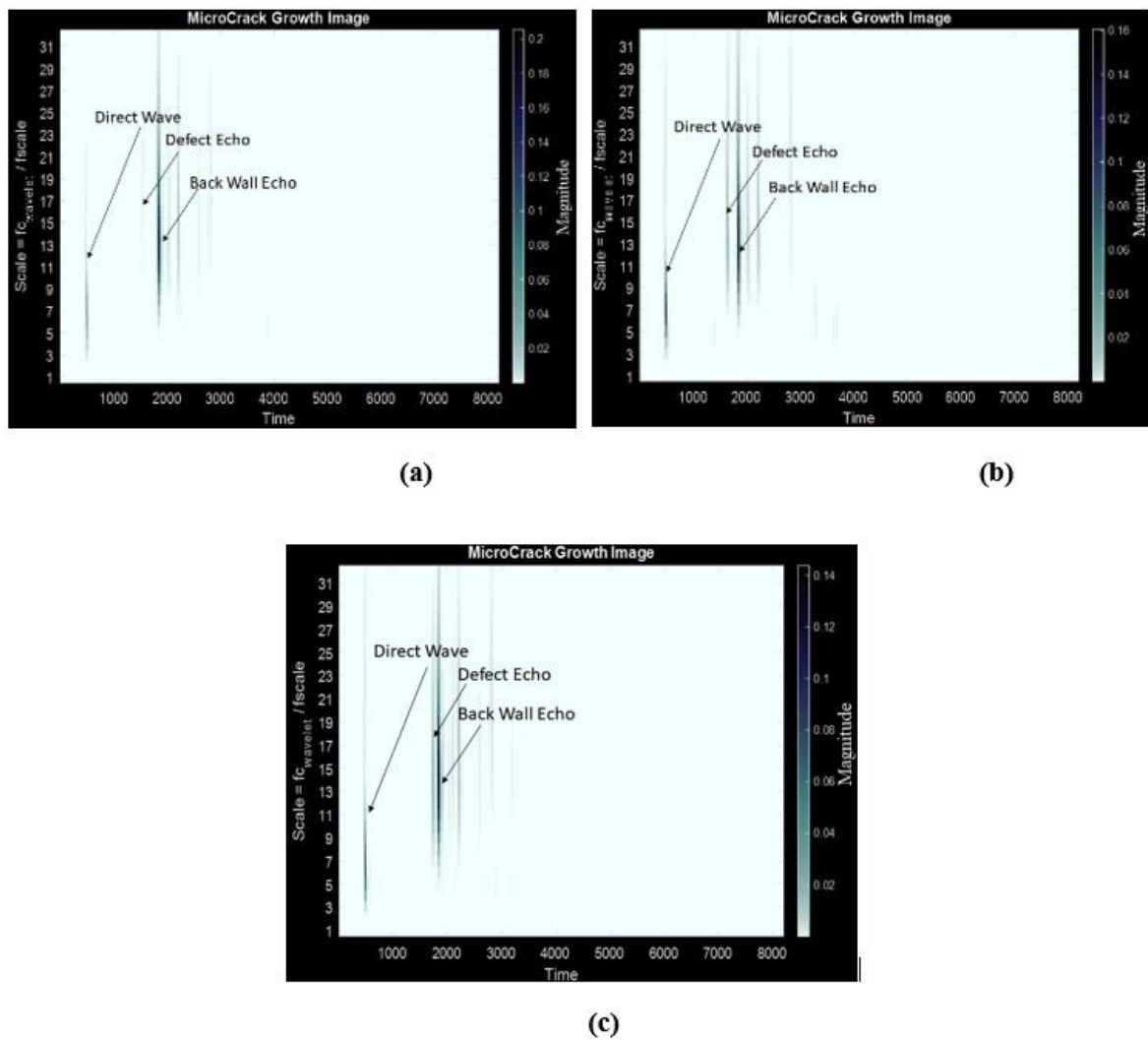


Fig. 6. Perforations detection using the Wavelet Transform: (a) Depth of 2mm; (b) Depth of 4mm; (c) Depth of 6 mm.

For experimental testing of UHMWPE, a 2 MHz transducer is recommended for thick, highly attenuating materials or those with significant dispersion. Therefore, the experimental tests were carried out on a UHMWPE disc with a thickness of 25.5 mm, with three spaced perforations of 1mm in diameter at different depths from the surface: A-3 mm, B-8 mm, and C-13 mm, obtaining the following results (Fig. 7).

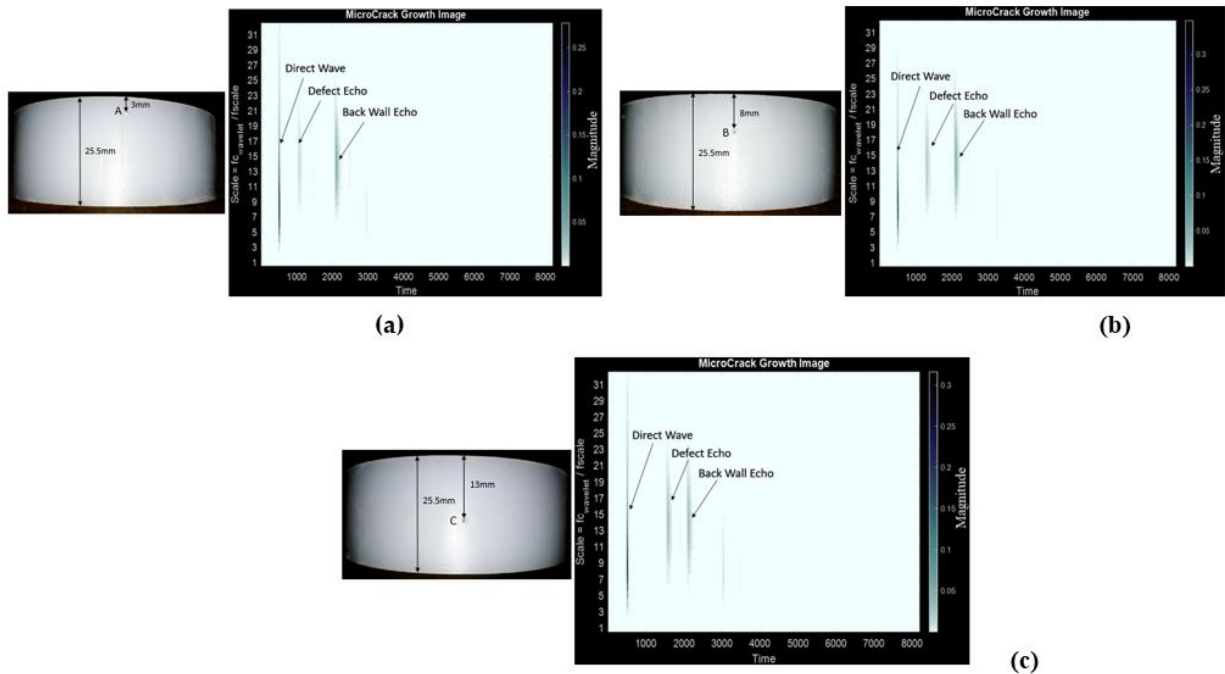


Fig. 7. Perforations detection using the Wavelet Transform: (a) Depth of 3 mm; (b) Depth of 8 mm; (c) Depth of 13 mm.

Measurements were made on two total knee joint UHMWPE prostheses. In the first endoprosthesis (Fig. 8a), no internal defect is detected between the direct wave and the back wall echo. However, in the second endoprosthesis (Fig. 8b), extracted from a patient, apparent pitting was observed on the material's surface, and, as with the first, no internal defect was detected.

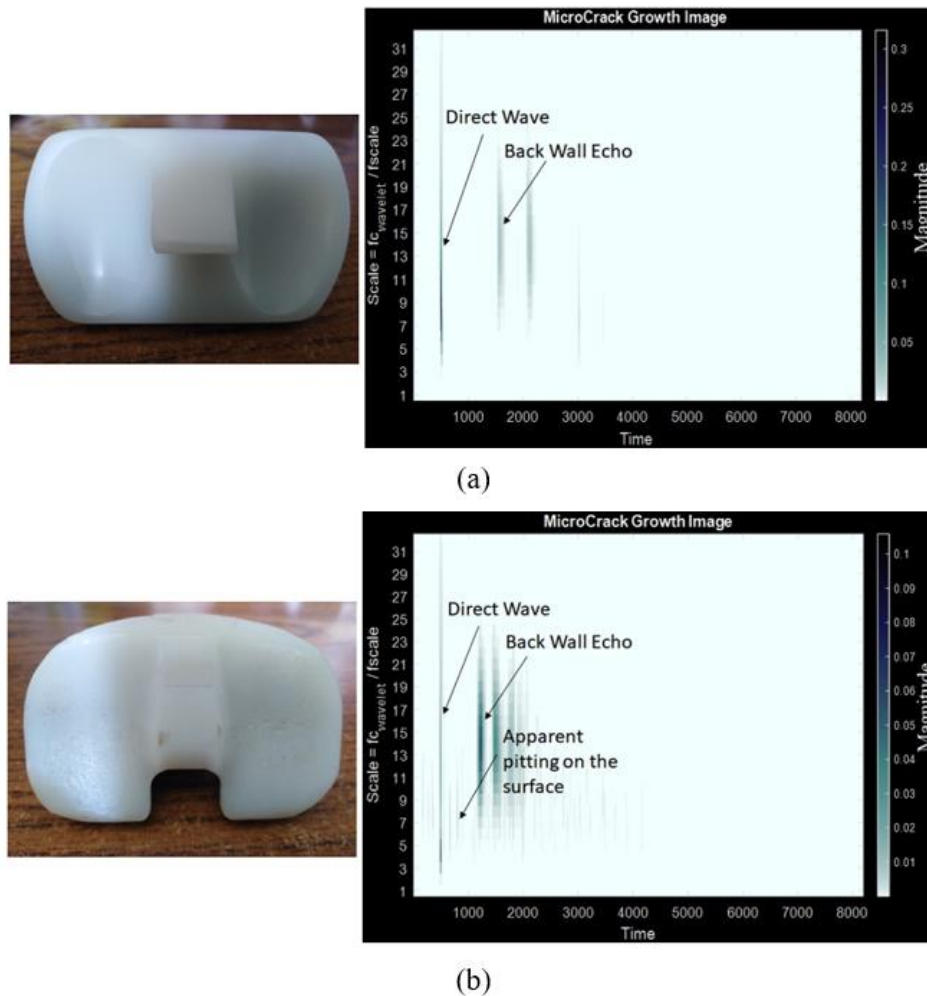


Fig. 8. (a) New endoprosthesis detection using the Wavelet Transform; (b) Endoprosthesis extracted detection from a patient using the Wavelet Transform.

IV. DISCUSSION

The ultrasonic measurement system scheme and the signal processing technique are proposed to obtain a representative image of possible acoustic impedance contrasts in UHMWPE. The best option is X-ray computed microtomography, a non-invasive method for visualizing fatigue-induced wear. This technique obtains thin slices by scanning to build a 3D image. This mapping provides information about microcracks in the subsurface. However, this effective technique has a high economic cost. In [10], an improvement to the Wavelet transform is presented for the echo impact method of non-destructive testing to measure thicknesses and their flight times using a single-crystal piezoelectric transducer to obtain the velocity and the longitudinal cross-section. These measurements obtain the material's elastic constants, its characterization, and the location of defects. However, electronics are more complex in this type of design. The equipment used is based on the pulse-echo method. A double crystal transducer was used. In this way, there is a card

for the transmitter (pulser) and another for the receiver. The ultrasonic measurement system has certain limitations regarding the quality of image detail tomography since only two piezoelectric crystals are used compared to Phased Array Ultrasonic Technology for sectorial scanning [5], which has a comb of piezoelectric transducers but successfully demonstrates the possible detection of microcrack emergence by using the Wavelet transform at a low cost.

V. CONCLUSIONS

This research provides an excellent opportunity to contribute to knowledge by applying signal processing techniques to the pulse-echo ultrasonic method, combining adaptive noise cancellation, cross-correlation, and Wavelet Transform techniques as a new methodology to non-invasively and inexpensively visualize the emergence of microcracks in UHMWPE endoprosthesis. In this research, the use of ultrasonic measurement equipment based on the pulse-echo technique, one of the most widely proven ultrasonic techniques, was proposed. The results of this research make an essential contribution to the detection of microcracks in UHMWPE using the wavelet transform, yielding a representative image in time and frequency. The image obtained from the experimental measurements allows visualization of the acoustic impedance contrasts and the depth at which the microcracks appear. The image result depends mainly on the selected mother wavelet. The echo amplitudes depend on the signal's intensity from the medium's acoustic impedance contrasts.

11

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization, **IPM** and **CMM**; software **IPM** and **CMM**; validation, **IPM** and **CMM**; formal analysis, **IPM** and **CMM**; investigation, **IPM** and **CMM**; resources, **IPM** and **CMM**; data curation, **CMM**; writing-original draft preparation, **IPM** and **CMM**; writing-review and editing, **IPM** and **CMM**; visualization, **IPM** and **CMM**; supervision, **IPM** and **CMM**; project administration **IPM** and **CMM**; funding acquisition **IPM** and **CMM**.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgments: The authors are thankful to the Instituto Politécnico Nacional and Dr. Luis Antonio Aguilar Pérez for their support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Lockard, A. P. Sanders, B. Raeymaekers, "An experimental approach to determining fatigue crack size in polyethylene tibial inserts," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, no. 54, pp.106-114, 2016.
- [2] M. G. Teeter, X. Yuan, D. R. Naudie, D. W. Holdsworth, "Technique to Quantify Subsurface Cracks in Retrieved Polyethylene Components Using Micro-CT," *Journal of Long Term Eff. Of Medical Implants*, no. 20, p. 27-34, 2010.
- [3] F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno, "Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair," *Progress in Materials Science*, no. 83, pp. 536-573, 2016.
- [4] S. K. Dwivedia, M. Vishwakarmab, A. Sonic, "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 3690-3698, 2017.
- [5] Olympus NDT, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*. Advanced Practical NDT Series, 3rd ed., Canada, 2007.

- [6] Labat, D. (2005) Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts . Journal of Hydrology 314: 275-288.
- [7] X. Fan, M. J. Zuo, X. Wang, "Application of Stationary Wavelet Transforms to Ultrasonic Crack Detection," 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Ottawa, ON, Canada, 2006, pp. 1432-1436, doi: 10.1109/CCECE.2006.277532
- [8] P. L. Yeh, P. L. Liu, "Application of the Wavelet transform and the enhanced Fourier spectrum in the impact echo test," *NDT&E International*, vol. 41, no. 4, pp. 382-394, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.01.002>
- [9] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, *Wavelet Toolbox™ User's Guide*, The Math Works, Inc, 2009.
- [10] T. Bouden, M. Nibouche, F. Djerfi, S. Dib, "Improving Wavelet Transform for the Impact-Echo Method of Non Destructive Testing," Y. Zhang (Ed.): *Future Communication, Computing, Control and Management*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 241-247, 2012.
- [11] M. E. Medhat, A. Abdel-Hafiez, Z. Awaad, M. Fayez-Hassan, M. A. Ali. "A Review on Applications of the Wavelet Transform Technique in Spectral Analysis," 4th Conference on Nuclear and Particle Physics, 11-15 Oct. 2003, Fayoum, Egypt, 2003.
- [12] B. Widrow et al., "Adaptive noise cancelling: Principles and applications," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1692-1716, Dec. 1975, doi: <https://doi.org/10.1109/PROC.1975.10036>
- [13] S. Haykin, B. Widrow, *Least-Mean-Square Adaptive Filters*, John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Y. He, H. He, L. Li, Y. Wu, H. Pan, "The Applications and Simulation of Adaptive Filter in Noise Canceling," *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, Wuhan, China, 2008, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/CSSE.2008.370>
- [15] A. Singh, "Adaptive Noise Cancellation Using LMS Algorithm in MATLAB," *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 5, no. 6, pp. 2320-6586, 2017.
- [16] V. Ramakrishna, T. A. Kumar, "Low Power VLSI Implementation of Adaptive Noise Canceller Based on Least Mean Square Algorithm," 2013 4th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Bangkok, Thailand, 2013, pp. 276-279, doi: <https://doi.org/10.1109/ISMS.2013.84>
- [17] A. Deb, A. Kar, M. Chandra, "A technical review on adaptive algorithms for acoustic echo cancellation," in *Int. Conf. Commun. Signal Process*, India, 2014, pp. 41-45.
- [18] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1996.
- [19] P. Kearey, M. Brooks, I. Hill, *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Blackwell Sci., 2002.
- [20] B. Si-zhong, Z. Jia-yi, W. Xuan, L. Tao, "A method to solve the periodic deviation in cross-correlation measurement of ultrasonic echo signals," in *Proc. 2nd Int. Conf. Frontiers Sens. Technol.*, 2017, pp. 358-362.
- [21] M. Huang, L. Jiang, P. K. Liaw, C. R. Brooks, R. Seeley, D. L. Klarstrom, "Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research," *JOM*, vol. 50, no. 1, pp. 1-4, 1998.
- [22] A. P. Mouritz, C. Townsend, M. Z. Shah Khan, "Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, pp. 23-32, 2000.
- [23] M. Darmon, A. Ferrand, V. Dorval, S. Chatillon, S. Lonné, "Recent modeling advances for ultrasonic TOFD inspections," in *AIP Conf. Proc. Rev. Prog. Quant. NDE*, 2015, pp. 1757-1765.
- [24] E. Gómez, *Ultrasound Level II: Non-Destructive Testing*, Madrid, Spain: Confemetal Found., 2009.
- [25] Olympus NDT, *Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications*, NDT Field Guide Series, 2010.
- [26] D. H. Evans, W. N. McDicken, *Doppler Ultrasound: Physics, Instrumentation and Signal Processing*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2000.

- [27] E. Brunner, *Ultrasound system considerations and their impact on front-end components*, Analog Devices, Inc., 2002.
- [28] Olympus NDT, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Advanced Practical NDT Ser., 2007.
- [29] P. Ion, D. A. Stoichescu, “Pulser for piezoelectric transducers used in non-destructive testing,” *Int. J. Electr. Electron. Data Commun.*, vol. 4, no. 2, 2016.
- [30] D Hidayat, et al., “MOSFET-based high voltage short pulse generator for ultrasonic transducer excitation,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1927, art. no. 030018, 2018, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5021211>
- [31] J. Rodríguez, J. Vitola, S. Sandoval, E. Forero, “Design and construction of a system for non-destructive examination of flaws and defects in metals using ultrasonic signals,” *Rev. EIA*, no. 12, pp. 9–21, 2009.
- [32] A. Chaziachmetovas, T. E. Gómez Álvarez-Arenas, L. Svilainis, “Comparison of direct and transformer drive high voltage ultrasonic pulser topologies,” in *Proc. 9th IEEE Int. Conf. Intell. Data Acquis. Adv. Comput. Syst. (IDAACS)*, Bucharest, 2017, pp. 1111–1116, doi: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095258>
- [33] H. Peng, J. Sabate, K. A. Wall, J. S. Glaser, “GaN-based high-frequency high-energy delivery transformer push-pull inverter for ultrasound pulsing application,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 8, pp. 6794–6806, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2754343>
- [34] K. Sharma, S. Singh, P. K. Dubey, “Design of low-cost broadband ultrasonic pulser-receiver,” *MAPAN—J. Metrol. Soc. India*, vol. 32, no. 2, pp. 95–100, 2017.
- [35] I. Pérez-Martínez, et al., “Microcracks UHMWPE assessment using the wavelet transform,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1633, art. no. 012167, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1633/1/012167>

This article is featured in the Special Issue on TRIBOLOGY

Guest editors:

Ezequiel Alberto GALLARDO HERNÁNDEZ | Instituto Politecnico Nacional
Manuel VITE TORRES | Instituto Politecnico Nacional
Nelson Federico GARZA MONTES DE OCA | Universidad Autónoma de Nuevo León
César SEDANO DE LA ROSA | Universidad de Guadalajara

Erosive wear of AISI S1 and AISI H13 steels caused by spherical and angular particles

Desgaste erosivo de los aceros AISI S1 y AISI H13 causado por partículas esféricas y angulares

Juan Rodrigo **Laguna Camacho**
Universidad Veracruzana | MÉXICO

Aldo Santos **Calderon Lored**
Instituto Politécnico Nacional | MÉXICO

Víctor **Velázquez Martínez**
Universidad Veracruzana | MÉXICO

Javier **Calderón Sánchez**
Universidad Veracruzana | MÉXICO

Héctor Daniel **López Calderón**
Universidad Veracruzana | MÉXICO

<https://cientifica.site>

Recibido 15/04/2026, aceptado 25/05/2026, publicado 30/05/2026.



Erosive wear of AISI S1 and AISI H13 steels caused by spherical and angular particles

Desgaste erosivo de los aceros AISI S1 y AISI H13 causado por partículas esféricas y angulares

Juan Rodrigo **Laguna Camacho** ^{1*}
Aldo Santos **Calderon Loredo** ²
Víctor **Velázquez Martínez** ³
Javier **Calderón Sánchez** ⁴
Héctor Daniel **López Calderón** ⁵

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Poza Rica de Hidalgo, MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0001-5989-3972 / jlaguna@uv.mx*

³ ORCID: 0000-0001-5343-8346 / vivelazquez@uv.mx

⁴ ORCID: 0000-0002-1382-1081 / jacalderon@uv.mx

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ciudad de México, MÉXICO

² ORCID: 0009-0006-4263-9496 / aldo2900@hotmail.com

Universidad Veracruzana, Facultad de Biología,
Xalapa, MÉXICO

⁵ ORCID: 0000-0001-6324-537X / hectolopez@uv.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 15/04/2026, aceptado 25/05/2026, publicado 30/05/2026.



Abstract

In this work, an analysis of erosive wear was carried out on hot-work tool steels, AISI S1 (non-deformable steel with high chromium content) and AISI H13 (steel with high chromium, molybdenum, and vanadium content) subjected to the impact of alumina spherical particles (Al_2O_3) and silicon carbide angular particles (SiC), to understand their behaviour and performance under different particle shapes. An erosion rig based on the ASTM G76-95 standard was used to perform the testing. Tests were carried out using different impact angles, 30° , 45° , 60° and 90° , with a particle velocity of 30 ± 2 m/s and a particle flux of 63 g/min. Characterization techniques such as hardness tests and optical microscopy was used to know the morphology of the abrasive particles and identify the wear mechanisms. The erosion rates showed that AISI S1 steel exhibited higher erosion resistance than AISI H13 steel after the consistent impingement of abrasive particles. In addition, SiC particles inflicted higher erosion damage on surfaces than Al_2O_3 grits.

Index terms: erosive wear, AISI S1 steel, AISI H13, particle shape, erosion rates.

2

Resumen

En este trabajo, se realizó un análisis del desgaste erosivo en aceros para herramientas de trabajo en caliente, AISI S1 (acero no deformable con alto contenido de cromo) y AISI H13 (acero con alto contenido de cromo, molibdeno y vanadio), sometidos al impacto de partículas esféricas de alúmina (Al_2O_3) y angulares de carburo de silicio (SiC), para comprender su comportamiento y rendimiento bajo diferentes formas de partículas. Se utilizó un equipo de pruebas de erosión basado en la norma ASTM G76-95 para realizar las pruebas. Estas se llevaron a cabo utilizando diferentes ángulos de impacto, 30° , 45° , 60° y 90° , con una velocidad de partícula de 30 ± 2 m/s y un flujo de partícula de 63 g/min. Se utilizaron técnicas de caracterización como pruebas de dureza y microscopía óptica para conocer la morfología de las partículas abrasivas e identificar los mecanismos de desgaste. Las tasas de erosión mostraron que el acero AISI S1 presentó mayor resistencia a la erosión que el acero AISI H13 tras el impacto constante de las partículas abrasivas. Además, las partículas de SiC causaron mayor daño por erosión en las superficies que las partículas de Al_2O_3 .

Palabras clave: desgaste erosivo, acero AISI S1, AISI H13, forma de las partículas, tasas de erosión.

I. INTRODUCTION

Erosive wear is one of the most damaging wear processes affecting mechanical components in industry; it accounts for approximately 70% of problems with mechanical components subjected to various damaging conditions. Essentially, it refers to the progressive loss of material due to the impact of abrasive particles or liquids on a surface. This type of wear commonly occurs in mold boxes and cores in die castings, pipes carrying liquids or gases, pipe fittings such as elbows, T-fittings, valves, chutes used in grain sorting machines (rice, corn, chickpeas, coffee), turbine blades, helicopter propellers, automotive paints or coatings, and other mechanical components. Due to this wear process occurs in different mechanical elements and materials, several erosion research studies have been conducted to determine the resistance of different types of steel alloys. For instance, Bingyuan Hong, et al. [1] conducted a study, in which the main objective was to experimentally investigate the erosion phenomenon of two very common materials used in pipelines for shale gas extraction, specifically AISI 304 stainless steel and L245 carbon steel, when impacted by solid particles entrained in gas. The author and his team discovered how factors such as gas velocity, impact angle, erosion time, and particle type affect wear. Additionally, analyses were performed using SEM to observe the metal surface after erosion and to understand the wear mechanisms. These experiments led to the discovery that the most critical impact angle for both materials was not the conventional 90°, but rather close to 30°, a condition in which particles behave like micro-blades, causing grooves and scratches on the surface. In contrast, at angles close to 90°, repeated impact favors the formation of cavities or craters. Furthermore, gas velocity was found to be an important parameter because it influences damage exponentially: the higher the velocity, the more severe the erosion. Regarding materials resistance, L245 carbon steel, being less hard, suffered significantly greater deterioration than 304 stainless steel. The explanation of the identified wear mechanisms was relevant because it explained why L245 carbon steel, having lower hardness, exhibited deeper grooves and larger craters compared to 304 stainless steel, thus supporting the differences observed in experimental erosion. In the context of foundry operations, where tool steels are constantly attacked by solid particles (silica sand particles), the phenomenon of erosive wear represents a significant threat for tools. Rodríguez, et al. [2] addressed this problem by investigating the erosive behaviour of two widely used steels: AISI H13 and AISI 4140. Their research demonstrates concisely that increasing material hardness through heat treatment is not entirely guaranteed to improve erosion resistance. In fact, for high impact angles (close to 90°), harder steels suffered significantly greater material loss due to the formation of adiabatic shear bands, which act as sites for crack initiation and propagation. In this work, three clearly distinct wear regimes were identified. At low angles (10° and 20°), erosion tends to decrease as hardness increases, with micro-cutting being the predominant mechanism. In this case, particles act as small cutting tools that remove material and generate finer grooves in harder steels. In the range of 30° to 40°, the erosion rate remains practically constant without a clear dependence on hardness. For angles above 60°, softer materials show better erosion resistance than harder ones. In the latter, normal impact (90°) promotes crater formation and, furthermore, the appearance of shear bands that give rise to subsurface cracks, which considerably increases material loss.

Due to the interesting works mentioned above, interest arises in carrying out erosive wear tests on materials that are commonly used in mechanical elements such as mold boxes and cores in die castings. In this work, two alloy steels were subjected to erosion tests to know their behaviour against this wear process. Total erosion rates were obtained for both materials using two different particle shapes. The results showed significant differences in erosion damage.

II. EXPERIMENTAL DETAILS

A. Test procedure

The materials used in the tests were AISI S1 and AISI H13 steels (as-received condition), which are used to protect surfaces subjected to high fatigue and wear. Both materials were supplied in the form of standard steel slabs (25mm

wide and 3mm thick) and then cut carefully with a hacksaw crosswise to achieve the following dimensions, 50 mm X 25 mm and 3 mm in thickness to fix in the sample holder of the erosion rig. Additionally, hardness tests were conducted using a Microhardness Tester LECO LM 700. Five hardness data were calculated for each tested material in accordance to ASTM E384-17 [3] and an average value was obtained. The hardness of AISI S1 and AISI H13 steels was 320 HV and 363 HV, respectively. The applied load to the Vicker's indenter (square-based diamond pyramid) was 1000 gf, whereas the dwell time was 15 sec. In respect to the selected erodents, spherical Al_2O_3 and angular SiC particles were employed to cause the erosion damage on the material surfaces. The morphology of both abrasives was obtained using a Radical 1200 model microscope and are shown in Fig. 1a-b.

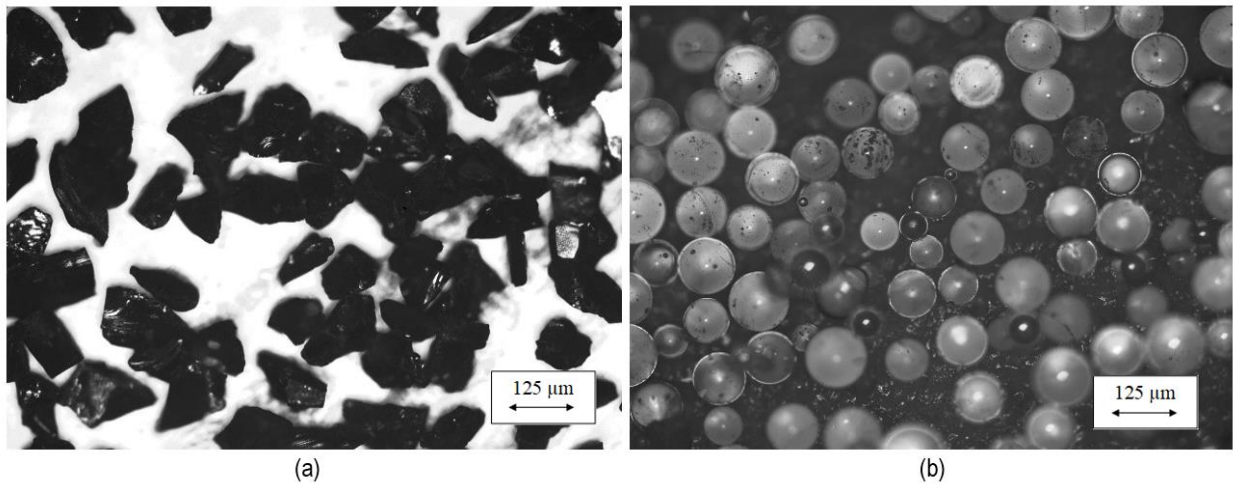


Fig. 1. Micrograph of abrasive particles, (a) Silicon carbide (SiC), (b) Alumina (Al_2O_3).

The erosion tests were performed using a sand blasting erosion equipment, based on ASTM G76-95 [4]. The materials were subjected to erosion impacts by 10 min, however each sample was removed every 2 min to determine the mass loss. The impact angles were 30°, 45°, 60° and 90°. In addition, a particle velocity of 30 ± 2 m/s and a particle flux of 63 g/min was used. In all tests, the samples were located 10 mm from the end of the stainless steel nozzle. The nozzle dimensions were 4.7 mm internal diameter, 6.3 mm external diameter and 260 mm length. The room temperature was between 35° C and 40° C. The specimens were weighed using an analytical balance (with an accuracy of ± 0.0001 g) before the start of each test (initial weight) and removed every 2 min, cleaned by using acetone and weighed again to measure the mass loss values. The micrographs of the eroded surfaces were analyzed using optical microscopy to identify the wear mechanisms of both steels at all incident angles.

III. RESULTS

A. Wear mechanisms analysis

The micrographs of the erosion damage caused by SiC angular particles on AISI S1, are shown in Fig. 2a-b. Here, it is possible to observe typical wear mechanisms such as micro-cutting actions, irregular indentations (scratches), a few pits (small holes) and micro-ploughing actions on the worn surfaces at 30°. It is assumed that at lower impact angles ($\alpha \leq 45^\circ$), the particles firstly impact the surfaces, causing a micro-cutting actions similar to that of a cutting tool, where material removal is significant [5], [6], [7], [8], [9]. Then, after this initial impact, some erosive particles slide

across the surface in various areas with such force that they cause wear similar to the ploughing action of the soil. In this particular case, the material is only removed or displaced due to the sliding of the particles. Irregular lines can also be caused by this action. In addition, more pits filled by wear debris, craters (large holes) and irregular indentations located in random areas, are seen on the damaged surfaces at 90°. These wear mechanisms are quite common at this incidence angle, because the abrasive particles act more directly on the surfaces.

On the other hand, the wear damage on AISI S1 inflicted by the impact of spherical alumina particles is shown in Fig. 2c-d. In this particular case, the material is more plastically deformed (displaced), and the pitting actions on the surface are consistent at 30°, whereas the erosion damage at 90° is characterized by craters seen on the surface of the AISI S1 steel and some pitting actions are identified as well. These wear mechanisms are very common when spherical particles impact the surfaces of different materials [10], [11], [12]. Due to the spherical shape of the particles, the wear intensity is lower compared to angular particles.

In relation to the wear damage on AISI H13 caused by SiC particles, the wear mechanisms were characterized by micro-cutting and micro-ploughing actions and scratches as observed in Fig. 3a-b. These mechanisms were also exhibited in other erosion studies using the same material [2]. On the other hand, the erosion damage originated by alumina impacts, is mainly characterized by large craters of different dimensions on the surfaces at 30° and a more uniform pitting action (small holes) are seen on the surfaces at 90°. In this specific case, the spherical particles actually left their shape printed on the surfaces of this material. Again, it is possible to see the differences in the mode of erosion damage caused by each of the particle shapes used in this work.

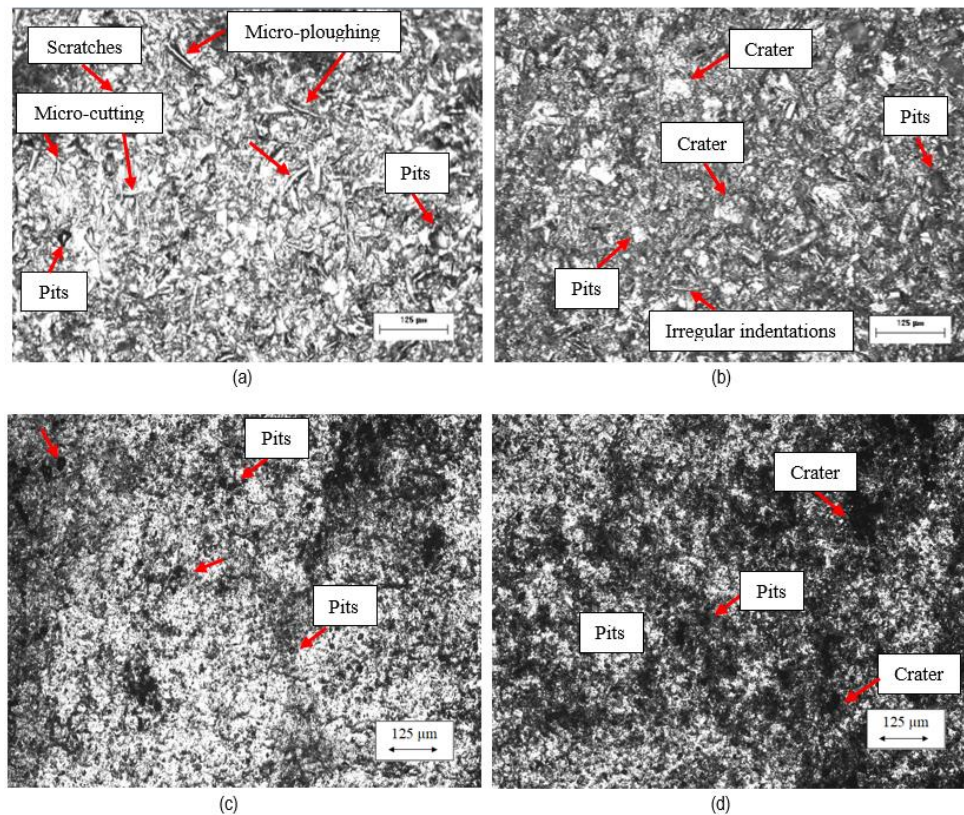


Fig. 2. Erosive wear on AISI S1 steel, (a) 30° SiC, (b) 90° SiC, (c) 30° Al₂O₃, (d) 90° Al₂O₃.

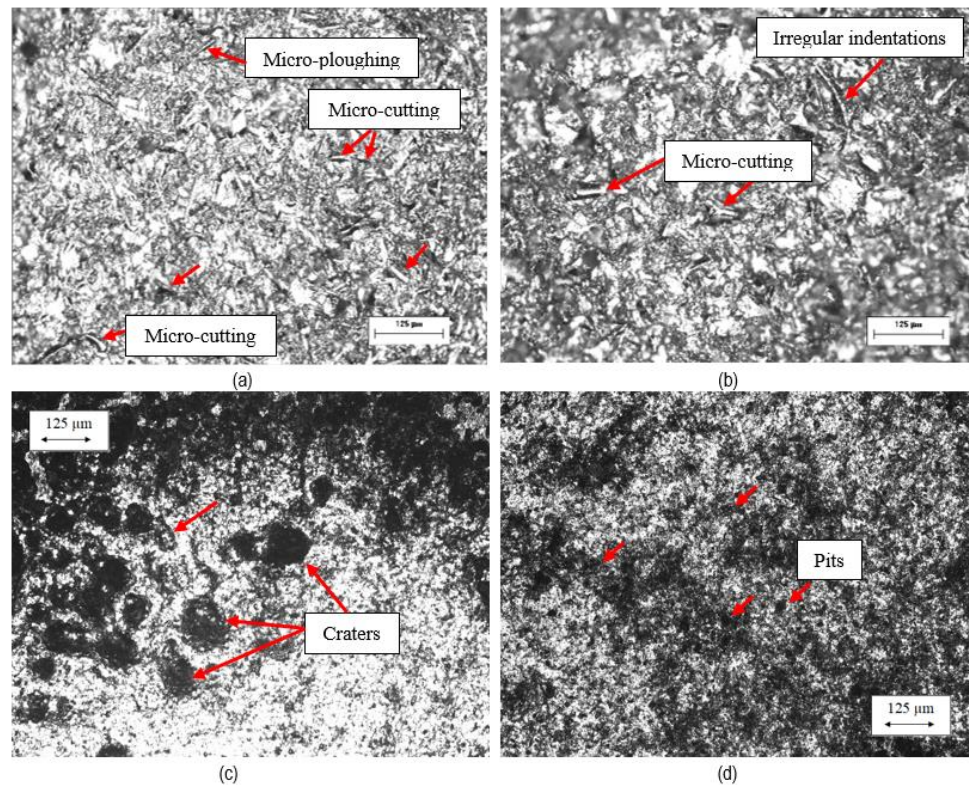


Fig. 3. Erosive wear on AISI H13 steel, (a) 30° SiC, (b) 90° SiC, (c) 30° Al₂O₃, (d) 90° Al₂O₃.

B. Wear mass loss and erosion rates

Fig. 4a-d shows the mass loss vs time graphs of the tested materials at all incident angles. The curves showed a tendency to increase the damage over time. This trend has been commonly seen in other erosion studies [13]. The graphs show that silicon carbide caused significantly greater mass loss in each of the test materials compared to the results obtained using alumina. This was mainly due to the angular shape of the particles, which led to the removal of greater amounts of material from the steels due to the more severe micro-cutting actions. In the specific case of damage caused by silicon carbide, the performance of both steels was very close, which is related to the similarity of the wear mechanisms observed in both materials. In respect to mass losses caused by alumina, the behaviour of the materials was not as similar, and it was clearly observed that AISI S1 steel showed higher erosion resistance than AISI H13 steel. In fact, in general terms, AISI S1 steel performed better against this wear process.

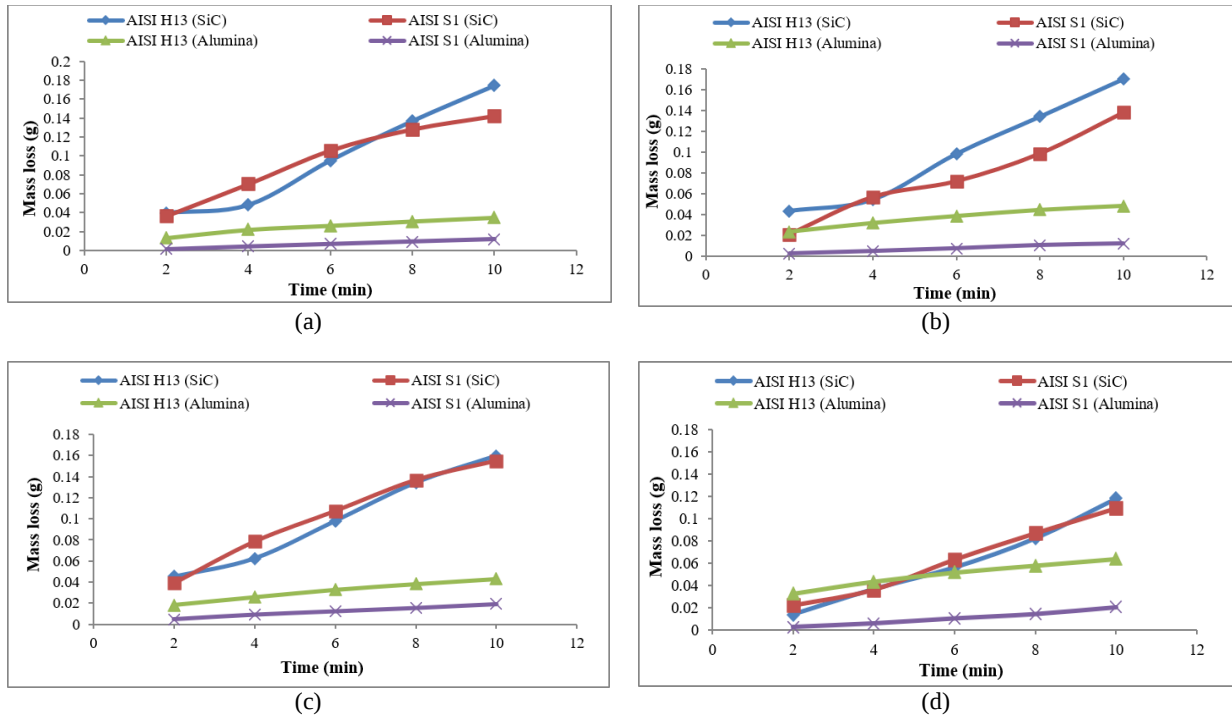


Fig. 4. Mass loss vs time graphs, (a) 30°, (b) 45°, (c) 60°, (d) 90°.

In respect to the erosion rates results, it is important to mention that the literature related to solid particle erosion indicates that materials exhibit ductile behaviour when they reach their maximum erosion rate at low impact angles ($\alpha \leq 45^\circ$), while they present brittle behaviour when erosion rates are greater at higher angles, close to normal incidence ($\alpha > 45^\circ$) [14]. Based on the literature, AISI H13 steel displayed ductile behaviour when impacted by silicon carbide at 30°, due to the constant and more intense micro-cutting actions of the angular particles. In contrast, when attacked with alumina particles, its behaviour was brittle, reaching its highest erosion rate at 90°. This could be because at 30°, the spherical particles regularly displace the material but do not detach it, while at 90°, these same particles can generate craters of considerable diameter, which can lead to higher erosion rates under normal conditions. On the other hand, AISI S1 steel exhibited similar brittle behaviour when impacted with both abrasive particles. The highest erosion rate was reached at 60° when impacted by silicon carbide, while the maximum erosion rate was observed at 90° as alumina was used for the erosion tests. In the case of silicon carbide, the combination of wear mechanisms such as micro-cutting, micro-ploughing, pitting, and craters may have been decisive in causing greater damage at this impact angle, while the alumina particles, based on the wear mechanisms observed, created a surface with a significant amount of pitting, which could have occasioned a high erosion rate at 90°.

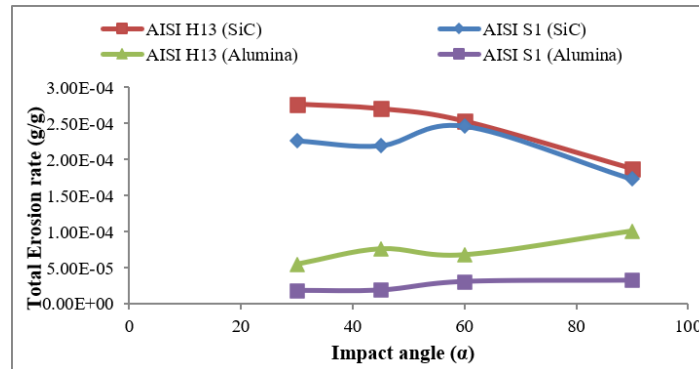


Fig. 5. Total erosion rates vs impact angles.

IV. CONCLUSIONS

The results presented in this research work lead to the following conclusions,

1. In respect to the performance of both materials, it is possible to determine that AISI S1 exhibited higher erosion resistance than AISI H13 at all incidence angles and in each particle shape.
2. Erosion rates were much higher when angular silicon carbide was used for erosion testing compared to those obtained using alumina.
3. Typical wear mechanisms of solid particle erosion were identified; micro-cutting and micro-ploughing actions were observed due to the contact of angular particles on the surfaces of both materials. Furthermore, the formation of craters and holes or pits on the surfaces was common when spherical particles impacted both steels.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: JRLC; Methodology: JRLC; Investigation: ASCL, VVM; Writing-original draft preparation: JCS, HDLC; Writing-review and editing: JCS, HDLC; Supervision: JRLC; Formal analysis: ASCL, VVM.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: We recognize the experimental support of the Mechanical Laboratory of the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Universidad Veracruzana in Poza Rica and the Tribology Group of the SEPI-ESIME del Instituto Politécnico Nacional.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCIAS

- [1] B. Hong, Y. Li, X. Li, G. Li, A. Huang, S. Ji, W. Li, J. Gong, J. Guo, "Experimental investigation of erosion rate for gas-solid two-phase flow in 304 stainless steel/L245 carbon steel," *Petroleum Science*, vol. 19, pp. 1347-1360, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.01.011>
- [2] E. Rodríguez, M. Flores, A. Pérez, R.D. Mercado-Solis, R. González, J. Rodríguez, S. Valtierra, "Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels," *Wear*, vol. 267, pp. 2109-2115, Aug. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.009>
- [3] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM E384, Am. Soc. for Testing and Materials, USA, 2017.
- [4] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*, ASTM G76, Am. Soc. for Testing and Materials, USA, 1995.
- [5] T. Deng, "Erosive Wear Mechanisms of Materials—A Review of Understanding and Progresses," *Materials*, vol. 18, pp. 1-28, April 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18071615>
- [6] A. K. Chauhan, D. B. Goel, S. Prakash, "Solid particle erosion behaviour of 13Cr–4Ni and 21Cr–4Ni–N steels," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 467, no. 1-2, pp. 459-464, Jan. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.12.053>
- [7] Md. A. Islam, T. Alam, Z. Farhat, "Construction of erosion mechanism maps for pipeline steels," *Tribology International*, vol. 102, pp. 161-173, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.033>
- [8] Md. A. Islam, T. Alam, Z. N. Farhat, A. Mohamed, A. Alfantazi, "Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel," *Wear*, vol. 332-333, pp. 1080-1089, May–June 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.004>
- [9] P. Singh, P. Kumar, R. L. Viridi, "Investigation of solid particle erosion behaviour of SS-304 under different conditions," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, no. 5 pp. 1147-1152, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.512>
- [10] Si-Qi Yang, Jian-Chun Fan, Ming-Tao Liu, De-Ning Li, Jun-Liang Li, Li-Hong Han, Jian-Jun Wang, Shang-Yu Yang, Si-Wei Dai, Lai-Bin Zhang, "Research on the solid particle erosion wear of pipe steel for hydraulic fracturing based on experiments and numerical simulations," *Petroleum Science*, vol. 21, pp. 2779-2792, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2024.03.019>
- [11] T. Deng, M.S. Bingley, M.S.A. Bradley, "The influence of particle rotation on the solid particle erosion rate of metals," *Wear*, vol. 256, no. 11-12, pp. 1037-1049, Jun. 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00536-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00536-2)
- [12] M. Hutchings, R. E. Winter, J. E. Field, "Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles," *Proceedings of the Royal Society of London. A.*, vol. 348, no. 1654, pp. 379-392, Mar. 1976, doi: <https://doi.org/10.1098/rspa.1976.0044>
- [13] Tkhabisimov, A. Mednikov, O. Zilova, "Studies of the Solid Particle Erosion Resistance of 30 L Steel with Different Types of Surface Modification," *Metals*, vol. 13, no. 12, pp. 1-17, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/met13121978>
- [14] M. Hutchings, P. Shipway, *Wear by hard particles. In Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 1st ed. London, UK: Edward Arnold, 1992.

This article is featured in the Special Issue on TRIBOLOGY

Guest editors:

Ezequiel Alberto GALLARDO HERNÁNDEZ | Instituto Politécnico Nacional
Manuel VITE TORRES | Instituto Politécnico Nacional
Nelson Federico GARZA MONTES DE OCA | Universidad Autónoma de Nuevo León
César SEDANO DE LA ROSA | Universidad de Guadalajara

Effect of high temperature on hardness and abrasive resistance of AISI 304
austenitic stainless steel

*Efecto de la alta temperatura en la dureza y la resistencia a la abrasión del acero inoxidable
austenítico AISI 304*

Josué O. **Arreola Vargas**

Universidad de Guadalajara | MÉXICO

María E. **Sedano Hernández**

Universidad de Guadalajara | MÉXICO

Sara I. **Topete Velasco**

Universidad de Guadalajara | MÉXICO

Francisco J. **Aranda García**

Universidad de Guadalajara | MÉXICO

César **Sedano de la Rosa**

Universidad de Guadalajara | MÉXICO

<https://cientifica.site>

Recibido 15/04/2026, aceptado 28/05/2026, publicado 05/06/2026.



Effect of high temperature on hardness and abrasive resistance of AISI 304 austenitic stainless steel

Efecto de la alta temperatura en la dureza y la resistencia a la abrasión del acero inoxidable austenítico AISI 304

Josué O. **Arreola Vargas**¹
María E. **Sedano Hernández**²
Sara I. **Topete Velasco**³
Francisco J. **Aranda García**⁴
César **Sedano de la Rosa**⁵

Universidad de Guadalajara,
Departamento de Ingenierías,
Centro Universitario de la Costa Sur,
Autlán de Navarro, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0004-3457-8756 / josuearreola1206@gmail.com

² ORCID: 0000-0003-1677-6658 / sedano.hdez@gmail.com

³ ORCID: 0009-0003-7346-6004 / sara.topete@academicos.udg.mx

⁴ ORCID: 0000-0002-3708-9761 / francisco.aranda@academicos.udg.mx

⁵ ORCID: 0000-0002-8684-8664 / cesar.sedano@academicos.udg.mx

Recibido 15/04/2026, aceptado 25/05/2026, publicado 05/06/2026.

<https://cientifica.site>



Abstract

Abrasive wear is a very common type of wear, and at the same time quite serious. It manifests itself when two surfaces in direct physical contact interact, and one is significantly harder than the other. In the present study, the abrasive wear resistance of AISI 304 austenitic stainless steel was evaluated using a dry abrasion test bench. The process of characterization of the wear scars was carried out using the scanning electron microscopy (SEM) and contact profilometry. In addition, hardness measurements were made to specimens before and after each test. The samples were made of austenitic stainless steel AISI 304. Abrasive silica sand particles (SiO_2) were sieved, and the particles retained in mesh 60 (250 to 297 μm) were used. The rated glide speed was 200 RPM and a slip distance of 4,309 m. The tests were performed at three different temperatures: 23 °C, 200 °C, and 400°C, and at 45 N. The loss of mass was monitored every 1,000 m of slippage and with the data obtained the wear rates and wear coefficients were calculated. Gravimetric results showed that the wear rate decreases with increasing temperature, slight increase in hardness was observed on the surface of the specimens as the temperature increases in the tests. Some wear mechanisms were identified at different temperatures such as plastic deformation, indentations, and plowing action mainly. Finally, higher wear rates were observed as the temperature increased, concluding that high temperatures promote an increase in the wear rate.

Index terms: dry abrasion, silica sand, austenite, stainless steel, high temperature.

2

Resumen

El desgaste abrasivo es un tipo de desgaste muy común y, a la vez, bastante grave. Se manifiesta cuando dos superficies en contacto físico directo interactúan, siendo una significativamente más dura que la otra. En el presente estudio, se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante un banco de ensayos de abrasión en seco. La caracterización de las huellas de desgaste se realizó mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y perfilometría de contacto. Además, se midió la dureza de las muestras antes y después de cada ensayo. Las muestras se fabricaron con acero inoxidable austenítico AISI 304. Las partículas de arena de sílice abrasiva (SiO_2) fueron tamizadas y se utilizaron las retenidas en la malla No. 60 (250 a 297 μm). La velocidad de deslizamiento nominal fue de 200 RPM y la distancia de deslizamiento de 4,309 m. Las pruebas se realizaron a tres temperaturas: 23°C, 200°C y 400°C, y a 45 N. La pérdida de masa se monitoreó cada 1,000 m de deslizamiento y, con los datos obtenidos, se calcularon las tasas y los coeficientes de desgaste. Los resultados gravimétricos mostraron que la tasa de desgaste disminuye con el incremento de la temperatura, se observó un ligero aumento en la dureza en la superficie de los especímenes conforme se incrementó la temperatura durante los ensayos. Además, se identificaron algunos mecanismos de desgaste a diferentes temperaturas, como deformación plástica, indentaciones y arado, principalmente. Finalmente, se observaron mayores tasas de desgaste a medida que aumentaba la temperatura, lo que permitió concluir que las altas temperaturas promueven un aumento de la tasa de desgaste.

Palabras clave: abrasión seca, arena de sílice, austenita, acero inoxidable, alta temperatura.

I. INTRODUCTION

The microstructure of steels is strongly affected by temperature due to their allotropic properties, and it is well established that steels begin to lose mechanical strength and elasticity appreciably between 315 and 370°C [1]. Abrasive wear, particularly under elevated temperatures, is a critical degradation mechanism in metallic materials, where parameters such as normal load and sliding velocity play decisive roles in determining wear rates and surface damage [2]. To evaluate these processes, standardized dry abrasion tests such as ASTM G65 are widely employed, using block-on-disk or sand/rubber wheel configurations [3]. These methods allow the study of sliding wear without lubrication, considering the inevitable formation of oxide layers and atmospheric contaminants on metallic surfaces. Previous investigations, have developed high-temperature abrasive wear benches capable of reaching 1000 °C. Their results demonstrated that the highest wear rates occurred at 900°C, confirming that elevated temperatures accelerate material loss [4]. Recent research has confirmed that temperature and load are decisive factors in the tribological behavior of stainless steels. Zhou et al. [5] observed that the wear of 304L intensifies between 25 and 400°C, with a shift in the mechanisms toward adhesive-oxidative processes. Similarly, Karabeyoğlu et al. [6] reported that the wear of 304L transitions from adhesive to abrasive as the temperature increases up to 200 °C. Finally, Ahmed and Mulapeer [7] compared the performance of austenitic and duplex steels, showing that 304 exhibits higher wear rates under high-temperature conditions, highlighting the need to evaluate its strength in critical applications. In this context, the present study aims to assess the abrasive wear behavior of AISI 304 stainless steel at room temperature, 200°C, and 400°C, employing a dry abrasion test bench to provide insights into the performance of widely used austenitic steels under severe operating conditions.

II. EXPERIMENTAL SETUP

A. Experimental test rig

The sample holder was fabricated from 7075 aluminum alloy, a lightweight material with high mechanical strength and a melting point of approximately 483°C. This alloy is widely used in injection molds, thermoforming applications, mechanical components, and aerospace structures [8]. To integrate the mechanical redesign of the sample holder into the tribometer and enable high-temperature testing, the following components were used: an XM TE96 temperature controller with a range of 50-450°C, powered by 220 V AC; a ManHua M1A4825A solid-state relay; a pair of 400 W, 220 V cartridge resistors; and a J2M temperature sensor (see Figure 1). Additionally, a 20 kg cantilever load cell was used to measure the load applied to the system.

A set of specifications was also formulated to differentiate the details of operation and those of design considering some parameters of the ASTM G-65 standard. The materials used in the re-design were selected considering the temperatures handled inside the test chamber. Subsequently, to complete the construction stage of the redesigned arm and the sample holder, it was necessary to make use of the equipment of the laboratories of Machines-Tools and Welding of CUCSUR. Once the load application arm has been modified and the machining of the sample holder completed, the samples were assembled into the equipment and then the components of the heating system were connected. To do this, two cartridge-type biphasic resistors were installed in the machined cavities inside the sample holder, connecting one phase with the solid-state relay and the other to the thermo-magnetic switch of the load center. In turn the solid-state relay was connected to the terminals of the temperature controller, a solid-state relay was also used instead of an electromechanical relay (contactor) because solid state relays do not have moving parts for their operation, and therefore they do not present a wear in the electrical components since their operation is based entirely on semiconductor electronics. Finally, a temperature sensor (thermocouple) was also connected to the controller to monitor the temperature of the sample.

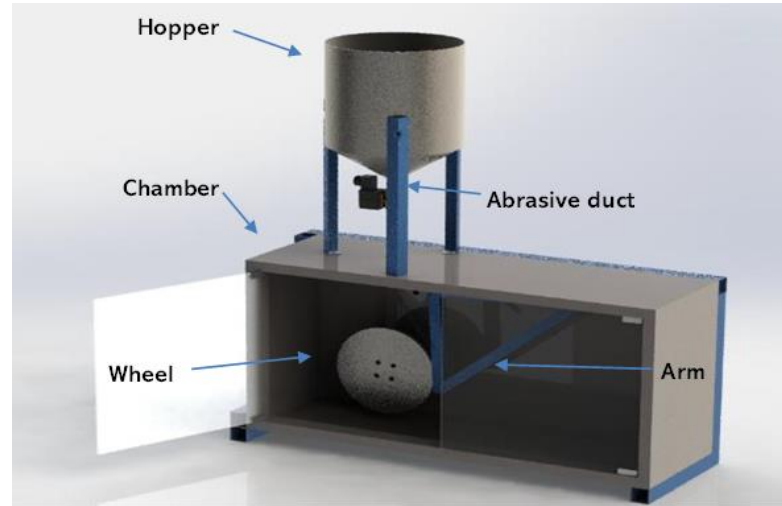


Fig. 1. Schematic diagram of abrasive test bench.

B. Materials and test process

4

The abrasive material used in the experiments was silica sand obtained from a local deposit in Casimiro Castillo, Jalisco. This sand is composed mainly of quartz (SiO_2), the second most common mineral in the earth's crust and is usually found in isolation or in symmetrical groupings of identical crystals (twinned) and in hexagonal crystals with trigonal pyramid termination, which can reach considerable sizes. It is a very resistant mineral, with hardness 7 on the Mohs scale, according to its color it is classified into a wide variety of subtypes, macrocrystalline (rock crystal, milky quartz, rose quartz, amethyst, citrine, smoky quartz) and cryptocrystalline (chalcedony) [9].

To carry out experiments a special particle size was used, and for this purpose a process of separation of particles was carried out by means of a sieving machine (Alcon brand). For this process, a sieve arrangement with meshes 30, 40, 50, 60 and 80 were used. The particles used in the tests were those that crossed mesh 50 and were retained in mesh 60, that is, they have a size ranging from 250 to 297 μm and have an irregular geometric shape, as shown in Figure 2.

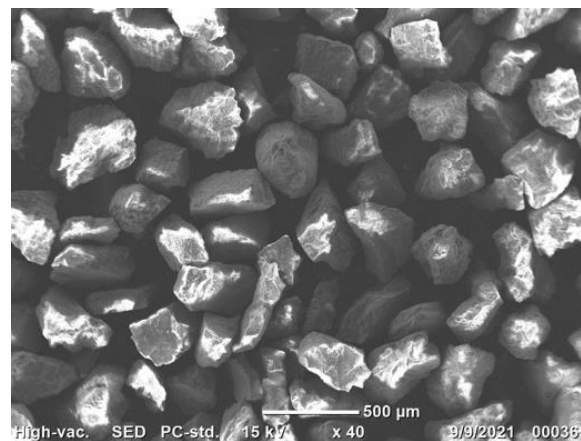


Fig. 2. Micrograph of abrasive particles.

AISI 304 austenitic stainless steel specimens were cutted out with dimensions of 20 × 60 mm and a thickness of 3.2 mm. This steel contains between 18–20% Cr and 8–10.5% Ni as its main alloying elements. It exhibits lower electrical and thermal conductivity than carbon steel, low magnetization, and high corrosion resistance, making it a widely used material in industrial applications. Its composition was developed by Hatfield at Firth-Vickers in 1924 and marketed under the name “StayBrite 18/8” [10].

The experimental setup was carried out following the parameters of ASTM G-65. The disc speed was set at 200 rpm and the total sliding distance at 4000 m. The tests were carried out at three temperatures 23, 200 and 400°C and a load of 45 N. The test parameters are summarized in Table 1. Mass loss was monitored every 1,000 m of sliding using a BOECO model BAS-31 plus analytical balance, with a precision of 0.1 mg.

TABLE 1
TEST CONDITIONS FOR DRY ABRASION EXPERIMENTS

Test conditions	Value
Temperature (°C)	23, 200 and 400
Applied load (N)	45
Sliding distance (m)	1,000, 2,000, 3,000 and 4,000
Mass Flow of abrasive material (g/min)	169
Disk speed (rpm)	200

III. RESULTS AND DISCUSSION

Once the preliminary tests were carried out to verify the proper functioning of the adapted systems in the equipment, the abrasive wear resistance on austenitic stainless steel AISI 304 was evaluated. The tests were performed at three temperatures: 23, 200 and 400°C, and a load of 45 N. The loss of mass was monitored every 1,000 m of slippage and with the data obtained the corresponding wear rates were calculated.

In Figure 3a the traces of wear obtained for the maximum sliding distance (4000 m) are observed, on the left side of the image the specimen tested at room temperature is shown, in the central part that corresponding to 200°C and to the right that of 400°C, in the latter a darker hue than the previous two samples is observed with the naked eye, indicating that at 400°C oxidation is promoted on the surface of the samples. Figure 3b shows a cross-sectional of the sample tested at 400°C where the aforementioned oxidation layer is observed.

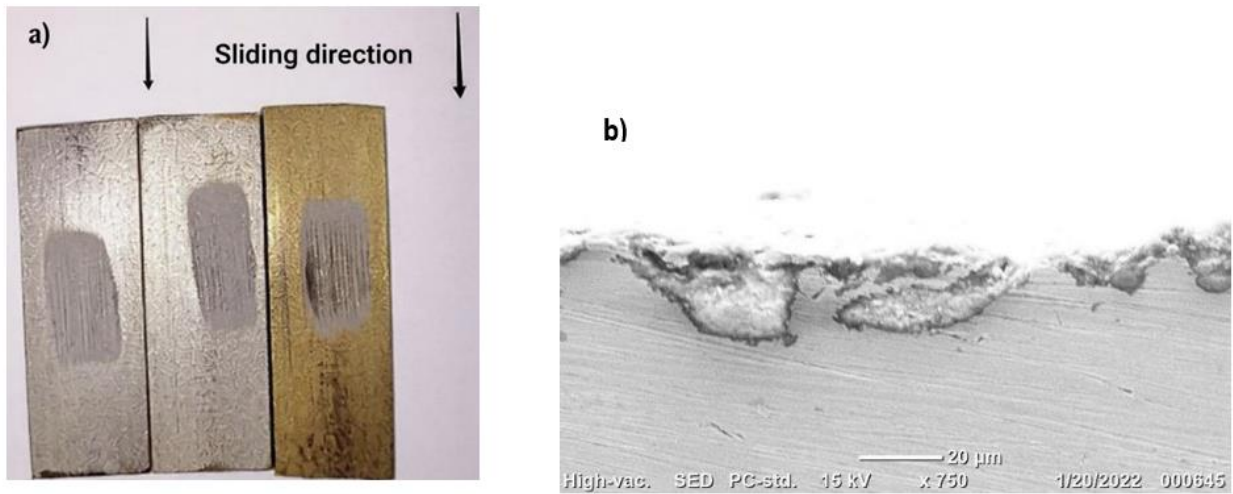


Fig. 3. a) Traces of wear on stainless steel specimens at room temperature, 200 and 400°C, from left to right, respectively;
b) Micrograph of the cross section of the stainless steel sample tested at 400°C.

6

The wear scar in the samples was monitored gravimetrically every 1000 m of sliding, derived from these measurements in Figure 4 presents the wear rate in relation to temperature for different sliding distances. Where it can be observed that as the temperature is increased in abrasion tests, the wear rate decreases. This phenomenon can be explained by the softening of stainless steel due to the heat emitted by the heating elements, thus producing many plastic deformations and eventually a low detachment of the deformed material. In the same figure a similar behavior is also observed in the tests at room temperature and at 200°C, while in the tests at 400°C the graph shows a different behavior. This indicates that at this temperature the mechanisms of material release are different from the other two lower temperatures. On the other hand, in figure 5 the wear coefficient obtained is observed, which presents its highest value at room temperature and, on the contrary, the lowest value was observed at 400°C, it should be noted that these results are consistent with the behavior of wear rates.

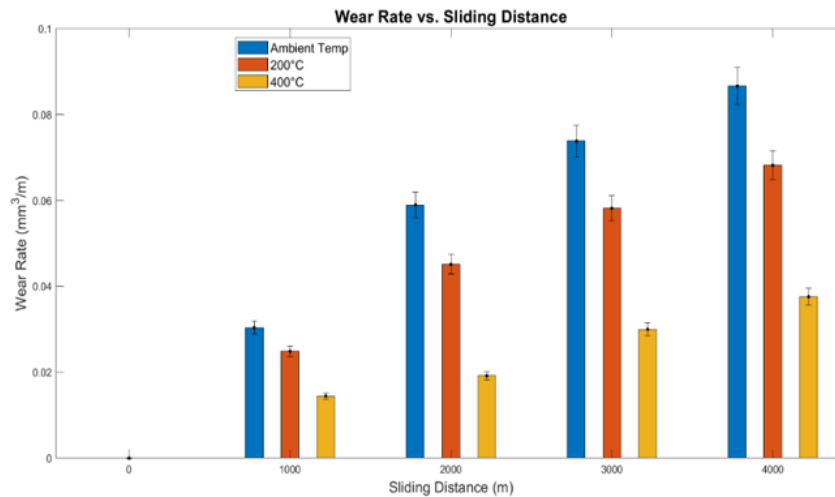


Fig. 4. Wear rate at different sliding distances.

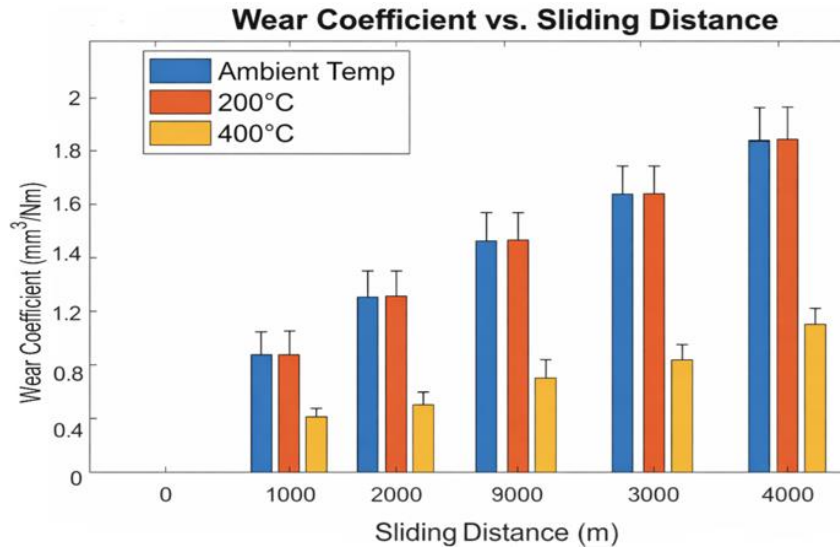


Fig. 5. Wear coefficient sliding distance.

7

A. Wear mechanisms

Figure 6a shows the plowing action obtained at 4000 m slippage and 200°C. On the other hand, figure 6b shows the plowing action under the same test conditions increasing the temperature to 400°C. In both micrographs it is clearly seen how temperature affects the number and shape of the grooves generated on the surface of the specimens. In the first figure, which was tested at a lower temperature, the grooves are observed with a lower definition. While in the second, subjected to 400°C, the grooves are observed with greater definition. This may be possible because stainless steel softens at a higher temperature making it more ductile, in this way the higher the temperature the greater the plastic deformation in the material. Finally, the wear mechanisms observed during the dry abrasion tests at high temperatures were predominantly plastic deformation and plowing action, as can be seen in Figure 6c. In the meantime, in Figure 6d there are indentations of silica sand particles on the surface of austenitic stainless steel which promotes the appearance of cracks.

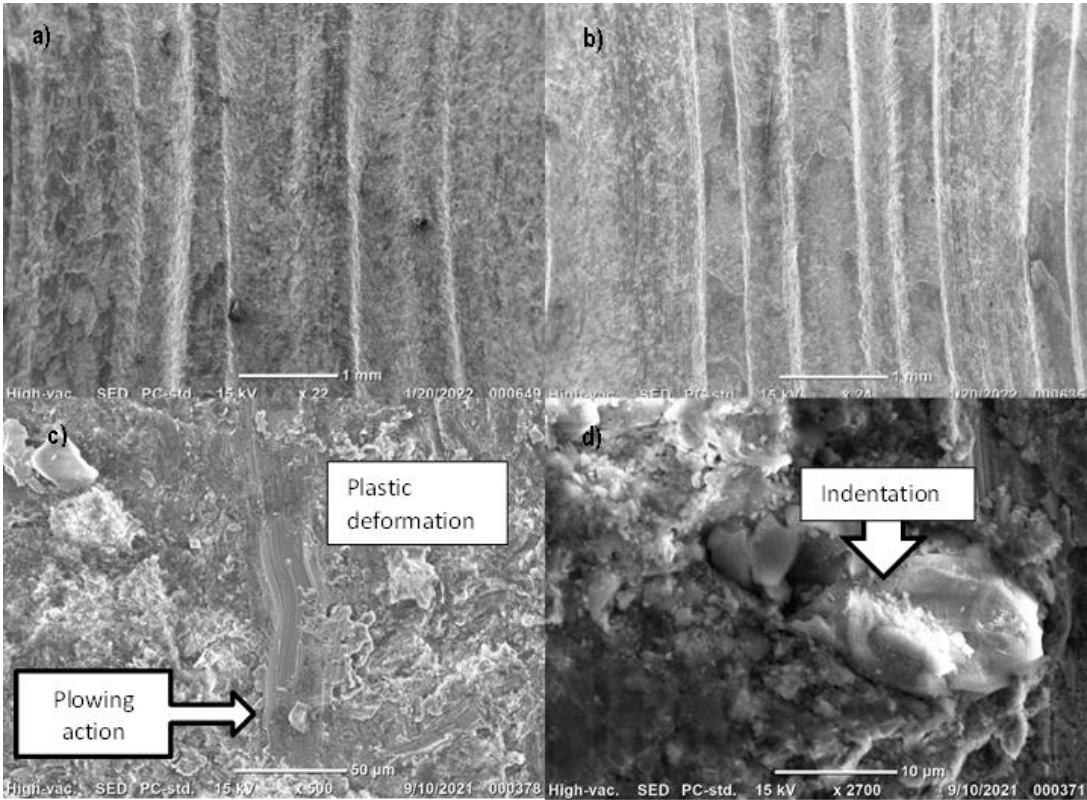


Fig. 6. Micrographs with a) Plowing action on the sample at 200°C. b) Plowing action on the sample at 400°C. (c) Wear track after 4000 m of sliding at 200 °C d) Particle embedded at 4000 m slide at 400°C.

After the abrasion tests at high temperatures, the hardness was measured in three different areas of each sample using a portable hardness tester. With the results obtained, the graph shown in Figure 7 was constructed, where a slight increase in hardness is observed on the surface of the specimens as the temperature increases in the tests; that is, the samples probably soften during the tests and after, with the cooling of the sample, they acquire a greater hardness due to the thermal effect induced during the tests.

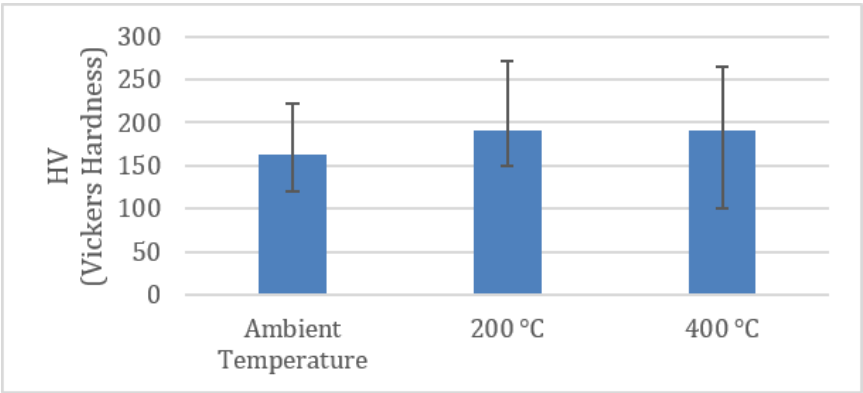


Fig. 7. Surface hardness plot of samples after testing.

The profilometry results confirm that increased temperature reduces the depth and severity of wear, although it increases plastic deformation. Figure 8a shows a pronounced central depression, with depths close to $-300\text{ }\mu\text{m}$, indicating severe wear dominated by fracture and particle removal. The profile shown in Figure 8b exhibits less abrupt variations, with maximum depths around $-250\text{ }\mu\text{m}$, reflecting a more widespread but shallower indentation. This behavior suggests a predominance of plastic deformation with less material removal. Figure 8c shows oscillations between $-250\text{ }\mu\text{m}$ and $-100\text{ }\mu\text{m}$, with a tendency to recover to near-zero levels towards the end of the measurement. The result indicates less severe wear in terms of mass loss, although with greater surface deformation, attributable to the thermal softening of the stainless steel.

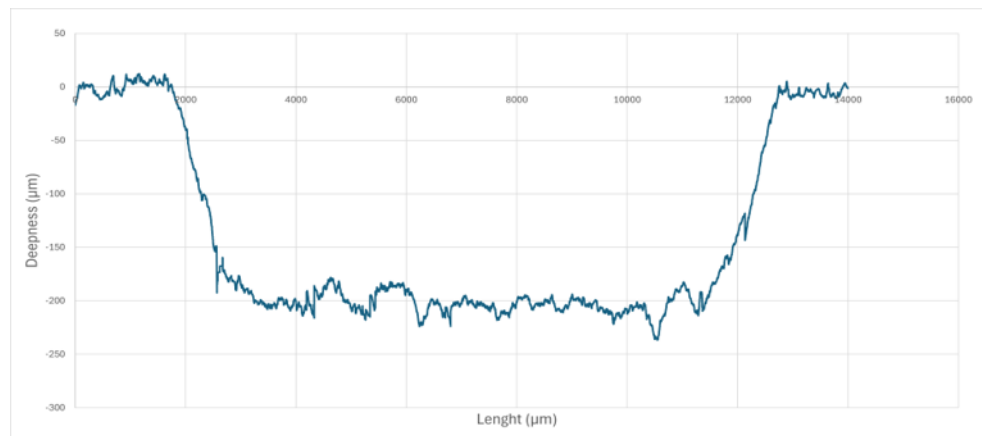


Fig. 8a. Profilometry of specimen tested at room temperature.

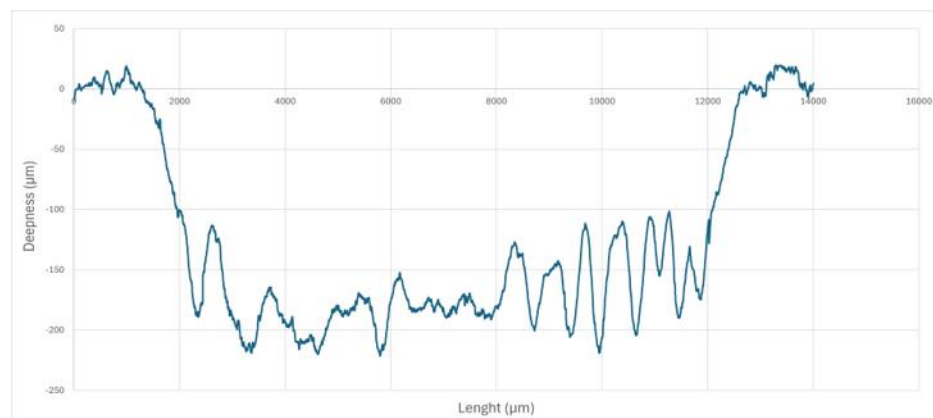


Fig. 8b. Profilometry of specimen tested at 200°C.

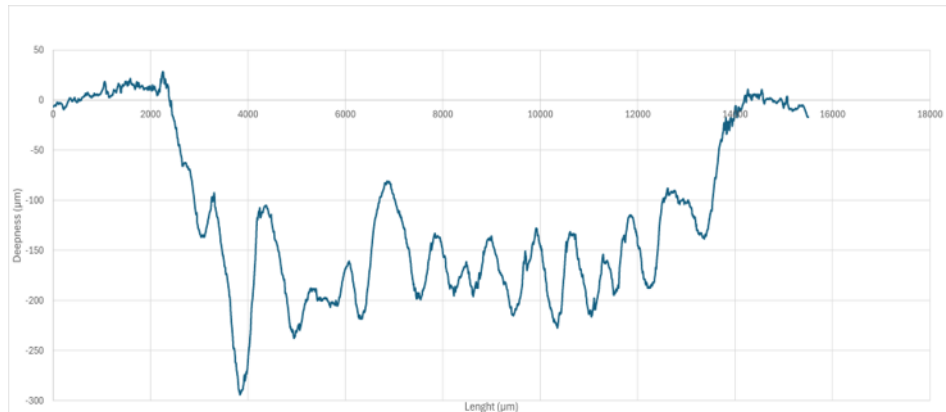


Fig. 8c. Profilometry of specimen tested at 400°C.

B. Raman spectroscopy analysis

The graph illustrates the evolution of the chemical phases present on the surface of the AISI 304 stainless steel subjected to abrasive wear, revealing a clear dependence of oxide film formation on the testing temperature.

10

Room Temperature (RT - Black line), the spectrum is essentially flat, without well-defined Raman scattering peaks. This indicates the absence of a thick or crystalline oxide layer. During wear at RT, the mechanical removal of material dominates over any oxidation kinetics. The natural passive layer of stainless steel is thin (nanometric scale) to generate a strong Raman signal; therefore, the exposed surface corresponds primarily to the freshly plastically deformed metallic matrix.

At 200°C (Red line), slight changes begin to appear. A minor increase in the background signal and the development of broad, low-intensity bands (mainly in the 500-700 cm^{-1} region) are observed. This evidences the onset of an incipient tribo-oxidation process. However, the lack of sharp peaks suggests that the formed oxides are amorphous, very thin, or lack long-range crystalline order due to the continuous mechanical disruption from abrasive wear.

At 400°C (Blue line), the spectrum exhibits a drastic change in surface chemistry, revealing intense and well-defined peaks that confirm a regime of severe tribo-oxidation. The most prominent peak is located around 670-680 cm^{-1} . This is the classic spectroscopic signature of magnetite (Fe_3O_4) and iron-chromium rich spinel-type oxides (FeCr_2O_4). This phase is completely consistent with the dark coloration macroscopically observed on the wear track.

The lower intensity peaks in the 300-400 cm^{-1} region and near 550 cm^{-1} typically correspond to the coexistence of other iron oxide phases (such as hematite Fe_2O_3) and chromium oxide (Cr_2O_3), formed by the preferential oxidation of alloying elements at this elevated temperature.

The broad bands observed above 1300 cm^{-1} are usually attributed to second-order scattering or structural defects in the oxide lattice induced by the severe mechanical deformation and friction.

A direct comparison between the Raman spectra obtained inside and outside the wear track isolates the effect of frictional heating from the ambient testing temperature. At RT and 200°C, both regions exhibit essentially flat spectra, indicating that neither ambient heat nor frictional energy is sufficient to promote significant oxide growth; thus, severe

metallic wear prevails. However, a critical contrast is observed at 400°C. While the spectrum outside the wear track shows the onset of thermal oxidation with low-intensity peaks, the spectrum inside the track at the same temperature displays highly intense, sharp, and well-defined peaks corresponding to magnetite and iron-chromium spinels (centered at $\sim 670 \text{ cm}^{-1}$). This stark difference in peak intensity and definition provides conclusive evidence that the protective dark layer is a tribochemical product. It is the synergistic combination of the high ambient temperature (400°C), localized frictional flash temperatures, and severe plastic deformation that provides the necessary activation energy to accelerate the oxidation kinetics. This mechanism leads to the formation of a thick, highly crystalline protective tribo-layer (glaze layer) inside the wear scar, which acts as a solid lubricant and is fundamentally responsible for the minimization of the wear coefficient at high temperatures (see Fig. 9).

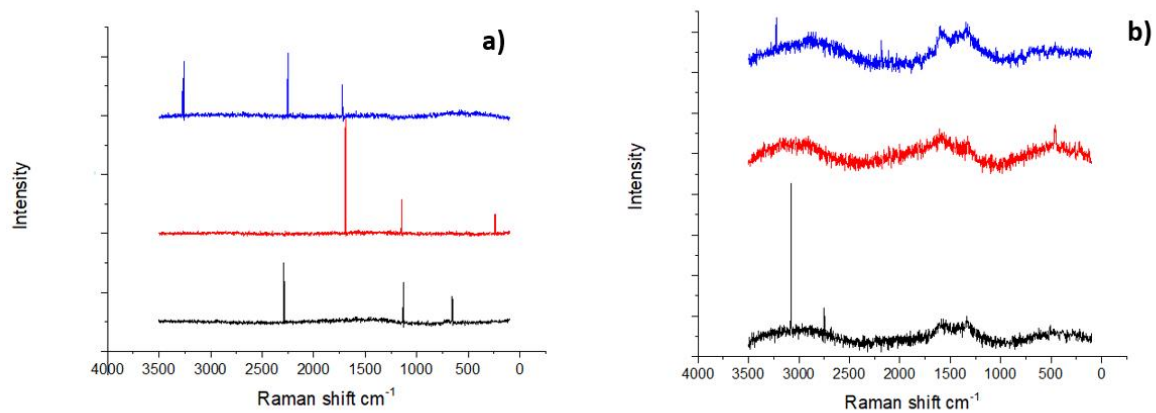


Fig. 9. Raman spectra of AISI 304 at RT ■, 200 °C ■ and 400 °C ■: (a) outside the wear track, (b) inside the wear track.

IV. CONCLUSIONS

A functional test bench was successfully set up to replicate dry abrasion tests according to ASTM G-65, within a temperature range from RT to 400°C. This allowed for the evaluation of the effect of temperature on the wear of AISI 304 austenitic stainless steel.

Gravimetric results showed that the wear rate decreases with increasing temperature, moreover slight increase in hardness was observed on the surface of the specimens as the temperature increases in the tests. This behavior is attributed to the softening of stainless steel at high temperatures, which promotes plastic deformation and reduces material removal.

The microstructure of stainless steel is affected by its allotropic properties; it is well known that its mechanical strength and elasticity begin to be compromised above 315°C. In this context, the predominant wear mechanisms observed were plastic deformation, cracking, and plowing.

A transition in the wear mechanism at 400°C was confirmed by Raman spectroscopy, which revealed the growth of a thick and crystalline oxide layer composed of magnetite (Fe_3O_4) and iron-chromium spinels. This protective layer is a tribochemical product, formed when the combination of ambient heat, frictional flash temperatures, and plastic deformation provides the necessary activation energy to accelerate oxidation, effectively acting as a solid lubricant.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: JOAV; Methodology: JOAV; Investigation: MESH, SITV; Writing-original draft preparation: SITV, FJAG; Writing-review and editing: CSR, SITV; Supervision: CSR; Formal analysis: CSR, SITV.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: We recognize the experimental support of the laboratories of Machines-Tools and Welding of CUCSUR, Universidad de Guadalajara.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Williams, "Wear and wear particles - Some fundamentals," *Tribol. Int.*, vol. 38, no. 10, pp. 863–870, Oct. 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.007>
- [2] H. Dong, "Tribological properties of titanium-based alloys," in *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, Elsevier Inc., 2010, pp. 58–80. doi: <https://doi.org/10.1533/9781845699451.1.58>
- [3] E. Badisch, C. Katsich, H. Winkelmann, F. Franek, M. Roy, "Wear behaviour of hardfaced Fe-Cr-C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 7, pp. 1234–1244, Jul. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.01.008>
- [4] S. Affatato, D. Brando, "Introduction to wear phenomena of orthopaedic implants," in *Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints*, Elsevier, 2013, pp. 3–26. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096128.1.3>
- [5] M. Cristina, M. Farías, D. K. Tanaka, A. Sinatora, M. E. Santos Taqueda, "Study of the Wear Behavior of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Response Surface Methodology," *Proceedings of 17th International Congress of Mechanical Engineering*, Sao Paulo, Brasil, 2003. Available in: <https://abcm.org.br/anais/cobem/2003/html/pdf/COB03-0871.pdf>
- [6] S. Hernandez, J. Hardell, C. Courbon, H. Winkelmann, B. Prakash, "High temperature friction and wear mechanism map for tool steel and boron steel tribopair," *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*, vol. 8, no. 2, pp. 74–84, Jun. 2014, doi: <https://doi.org/10.1179/1751584X13Y.0000000049>
- [7] L. C. Seabra, A. M. Baptista, "Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar," *Wear*, vol. 253, no. 3-4, pp. 394–402, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00138-2)
- [8] D. Odabas, "Effects of Load and Speed on Wear Rate of Abrasive Wear for 2014 Al Alloy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2018. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/295/1/012008>
- [9] Y. Pei, D. Xia, S. Wang, L. Cong, X. Wang, and D. Wang, "Effects of temperature on the tribological properties of NM600 under sliding wear," *Materials*, vol. 12, no. 23, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12234009>
- [10] B. Passilly, A. Quelquejeu, and A. Kardache, "Mechanical properties of stainless steel by using high temperature microhardness tester," *Materiaux et Techniques*, vol. 111, no. 4, 2023, doi: <https://doi.org/10.1051/mattech/2023021>

Validation of the prototype of L-CADEL.v5 elbow assisting device

Validación del prototipo del dispositivo L-CADEL.v5
de asistencia para el codo

<https://cientifica.site>

Sergei **Kotov** ¹
Marco **Ceccarelli** ²

University of Rome Tor Vergata,
Department of Industrial Engineering,
Rome, ITALY

¹ ORCID: 0009-0003-5018-4442 / sergei.kotov@students.uniroma2.eu

² ORCID: 0000-0001-9388-4391 / marco.ceccarelli@uniroma2.eu

Recibido 25/04/2026, aceptado 28/05/2026, publicado 08/06/2026.



Abstract

This paper presents the validation of the L-CADEL v5 elbow assisting device, developed from previous versions to improve its functional effectiveness and the accuracy of its kinematic measurements. The work is based on laboratory testing results involving 100 healthy volunteers performing standardized elbow flexion and extension movements. Kinematic analysis of movements was conducted using three independent systems: the device's integrated IMU sensor data, motion analysis using Kinovea software, and an artificial intel-ligence-based motion analysis system. A quantitative comparison of results from the various systems is presented to assess measurement consistency and identify potential systematic discrepancies.

Index terms: dry abrasion, silica sand, austenite, stainless steel, high temperature.

2

Resumen

Este artículo presenta la validación del dispositivo L-CADEL v5 de asistencia para el codo que se ha desarrollado a partir de versiones anteriores para mejorar su eficacia funcional y precisión de sus mediciones cinemáticas. El trabajo se basa en los resultados de pruebas de laboratorio realizadas con 100 voluntarios que ejecutaron movimientos estandarizados de flexión y extensión del codo. El análisis cinemático de los movimientos se llevó a cabo mediante tres sistemas independientes: los datos del IMU sensor integrado del dispositivo, el análisis de movimiento con el software Kinovea y un sistema de análisis de movimiento basado en inteligencia artificial. Se presenta una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos por los distintos sistemas para evaluar la consistencia de las mediciones e identificar posibles discrepancias sistemáticas.

Palabras clave: abrasión seca, arena de sílice, austenita, acero inoxidable, alta temperatura.

I. INTRODUCTION

The elbow joint plays a vital role in human functional activity, participating in a wide range of everyday, professional, and athletic tasks. Limited mobility or impaired elbow biomechanics, resulting from traumatic injuries, surgical interventions, or neurological diseases, can significantly reduce a patient's functional capabilities and quality of life. Therefore, elbow rehabilitation [1] is an important area of modern orthopedics, traumatology, and neurorehabilitation. Restoring range of motion after fractures, dislocations, surgeries, or neurological disorders requires systematic monitoring and objective assessment of functional recovery dynamics. In this context, the development and implementation of assistive rehabilitation devices is of significant scientific and practical interest.

Traditionally, elbow rehabilitation relied on passive mechanotherapy [2] and on a specialist's subjective visual assessment of the patient's condition. Subsequently, articulated orthoses with adjustable motion parameters were developed, as well as mechanical continuous passive motion (CPM) systems [3] that allow for amplitude and load control. However, most of these devices did not allow quantitative real-time recording of kinematic parameters or the acquisition of digital data for subsequent analysis of the recovery process.

The development of robotic technologies [4] and motion capture systems has enabled the emergence of more advanced solutions for upper-limb rehabilitation [5]. Robotic systems [6] such as Armeo and Biodex, as well as other stationary rehabilitation platforms, provide highly accurate kinematic parameter recording and the ability to deliver controlled therapy. However, the cost of such systems, which can reach tens of thousands of euros, the need for specialized equipment, personnel training, and regular maintenance significantly limit their use. Furthermore, these systems are bulky and primarily intended for use in large medical facilities, limiting their availability for long-term home rehabilitation.

Similarly, professional optoelectronic motion capture systems, including Vicon and Qualisys, provide benchmark accuracy in spatial motion analysis. However, their cost can exceed €100,000 and require multi-camera systems, physical markers, and strict environmental control. Despite their high measurement accuracy, such systems have limited practical applicability for routine clinical practice and home rehabilitation.

Therefore, there is a need to develop accessible, portable, and cost-effective solutions [7], [8], [9] capable of objectively recording kinematic parameters in elbow rehabilitation. This study presents the L-CADEL v5 prototype [10], [11], [12] — an elbow rehabilitation assistive device designed to combine mechanical support with digital motion monitoring. The device consists of three main components and uses an inertial measurement unit (IMU) to measure the forearm's spatial orientation and calculate angular parameters in real time. The system also receives data from Dynamixel servo motors to monitor the device's performance.

One of the main advantages of the L-CADEL v5 is its compact size, portability, and relatively low cost of approximately €180. These features make the system potentially accessible to a wide range of users, including outpatients and participants in home rehabilitation programs. The device's design ensures secure fixation on the user's limb and minimizes unwanted platform movement during exercise.

To objectively evaluate the accuracy and reliability of the L-CADEL v5 prototype, this study conducted a comparative analysis using three different motion assessment methods. The first approach utilized data from the device's inertial sensors to calculate the tilt angle as the primary parameter of elbow flexion and extension. The main advantages of this approach are its autonomy, independence from external recording systems, and real-time operation.

The second approach involved video analysis with Kinovea, a widely used software tool in sports biomechanics. The L-CADEL v5 system has been widely used in clinical trials and clinical studies due to its accessibility and ease of use. This system enables manual or semiautomated determination of joint points and calculation of angles in a two-dimensional plane, providing reproducible visual assessment of kinematic characteristics.

The third method used a computer vision system with elements of artificial intelligence to detect anatomical landmarks and calculate joint angles in two and three-dimensional space without the use of physical markers. The advantage of this approach is the high level of automation of data processing, especially when working with large volumes of data. However, the accuracy of such systems may be dependent on shooting conditions, lighting parameters, and the specifics of the recognition algorithms used.

Therefore, the aim of this study is to evaluate the effectiveness and applicability of L-CADEL v5 as an assistive device for elbow rehabilitation through a comparative analysis of inertial sensor data with video analysis and computer vision methods based on artificial intelligence. Comparing the dynamics of parameter changes, value ranges, and average movement profiles enables us to evaluate the accuracy of the developed prototype and determine its potential for use in clinical practice and home rehabilitation settings.

II. MATERIALS AND METHODS

This section describes the engineering concept, design implementation, and experimental validation of the L-CADEL v5 assistive device for elbow rehabilitation. It describes the system development requirements that determined its functional, ergonomic, and technical characteristics, and presents the prototype architecture, describing its mechanical structure, sensor integration, actuator modules, and control system. A standardized video recording protocol is described, ensuring reproducible measurements and accurate calculation of angular motion parameters. This comprehensive methodological approach enables an objective assessment of the device's accuracy, stability, and practical applicability during cyclic elbow flexion and extension exercises.

A. Design requirements

The development of assistive devices for the elbow requires formalized requirements based on clinical [13], engineering [14], and operational [15] criteria. Unlike large robotic systems, the device must be designed for portability, accessibility, and integration with digital motion analysis tools [16]. For the L-CADEL v5, the requirements were developed based on its purpose as a compact device designed to actively assist elbow flexion and extension while simultaneously monitoring kinematic parameters [17-20]. Figure 1 presents the key requirements that determined the prototype's architecture and functionality:

- Clinical Functionality and Biomechanical Correctness. Ensuring controlled elbow flexion and extension with the ability to set limiting angles of motion will prevent joint overload during exercise. The system must provide adjustable mechanical motion support via servomotors (Dynamixel), partially or fully compensating for the patient's muscular impairment. Pitch angle recording is essential as the primary parameter for elbow joint kinematics, enabling data to be saved for subsequent analysis of therapy progress.
- Mechatronic. Sensors placed on the user's body will provide stable registration of the user's movement, acceleration components, and angles, with a sampling frequency of approximately 100 Hz. The microcontroller, as the heart of the system, must provide real-time data processing, including angle calculation, signal filtering, and servo motor control to ensure the exercise is performed correctly. Control algorithms should ensure

synchronicity between angle measurement and servomotor operation to prevent delays and incorrect system responses. The system should support recording data to a microSD card and transmitting it via a Web Interface for post-processing.

- Ergonomic and Mechanical Design. The platform geometry should match the anatomy of the limbs and ensure comfort during long-term use. The design must be lightweight, modular, and adaptable to the user's various anthropometric parameters. The device's overall weight should be minimized to reduce user strain, especially for those with weakened muscles. Comfort during cyclic exercises and the ability to be worn over clothing are important performance criteria. It is also desirable for the device's design to be modular, allowing the replacement of individual components without a complete redesign of the system.
- Safety and Operational Reliability. Software and hardware limitations on angles of motion should be provided to prevent hyperextension or excessive flexion. Electrical safety is an important parameter to ensure safe, low-voltage operation without risk to the user (9V battery). Components must maintain stable operation over extended sessions. Using Fail-Safe Mechanisms will improve the device's safety.
- Accessibility and Cost Efficiency. Using affordable components will reduce the device's cost, making it accessible to users while maintaining functionality comparable to that of more expensive systems. The device should be self-contained, compact, and suitable for home use without complex calibration. Integration with a web interface for remote monitoring, real-time data visualization, and storage of experimental results will support telerehabilitation and expand the system's clinical capabilities.

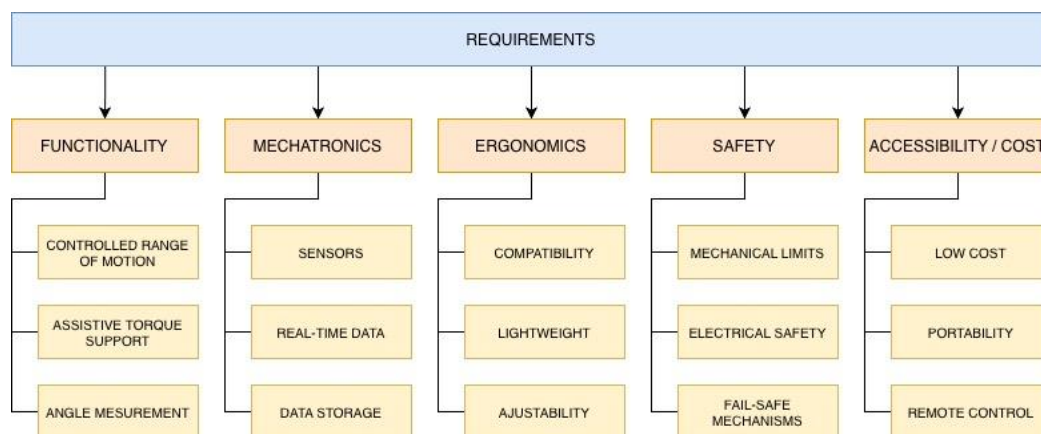


Fig. 1. Main requirements for L-CADEL v.5 assisting device.

The requirements formulated reflect a balance between clinical appropriateness, engineering reliability, user comfort and cost-effectiveness. This design requirements structure will enable the creation of a prototype as a compact, functional, and affordable assistive device for elbow rehabilitation with an integrated digital motion analysis system.

B. L-CADEL v5 Design

The L-CADEL version 5 device was developed in accordance with the previously described requirements, aiming to provide safe, reproducible, and objective support for elbow joint motion during rehabilitation. The prototype is a wearable electromechanical device designed to assist elbow flexion and extension movements within a range of 0° to 140°, which corresponds to the functional range of motion used in most rehabilitation protocols.

The system consists of three functional platforms: the Arm Platform, which is fixed to the forearm; the Wrist Platform, which is secured to the wrist; and the Control Platform, which contains the controls and electronics. This modular architecture provides design flexibility, simplifies adaptation to the user's anatomical features, and improves comfort during long-term use. The system's drive is implemented using two Dynamixel 12A servomotors, selected for their high positioning accuracy, stable torque, and smooth operation, which are critical for assisting devices that interact with the user. Force is transmitted from the servomotors to the wrist platform via a cable mechanism, ensuring controlled wrist movement and, consequently, elbow joint rotation in the sagittal plane. The control system is based on an ESP32 microcontroller that collects, processes, and transmits data in real time from sensors on the Arm Platform and Wrist Platform. The user interface consists of an integrated display and a web interface, enabling tracking of exercise progress and key movement parameters. The acquired sensor data is used both to analyze the kinematics of the user's movements and to evaluate the correct operation of the servomotors and the system.

Figure 2(a) shows the conceptual design of the prototype. The Arm Platform is a flexible ring structure with radius R_a , fixed to the user's arm. Servomotors M_1 and M_2 are located on either side of the platform. The Wrist Platform is also a flexible ring with radius R_w and is connected to the servomotors via cables L_1 and L_2 , secured at points A and B. This configuration converts the servomotors' rotational motion into controlled flexion and extension of the elbow joint. An inertial measurement unit (IMU) on the Wrist Platform records accelerations, orientation, and angular rates. The diagram also shows the coordinate systems used and orientation angles (pitch, Roll, and yaw). Figure 2(b) shows the prototype mounted on the user's arm during one of the laboratory tests conducted at ESIME, University IPN (Mexico). The device's design allows comfortable use with everyday clothing, increasing ease of use and expanding its potential application scenarios, including clinical and semi-home rehabilitation settings.

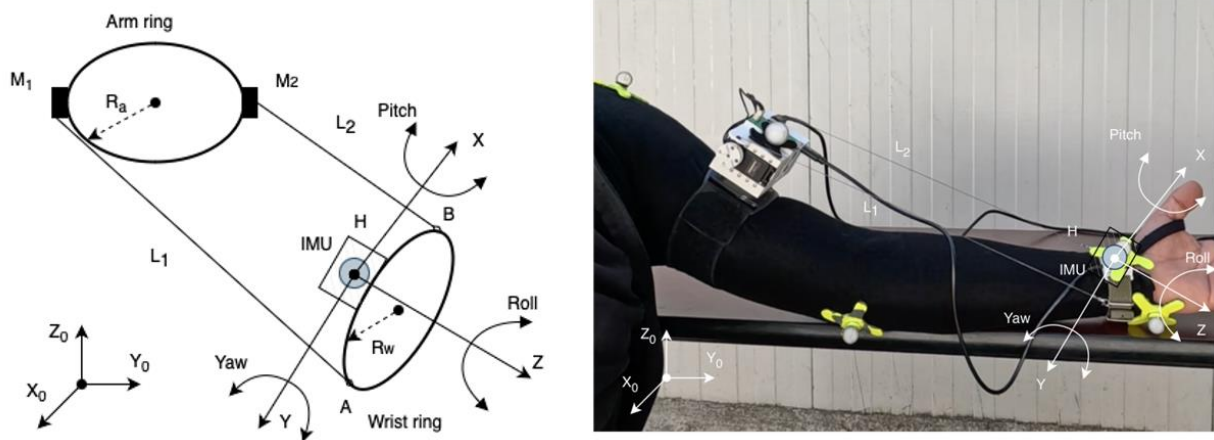


Fig. 2. Design of L-CADEL v.5: (a) Conceptual design; (b) Prototype installed on the arm.

Figure 3 shows the conceptual design of the L-CADEL v5 device as an assistive system for elbow joint rehabilitation. The device architecture includes three main mechanical and electronic subsystems—the Wrist Platform, Arm Platform, and Control Unit—as well as an external visualization and interaction layer via a Web Interface and Display Unit.

The Wrist Platform is mounted on the user's wrist. This platform houses an IMU sensor, which records the spatial orientation of the forearm segment. The Arm Platform is positioned on the upper biceps and performs mechanical and

actuation functions. Two Dynamixel servomotors are installed on this platform. The Control Unit is the central element of the system. It includes a microcontroller that processes data from the IMU sensor, controls the Dynamixel, and implements algorithms to calculate angular parameters. A TFT touchscreen is used for local display of information, allowing the user to view current angle values, the device's operating mode, and training parameters. The system is powered by a standalone 9V battery, ensuring mobility and independence from stationary power sources. A microSD card is provided for data recording and subsequent analysis. Data is transferred from the Control Platform to the external interaction layer, the Web Interface. The Web Interface enables remote monitoring, movement dynamics analysis, storage of training history, and potential integration with telerehabilitation platforms.

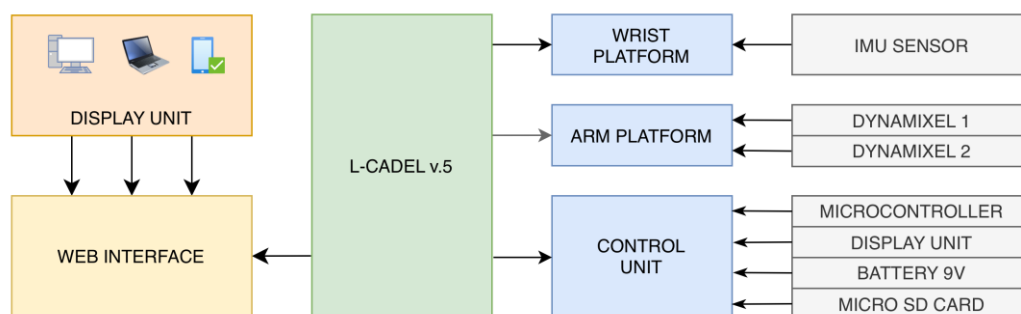


Fig. 3. Conceptual design for L-CADEL v5 with connection to the Web Interface.

7

Thus, the design reflects the modular architecture of the L-CADEL v5, in which the sensor layer (Wrist Platform) records movement, the actuator layer (Arm Platform) implements the assistive mechanics, and the control layer (Control Unit) processes data, controls the actuators, and communicates with the user. This structure ensures autonomy, mobility, and the ability to monitor the rehabilitation process both locally and remotely, making the device functionally flexible and suitable for both clinical and home use.

B. Protocol for video recording

To generate a reliable, reproducible experimental dataset, a standardized protocol for video recording elbow flexion/extension movements was developed. Approximately 100 volunteers participated in the study, ensuring statistical stability of the sample and accounting for interindividual anatomical and kinematic differences. For each participant, four video sequences were recorded, including movements of the right and left arms in frontal and posterior views. This approach ensures a complete spatial representation of movement, improves the accuracy of visual marker tracking, and enables analysis of elbow joint kinematics in the sagittal plane. Additionally, multi-angle recording improves the quality of the data used for subsequent device validation using Kinovea software and an AI-based system.

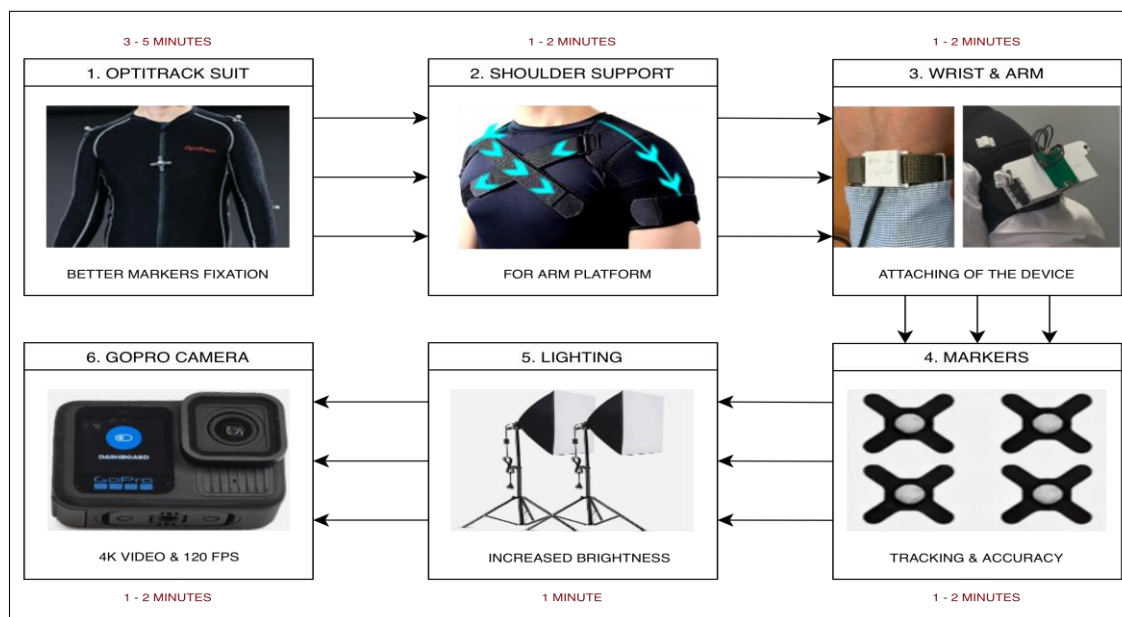


Fig. 4. Steps & Timing for video recording.

8

Volunteer and equipment preparation followed the step-by-step protocol presented in Figure 4. First, the participant donned special, form-fitting OptiTrack suit, ensuring a snug fit (Step 1, 3–5 minutes). This approach increased marker stability, improved visual readability, and reduced visual noise during subsequent video data analysis. Using OptiTrack suits minimizes the possibility of fabric shifting during exercise. Next, the shoulder support element is installed (Step 2, 1–2 minutes), designed to secure the Arm Platform. This design ensures the Arm Platform remains stable relative to the shoulder segment and improves user comfort during exercise. The shoulder support can be adjusted to suit a variety of user anatomy. Next, the Arm Platform and Wrist Platform are secured to the user's arm (Step 3, 1–2 minutes). The Wrist Platform is attached to the user's wrist using a nylon strap. The Arm Platform is attached to the upper biceps using a plastic base and a metal buckle. After mechanical fixation, all electrical connections and power cables are connected, preparing the device for the exercise.

For subsequent video analysis, visual markers are placed on anatomical landmarks of the upper limb (step 4, 1–2 minutes). Their placement is optimized to improve joint angle tracking accuracy and minimize tracking errors during video processing. The anatomical angle (shoulder-elbow-wrist) and the angle between two platforms (Arm Platform-elbow-Wrist Platform) are analyzed. The lighting equipment is adjusted to ensure uniform illumination of the work area (step 5, 1 minute). Increased brightness and directional lighting reduce shadows, enhance marker contrast, and improve the quality of video data for analysis in Kinovea and AI systems. In the final step, the video camera is installed (step 6, 1–2 minutes). The experiments utilized a GoPro camera capable of recording 4K video at 120 fps and featuring HyperSmooth 6.0 image stabilization. This configuration provides the high temporal and spatial resolution necessary for accurate analysis of movement kinematics.

Thus, the complete video recording process for one volunteer takes an average of 20 to 30 minutes, depending on the participant's anatomical characteristics and the time required for proper equipment setup. This duration includes the entire preparation phase, including donning specialized clothing, securing the shoulder support, installing the L-CADEL v.5 platforms, connecting the electrical connections, placing visual markers, and setting up the lighting and

video camera. This step-by-step setup ensures system stability, accurate measurements, and high-quality recorded data. For each volunteer, four video sequences are recorded, corresponding to movements of the right and left arms in the frontal and posterior projections. Each video sequence includes three consecutive cycles of elbow flexion and extension, performed at a natural pace for approximately 30 seconds per cycle. As a result, each video sequence is approximately 1.5 minutes long, with a total data volume per volunteer of approximately 6 minutes in 4K format at 120 frames per second. This level of detail allows for a fairly accurate analysis of the angular characteristics of movement during exercise.

III. RESULTS

The L-CADEL v5 prototype was experimentally tested in laboratory conditions at IPN University (Mexico City). The tests were conducted as an extended pilot campaign involving over 100 volunteers and aimed to comprehensively evaluate the mechanical design, the control system's reliability, and the device's effectiveness in assisted elbow movements. All participants had intact functional elbow mobility and reported no previous injuries or musculoskeletal conditions.

Table 1 presents the demographic characteristics of the 105 volunteers. The study included 76 men (72%) and 29 women (28%). The average age of the participants was 29 ± 12 years, with a range from 20 to 76 years, indicating a broad age distribution. The largest proportion of subjects was in the 20–30 age group (70%), while the 31–50 and over-51 age groups each accounted for 15%. The average height of the participants was 169 ± 9 cm (142–192 cm), and the average body weight was 74 ± 11 kg (50–120 kg). These data demonstrate heterogeneity in the sample with respect to age and anthropometric parameters, thereby increasing the generalizability of the results when evaluating the performance of the L-CADEL v5 device.

TABLE 1
DEMOGRAPHIC AND ANTHROPOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE VOLUNTEERS

	Parameter	Value
1	Total volunteers	105
2	Male / Female	76 (72%) / 29 (28%)
3	Age (mean +/- sd (min-max))	29 +/- 12 years (20-76)
4	Age (20 - 30 / 31 - 50 / over 51)	70% / 15% / 15%
5	Height (mean +/- sd (min-max))	169 +/- 9 cm (142-192)
6	Weight (mean +/- sd (min-max))	74 +/- 11 kg (50-120)

During testing, volunteers generally rated the prototype's ergonomics and ease of use positively, noting its intuitive controls and the natural feel of the supported movements. Participants also reported a good level of comfort during the cyclic exercises, with no pain or subjective discomfort in the elbow joint. This demonstrates correct kinematic synchronization between the user's hand movement and the device's actuators. The five-frame sequence shown in Figure 19 illustrates a complete cycle of elbow flexion-extension exercise performed by a volunteer using the L-CADEL v5 prototype and clearly demonstrates the movement's stability and repeatability.

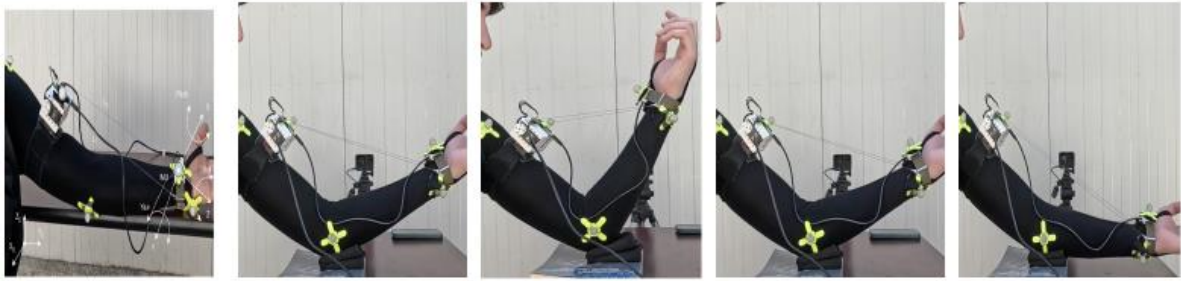


Fig. 5. Snapshots of flexion-extension exercise by a volunteer for elbow testing device L-CADEL v5.

The experiment was conducted according to the protocol described in [32]. The subject's initial position was seated at a table, with the forearm resting on a horizontal surface, as shown in Figure 5. Each volunteer performed three consecutive cycles of elbow flexion and extension at a natural speed of 30 seconds per cycle. Four videos were recorded for each volunteer: right and left arm, front and back views. The MPU 6050 wrist-mounted IMU is used to assess forearm position and record forearm movement in real time during the exercise.

The control algorithm operates with two fixed angular thresholds: 0° , corresponding to maximum elbow extension, and 90° , corresponding to maximum flexion. Upon reaching the upper threshold (90°), the system interprets this state as the completion of the flexion phase and automatically reverses the servomotor rotation direction, initiating the extension phase. Similarly, decreasing the angle to the lower threshold (0°) reverses the direction of movement, ensuring the transition to the next cycle. This enables the implementation of stable periodic motion dynamics between the two limit positions. This control algorithm is characterized by high reliability, ease of implementation, and low computational costs, making it particularly suitable for wearable rehabilitation systems with limited resources. Furthermore, fixed angular limits ensure movement reproducibility and increase user safety by preventing deviations from physiologically acceptable ranges. Taken together, the laboratory test results confirm the functional viability of the L-CADEL v5 prototype and its potential for further use in assisted rehabilitation and elbow joint training.

A. Data from sensors

Figures 6, 7, and 8 show real-time visualizations of data from the sensors, implemented through the developed web interface of the L-CADEL v5 prototype. The system architecture is built on a client-server model: a microcontroller integrated into the control unit collects data from the IMU sensor and DYNAMIXEL servomotors, then transmits it wirelessly (Wi-Fi) to the server application via the secure WebSocket protocol (SSL). Data is transmitted in JSON format, ensuring structured data and compatibility with web technologies.

Figure 6 shows the dynamics of forearm orientation angles—Pitch (red line) and Roll (green line). The coordinate system corresponds to that introduced previously in Fig. 5: Pitch is rotation around the Y-axis and reflects movement in the sagittal plane (elbow flexion–extension). At the same time, Roll is rotation around the X-axis and characterizes lateral deviations of the forearm. The figure represents the execution of three consecutive elbow flexion–extension cycles during a single exercise at a natural speed of 30 seconds per cycle. The IMU sampling frequency is approximately 100 Hz; signal filtering was not applied in this series of experiments, which allows one to evaluate the "raw" measurement dynamics and the level of the noise component. Angle calculations are performed in real time via the web interface using standard trigonometric transformations, reducing the computational load on the microcontroller and increasing the system's scalability.

The pitch profile shows the expected monotonic dynamics during flexion and extension, confirming the correctness of the motion recording. The pitch angle is calculated based on the acceleration components using the formula:

$$Pitch = \text{atan2}\left(\frac{ax}{\sqrt{ax^2 + az^2}}\right) \quad (1)$$

Where, ax , ay , az are the acceleration components of the accelerometer attached to the user's wrist. During the experiment, pitch angle values ranged from 186.56° to 106.90° , within the physiologically acceptable range of motion under the specified protocol conditions.

At the same time, the roll analysis reveals small lateral deviations, indicating incomplete isolation of motion in this plane. The roll angle is calculated using the expression:

$$Roll = \text{atan2}\left(\frac{-ax}{\sqrt{ay^2 + az^2}}\right) \quad (2)$$

Theoretically, with ideal exercise performance, movement should occur predominantly in the sagittal plane, and the roll values should remain virtually constant. However, experimentally recorded tilt variations ranging from 195.20° to 208.89° , indicating lateral displacement of the forearm during exercise. These deviations may be due to individual motor control characteristics, compensatory movements of the shoulder joint, or micro-movements of the sensor mount.

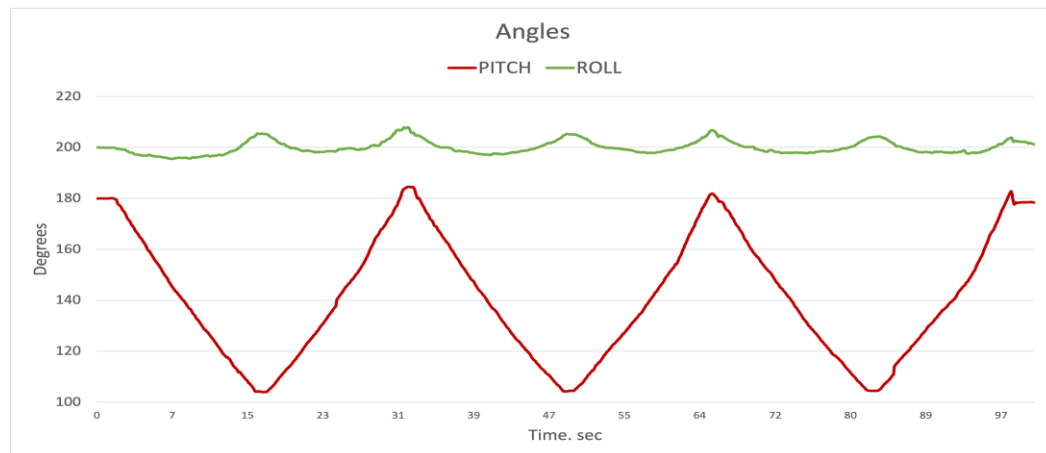


Fig. 6. Acquired data during a test with L-CADEL.v5 prototype in terms of Pitch and Roll angles.

Figure 7 shows the IMU acceleration components during three consecutive flexion-extension cycles. Thus, analysis of the acceleration components allows us to characterize further the movement's dynamics, including its smoothness, phase symmetry, and the presence of micromovements. The Ax and Az components correspond to accelerations in the sagittal plane in the horizontal and vertical directions, respectively. Signal analysis reveals that the greatest oscillation amplitude is observed along the Ax axis, corresponding to the horizontal direction in the sagittal plane.

This component is most sensitive to the flexion and extension phases of the elbow joint and exhibits pronounced periodic extremes synchronized with the change in direction of movement. In contrast, the A_y component is characterized by a smaller amplitude of value variations. The (A_x) values range from 0 to 9.88 m/s², while the A_z values range from 2.33 to 8.98 m/s². These ranges are consistent with cyclic changes in the spatial orientation of the forearm and reflect periodic variations in the horizontal and vertical components of acceleration during rotational motion. The repeatability of the signal shape over three consecutive cycles indicates a stable kinematic profile of the movement. The A_y component exhibits a less stable pattern, varying between 2.34 and 4.12 m/s². The presence of values along this axis indicates that forearm movement is not completely constrained by the sagittal plane and is accompanied by lateral deviations of the wrist. Factors influencing the signal structure may include micro-movements of the sensor mount, changes in the tension of the connecting cables, or signs of user muscle fatigue, which can lead to changes in the movement trajectory.

To assess the integral intensity of movement, the magnitude of the acceleration vector was calculated (formula 3). This parameter allows estimating the total dynamic load regardless of sensor orientation and can be used for subsequent analysis of movement energy characteristics and for identifying anomalies in the kinematic profile. The graph shows that the modulus remains within a relatively narrow range (approximately 8.8–10.2 m/s²) and exhibits weak periodic oscillations synchronized with flexion–extension cycles.

$$|a| = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} \quad (3)$$

12

where ax , ay , az are the acceleration components of the IMU accelerometer attached to the wrist. Small wave-like changes in the modulus reflect the dynamic component of the motion, but their amplitude is small, indicating a smooth, controlled motion. The repeatability of the curve shape over three cycles indicates a stable kinematic profile and the coordinated operation of the servo drives and control algorithm. Overall, the modulus curve confirms that the motion is performed rhythmically, with moderate dynamic load and high repeatability between cycles.

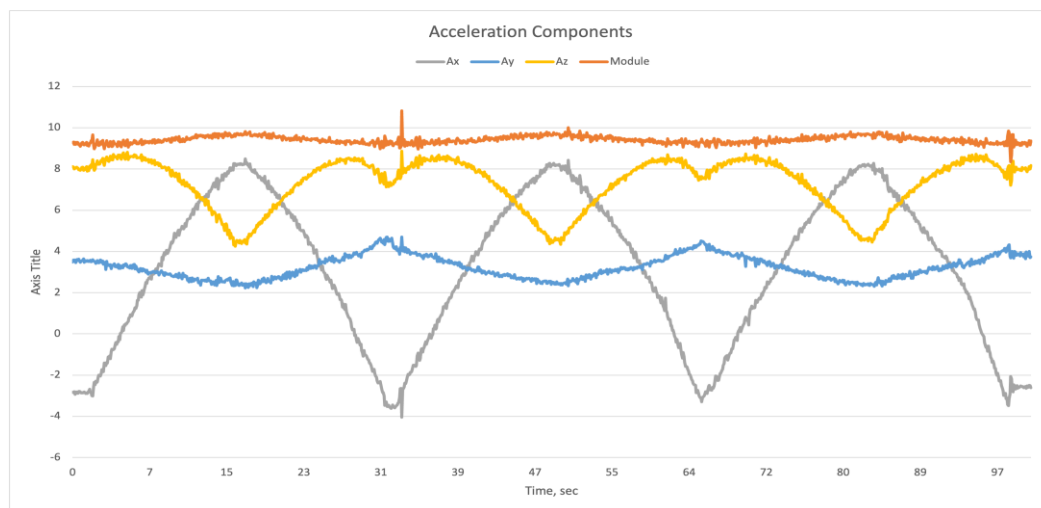


Fig. 7. Acquired data during a test with L-CADEL.v5 prototype in terms of acceleration components A_x , A_y , A_z and Module.

Figure 8 shows the time dependence of angular velocity recorded by the IMU MPU-6050, installed on the user's wrist. The figure reflects gyroscope data along two axes: G_x (blue line) and G_z (gray line)—during three consecutive elbow flexion-extension cycles. The G_x component demonstrates the most pronounced dynamics and corresponds to the main plane of motion (sagittal). Positive angular velocity values are recorded during the flexion phases, while negative ones are recorded during the extension phases, reflecting a change in the direction of forearm rotation relative to the elbow joint. The angular velocity amplitude is ± 4 to ± 10 °/s, corresponding to a controlled, moderate tempo of exercise performance. At moments of direction reversal (the transition from flexion to extension and vice versa), short-term extremes are observed, reaching higher absolute values. These peaks are due to inertial effects, the instantaneous reversal of the angular velocity, and the dynamic response of the servo drive control system. The G_z component has a significantly lower amplitude and fluctuates near zero. This indicates that the movement occurs predominantly in one plane, with rotation around the Z-axis being secondary. Minor deviations may be due to micro-movements of the shoulder joint, imperfect sensor fixation, or individual user characteristics. The absence of significant oscillations along the Z-axis confirms the correct execution of the exercise and the relative isolation of movement in the sagittal plane.

The signal structure is consistent across all three cycles, indicating the reproducibility of the kinematic profile and the stability of the control algorithm. The observed noise level is typical for the MPU-6050 gyroscope without additional digital filtering. Overall, the obtained data confirm that the MPU-6050 provides adequate angular velocity recording for elbow motion monitoring and can be effectively used to analyze the dynamic characteristics of the exercise.

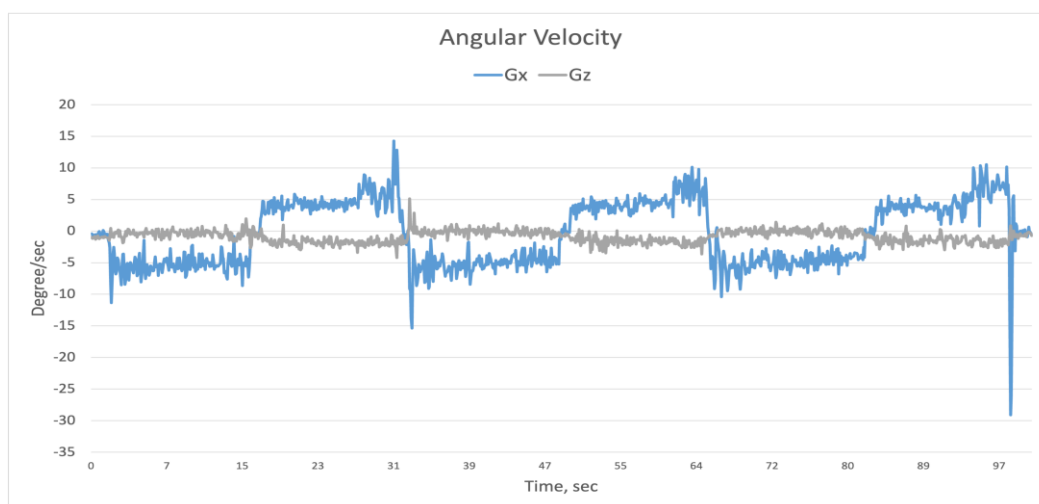


Fig. 8. Acquired data during a test with L-CADEL.v5 prototype in terms of angular velocity G_x , G_z .

Table 2 shows the maximum and minimum parameter values recorded by the L-CADEL v5 prototype sensor system during experimental testing. The presented ranges reflect the amplitude characteristics of angular positions and acceleration components. The stability of the values between cycles indicates the reproducibility of the results and the robustness of the system. Taken together, the presented data confirm that L-CADEL v5 meets its stated functional characteristics and can be considered a promising platform for assisted rehabilitation and upper-limb movement monitoring.

TABLE 2
RESULTS OF THE MAXIMUM AND MINIMUM VALUES WITH L-CADEL v.5 PROTOTYPE, DATA FROM SENSORS

Components	Max	Min
Pitch (deg)	186	106
Roll (deg)	206	195
Acceleration components Ax (m/s ²)	8.56	-2.88
Acceleration components Ay (m/s ²)	4.21	-0.23
Acceleration components Az (m/s ²)	9.45	4.24
Module (m/s ²)	10.56	9.11
Angular velocity Gx (deg/s)	4.21	-0.23
Angular velocity Gz (deg/s)	9.45	4.24

B. Kinovea software

Fig. 9 shows a volunteer during experimental testing at the IPN Laboratory. The volunteer was seated, with the forearm resting on a horizontal tabletop. This position minimizes unwanted shoulder and trunk movements. During the experiment, the volunteer performed three flexion-extension cycles at a natural speed of around 30 seconds per cycle. For motion analysis using Kinovea software, a system of five reference markers is placed on anatomical landmarks and device elements.

Markers highlighted in green (markers 1, 2, 3) were used to determine the anatomical elbow joint angle formed by the shoulder-elbow-wrist segments. This configuration allows for the calculation of the true biomechanical elbow flexion/extension angle, independent of the assistive device design. Additionally, markers highlighted in red (4, 2, 5) were used to record the functional angle between the device elements, as determined by the Arm Platform-elbow-Wrist Platform configuration. This angle characterizes the kinematics of the assistive mechanism itself and reflects the motion generated by the servo drives and cable system. In the Kinovea software, both angles were analyzed synchronously, allowing comparison of their temporal dynamics, amplitude characteristics, and the consistency between the user's anatomical motion and the device's mechanical motion. This approach provides a comprehensive assessment of the accuracy, efficiency and biomechanical correctness of the L-CADEL v5 system.

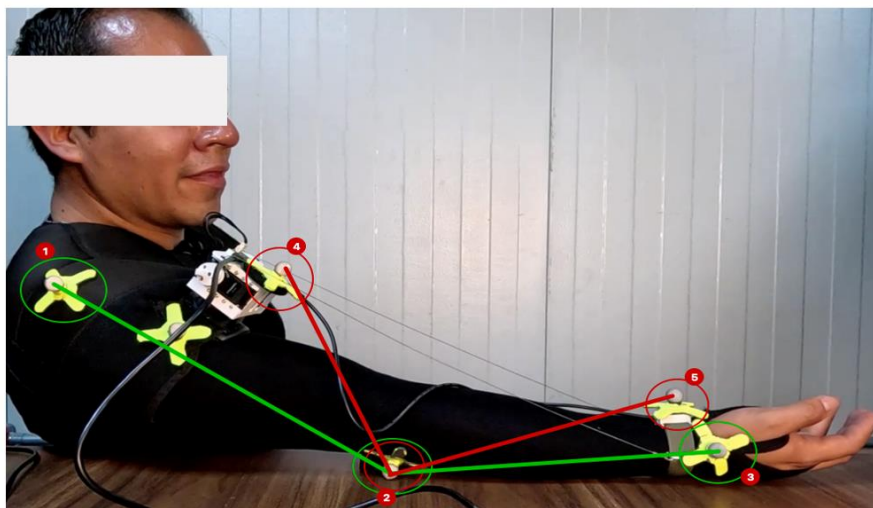


Fig. 9. L-CADEL v5 with markers attached to the volunteer: (1, 2, 3) Biomechanical angle; (4, 2, 5) Device angle.

The sequence of five screenshots shown in Fig. 10 illustrates the process of one elbow flexion-extension cycle performed by volunteer ID M.3 with the L-CADEL v5 assistive device installed. The experiment was conducted in a laboratory setting with a standardized posture: the subject was seated, with the forearm resting on the table. The volunteer performed three elbow flexion-extension cycles with a natural speed of 30 seconds per cycle. The initial phase of the movement is shown in Fig. 10(a), where the table fully supports the forearm and the hand is in a supinated position, forming a zero angular position. The lifting phase (Fig. 10 (b)) is characterized by elbow flexion to approximately 45°, accompanied by slight wrist rotation. The maximum flexion phase is shown in Fig. 10 (c), where the forearm assumes a nearly vertical position. Next comes the controlled extension phase (Fig. 10 (d)), during which the forearm is smoothly lowered. The final phase (Fig. 10 (e)) is the return to the starting position with support on the table, completing the full cycle of movement.

Kinematic analysis was performed using Kinovea software, which calculated two independent angular trajectories. The first trajectory (green curve) corresponded to the anatomical angle defined between the "wrist - elbow - shoulder" vector and reflected a biomechanical assessment of upper limb movement. The second trajectory (blue curve) represented the angle between the "Wrist Platform - elbow - Arm Platform" vector and characterized the kinematics recorded directly by the L-CADEL v5 device. Comparison of these angles allows us to evaluate the consistency between anatomical movement and the device's mechanical response, identify possible differences in amplitude, and assess potential platform displacements relative to anatomical landmarks.

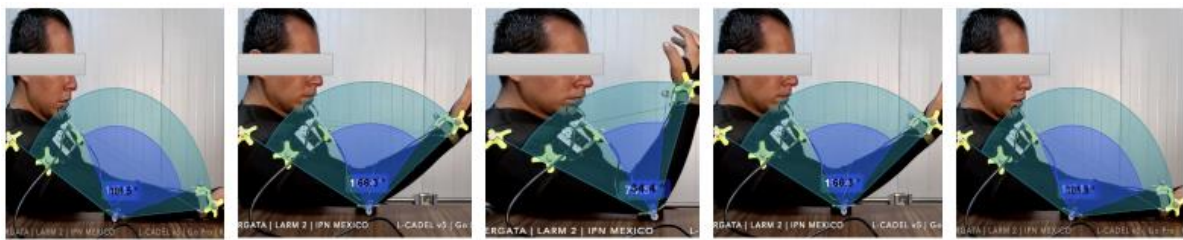


Fig. 10. Snapshots of flexion-extension exercise by a volunteer for elbow testing device L-CADEL v5 with Kinovea analysis.

Based on the coordinates of the reference markers extracted from the video recordings, two independent elbow flexion angles were calculated for each frame. The first angle corresponds to the "anatomical angle" defined by the "wrist-elbow-shoulder" segments and reflects the biomechanical position of the upper limb. The second angle characterizes the "device angle" and is formed by the "Wrist Platform-elbow-Arm Platform" segments, describing the movement kinematics recorded directly by the L-CADEL v5 system. In both cases, the center of measurement was the marker located in the elbow joint, while the wrist vector and shoulder vector differed depending on the selected marker configuration.

Figure 11 shows three consecutive elbow flexion-extension cycles performed using the L-CADEL v5 prototype. Each cycle demonstrates a distinct phase transition from the maximum angular value corresponding to the extension phase to the minimum value during the flexion phase, followed by a return to the initial position. The time profiles of both angular trajectories demonstrate a high degree of synchrony and phase coincidence, indicating coordinated motion between the anatomical markers and the device elements. At the same time, the absolute values of the "anatomical angle" systematically exceed the "device angle" values. This discrepancy is explained by the spatial location of the anatomical shoulder marker, which is somewhat proximal to the Arm Platform marker, forming a more open geometric angle. As a result, the anatomical angle varies over approximately 78–156 deg, while the angle measured by the device

exhibits a more compact range—54–132 deg. Despite this, the difference between the two signals remains stable throughout all three cycles, and both curves demonstrate high reproducibility, periodicity, and temporal consistency. These results confirm the correctness of motion capture, the stability of the angle calculation algorithm, and the reliability of the L-CADEL v5 system in dynamic analysis of elbow joint movements.

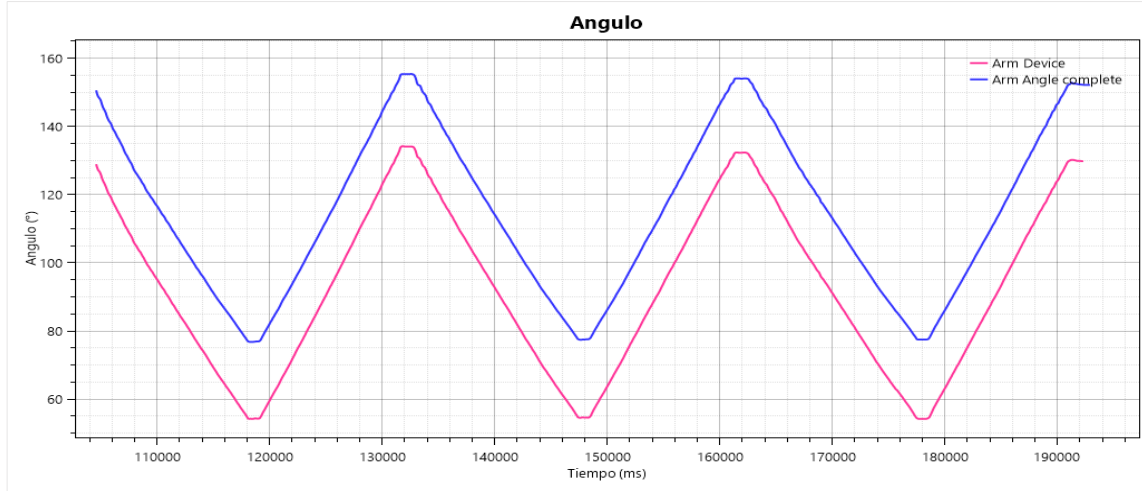


Fig. 11. Analysis of the Kinovea software of test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Pitch angle: Anatomical and Device angles.

Calculations were performed in the image plane (2D), which corresponds to the Kinovea methodology. For each video frame, the two-dimensional coordinates of the markers are known:

$$W = (x_W, y_W), E = (x_E, y_E), S = (x_S, y_S), WP = (x_{WP}, y_{WP}), AP = (x_{AP}, y_{AP}) \quad (4)$$

Where, W is the wrist, E is the elbow, S is the shoulder, AP is the Arm platform, WP is the Wrist platform markers. The first step is to construct vectors. Both angles share a common center—the ulnar marker E . Therefore, two sets of vectors are formed:

"Anatomical angle":

$$V_1 = \overrightarrow{EW} = (x_W - x_E, y_W - y_E), V_2 = \overrightarrow{ES} = (x_S - x_E, y_S - y_E) \quad (5)$$

"Device angle":

$$V_3 = \overrightarrow{EWP} = (x_{WP} - x_E, y_{WP} - y_E), V_4 = \overrightarrow{EAP} = (x_{AP} - x_E, y_{AP} - y_E) \quad (6)$$

The next step is to calculate the dot product and the vector norms. The dot product is calculated using the formula:

$$V_1 \cdot V_2 = v_{1x} v_{2x} + v_{1y} v_{2y}, V_3 \cdot V_4 = v_{3x} v_{4x} + v_{3y} v_{4y} \quad (7)$$

The final step is to calculate the angles using the dot product:

$$\theta_{Anatomical\ angle} = \arccos\left(\frac{V_1 \cdot V_2}{\|V_1\| \|V_2\|}\right), \quad \theta_{Device\ angle} = \arccos\left(\frac{V_3 \cdot V_4}{\|V_3\| \|V_4\|}\right) \quad (8)$$

Figure 12 shows two time series of elbow joint angular velocity calculated based on the derivative of angular positions. Both time series exhibit three distinct phase transitions corresponding to three cycles of elbow flexion/extension. During the dynamic flexion and extension phases, distinct positive and negative peaks in angular velocity are recorded. In this configuration, positive peaks correspond to the elbow extension phase, while negative peaks are associated with the flexion phase. This signal structure is consistent with the expected biomechanics of the movement and confirms the correctness of the calculations of the angular trajectory derivatives. A comparative analysis of the two curves shows that the angular velocities are almost completely synchronous in time, including the moments of reaching extreme values and changing direction. This demonstrates high temporal consistency of the angles. The figure shows that the "anatomical angle" consistently exhibits slightly higher peak angular velocity and smoother peak shapes than the "device angle." The "device angle" data exhibit lower peak amplitudes, which may be due to differences in marker placement geometry. These results confirm the reproducibility of the kinematic characteristics of the movement and demonstrate that the L-CADEL v5 system provides adequate and stable recording of elbow joint dynamics during rehabilitation exercises.

Angular velocity is calculated as the discrete first derivative of the joint's angular position. For frame k , the angular velocity is determined using the formula:

$$w_k = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{\Delta t} \quad (9)$$

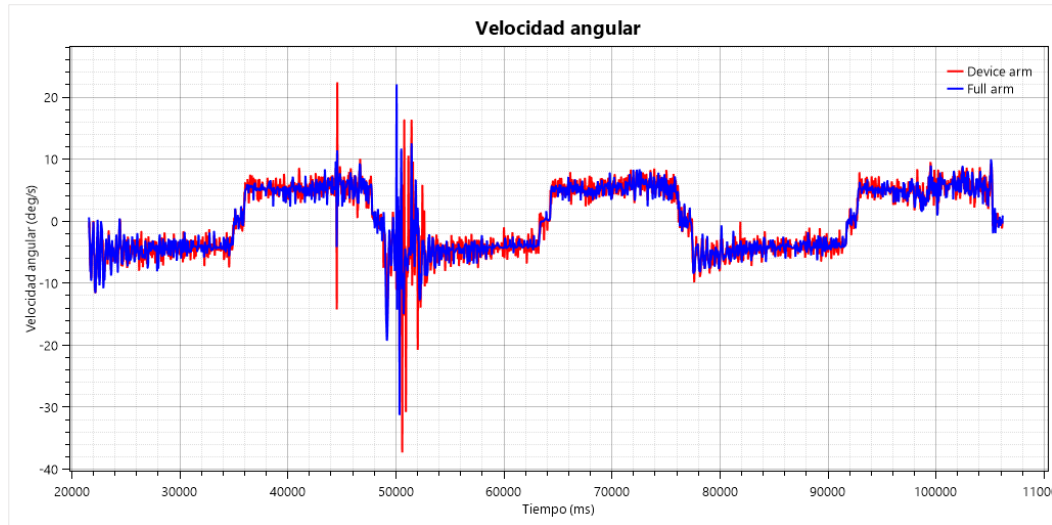


Fig. 12. Analysis of the Kinovea software of test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Angular Velocity: Anatomical angle and Device angle.

Figure 13 shows the time series of elbow joint angular acceleration calculated as the second derivative of angular position based on previously calculated angular velocities for two measurement configurations: "anatomical angle" and "device angle". Both signals are characterized by a high level of high-frequency noise, which is expected, since angular acceleration is the second derivative with respect to time of angular position and, therefore, amplifies the influence of video tracking errors, time-scale quantization, and marker microshifts. In intervals corresponding to static arm holding or quasi-stationary phases of movement, the angular acceleration values oscillate around zero, forming a nearly horizontal noise background without pronounced peaks, indicating the absence of active rotational acceleration in the elbow joint. During the dynamic flexion and extension phases, pronounced positive and negative peaks in angular acceleration are observed. Both curves exhibit a similar temporal structure and value synchrony, indicating consistent kinematic characteristics. Minor differences in amplitude may be due to geometric differences in the placement of the anatomical shoulder marker and the device marker, as well as local filtering effects and the accumulation of differentiation errors. Overall, the obtained results confirm that the L-CADEL v5 system accurately records elbow joint motion dynamics.

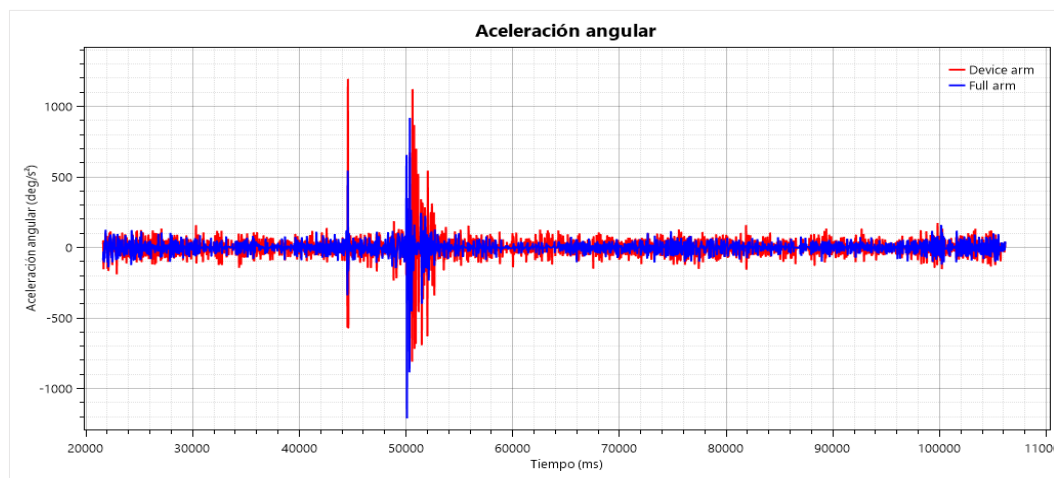


Fig. 13. Analysis of the Kinovea software of test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Angular Acceleration: Anatomical angle and Device angle.

Figure 14 shows the linear velocity time series calculated from the angular trajectories obtained using the "anatomical angle" and "device angle" marker configurations. The figure displays three repeating clusters of velocity increases/decreases, each corresponding to one complete elbow flexion–extension cycle. The structure of each cluster is stable and includes a sharp increase in velocity, reflecting the onset of the active phase of the movement, followed by a decrease in velocity corresponding to the flexion phase, with the minimum velocity recorded at full flexion. This is followed by a smooth increase in velocity, indicating the extension phase. The maximum velocity values for both angles are recorded at full arm extension. Periodically, the "device angle" values exhibit more noise and fluctuations compared to the "anatomical angle" data. This may indicate the influence of micro-movements of the L-CADEL v5 prototype parts installed on the user's arm. A comparative analysis of three consecutive flexion-extension cycles reveals a similar phase and cyclic structure of movement. The high repeatability of peak shape and amplitude across cycles confirms the stability of the movement kinematics and the reliability of this measurement method.

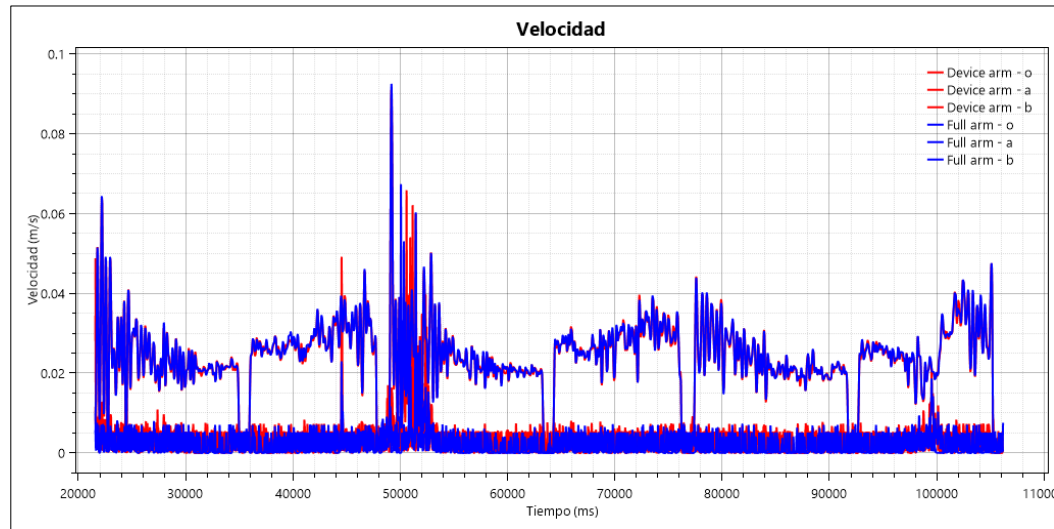


Fig. 14. Analysis of the Kinovea of the test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Velocity:
Anatomical angle and Device angle.

19

Table 3 presents the minimum and maximum values of the kinematic parameters obtained through video kinematic analysis using Kinovea software. These data were calculated based on video recordings obtained during the experimental testing of the L-CADEL v5 device and reflect the maximum values of the measured parameters during elbow flexion and extension exercises.

TABLE 3
RESULTS OF THE MAXIMUM AND MINIMUM VALUES WITH L-CADEL v.5 PROTOTYPE: KINOVEA

Components	Max	Min
Anatomical angle (degree)	158	78
Device angle (degree)	132	54
Angular velocity of Anatomical angle (deg/sec)	10	-11
Angular velocity of Device angle (deg/sec)	10	-11
Angular acceleration of the anatomical angle (deg/sec ²)	195	-168
Angular acceleration of Device angle (deg/sec ²)	186	-156
Velocity of Anatomical angle (m/s)	0.08	0
Velocity of Device angle (m/s)	0.06	0

C. AI-based system

To analyze the elbow flexion/extension exercise using the L-CADEL v5 prototype, an AI-based video analysis system was additionally employed. A platform focused primarily on sports biomechanics is used, enabling automated processing of high-quality video streams up to 4K resolution at 120 fps. The system is based on computer vision and deep learning algorithms trained on extensive datasets of annotated human body images. During the processing stage, a pose estimation model automatically identifies key anatomical landmarks (keypoints)—the shoulder, elbow, wrist, and additional upper-limb segments. This study analyzed elbow flexion/extension movements of one arm. The

algorithms use convolutional neural networks (CNNs) to localize joints in each frame, followed by temporal filtering of the trajectories to improve coordinate stability. This results in a sequence of joint coordinates over time, which is used to calculate angular motion parameters.

Figure 15 presents a sequence of five screenshots illustrating one complete cycle of the elbow flexion-extension exercise. Figure 15(a) shows the starting position: the forearm is placed on the table surface, and the elbow joint is in full extension, corresponding to the initial and final positions of the movement. Figure 15(b) depicts the intermediate phase of flexion, during which the forearm is raised upward, and the elbow angle decreases by approximately 45° relative to the starting position, demonstrating a controlled movement. Figure 15(c) captures the phase of full flexion: the forearm is as close as possible to the shoulder, which corresponds to the minimum value of the joint angle in this cycle. Next, Figure 15(d) shows the intermediate phase of extension, reflecting the gradual return of the limb to the starting position. Figure 15(e) demonstrates the completion of the cycle—full extension of the elbow joint with the forearm returning to the table surface. This series of images sequentially reflects the kinematic structure of one cycle.



Fig. 15. Snapshots of flexion-extension exercise by a volunteer for the elbow testing device L-CADEL v5 with AI analysis.

Figure 16 illustrates the comparative analysis of 2D and 3D elbow joint angles (pitch component) recorded during three consecutive cycles of elbow flexion–extension. The horizontal axis represents time (s), while the vertical axis shows the elbow angle in degrees. The blue curve corresponds to the 2D angle obtained from planar pose estimation, and the orange curve represents the reconstructed 3D angle. The figure demonstrates a cyclic pattern characteristic of controlled flexion–extension movement. Across the three cycles, the 2D elbow angle varies approximately within the range of $95\text{--}185^\circ$, while the 3D angle fluctuates within a narrower corridor of $120\text{--}185^\circ$. Each cycle consists of a gradual decrease in angle (flexion phase), reaching a minimum near $95\text{--}100^\circ$ (2D) and 120° (3D), followed by a progressive increase toward full extension, approaching $180\text{--}185^\circ$ (2D) and $180\text{--}185^\circ$ (3D). The periodicity and repeatability of the cycles indicate consistent execution of the exercise. A large amount of noise can be seen in the figure, especially in the area of maximum elbow extension. This effect is mainly due to the AI-based pose estimation system's automatic placement and tracking of virtual markers. The use of monochrome clothing, such as OptiTrack, makes it more difficult for the AI algorithm to determine joint positions accurately. Therefore, at near-full elbow extension, the system has the greatest difficulty determining the correct position of the elbow marker. Therefore, the figure shows significant noise at full extension. After the movement transitions from full extension to flexion, the angle increases, improving geometric stability and reducing sensitivity to small coordinate deviations; consequently, the noise amplitude decreases.

Comparing the two datasets, the 2D angle appears more physiologically realistic in terms of range of motion. The 2D data demonstrate a wider, more anatomically consistent range of motion during elbow flexion and extension under the testing conditions. In contrast, the 3D reconstruction shows a systematically reduced dynamic range. This difference may be due to uncertainty in depth estimation in monocular 3D reconstruction, limitations in the AI model's smoothing,

and regularization methods that stabilize spatial key points at the expense of amplitude accuracy. Thus, with controlled motion in the sagittal plane and a fixed camera orientation, 2D analysis can provide a more direct, geometrically transparent assessment of joint angle.

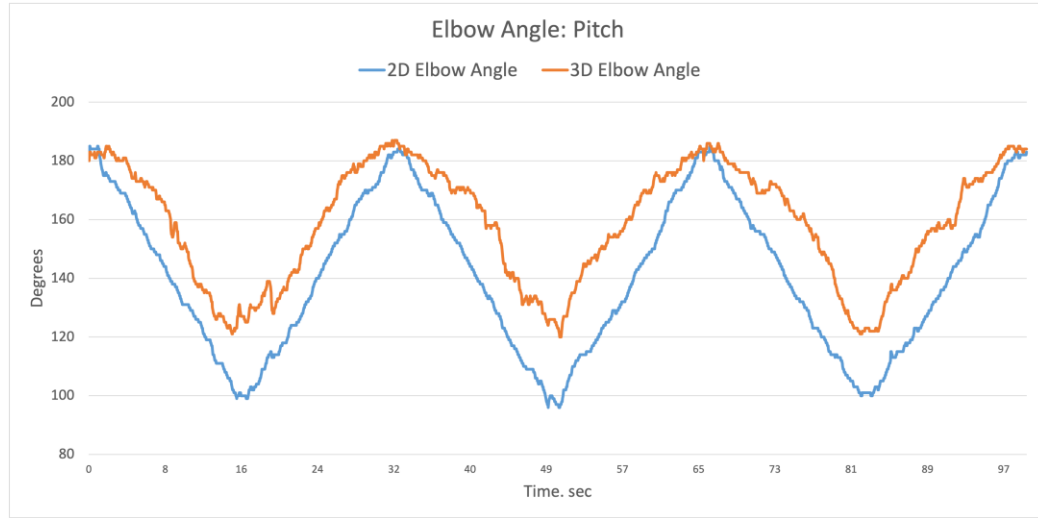


Fig. 16. Analysis of the AI of test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Pitch angle: 2D interpretation and 3D interpretation.

In 2D mode, the system calculates angles in the image plane based on joint coordinates defined in the frame's pixel coordinate system. For the elbow joint, the angle between the shoulder-elbow and elbow-wrist segments is determined using the vector product. This approach allows one to determine the flexion angle in the sagittal plane. The accuracy of the 2D method depends on camera position, distortion, and scale calibration. The elbow joint angle is calculated using the dot product formula:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|}\right) \quad (10)$$

Where Shoulder: $S(x_s, y_s)$, Elbow: $E(x_e, y_e)$, Wrist: $W(x_w, y_w)$, and the vectors are calculated using the formula:

$$\vec{u} = S - E = (x_s - x_e, y_s - y_e), \quad \vec{v} = W - E = (x_w - x_e, y_w - y_e) \quad (11)$$

In 3D mode, the system reconstructs the spatial coordinates of joints either via stereoscopic reconstruction (using multiple cameras) or via depth reconstruction models trained to estimate depth from a single video stream. The angle between segments is calculated similarly in 3D. In this case, each point corresponds to a coordinate vector of $S(x_s, y_s, z_s)$, $E(x_e, y_e, z_e)$, $W(x_w, y_w, z_w)$. Thus, using an AI video analysis system with the L-CADEL v5 prototype provides additional verification of kinematic parameters and increases the reliability of experimental results.

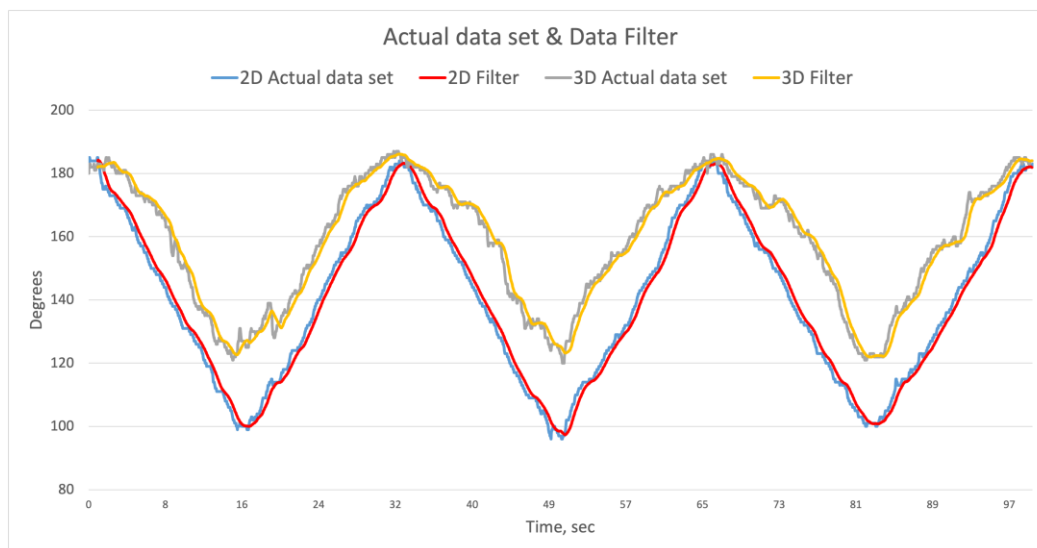


Fig. 17. Analysis of the AI of test with the L-CADEL.v5 prototype in terms of Pitch angle: 2D interpretation with Filter.

In Figure 17, a standard smoothing filter implemented in Microsoft Excel was applied to the 2D and 3D elbow angles data to reduce noise. For 2D angle, the figure shows two curves: the original signal (blue) and the filtered signal (red). The applied Filter attenuates rapid fluctuations while preserving the overall trend and periodic structure of the movement cycles. The noise reduction is particularly noticeable near the peaks corresponding to full extension, where marker instability previously caused sharp jumps. After filtering, the curve becomes smoother and the extremes more clearly defined, facilitating a more precise determination of the range, maximum, and minimum values. Thus, using a filter to smooth the signal increases the reliability of peak and range determination. It also improves comparability with data obtained from the L-CADEL v5 prototype or from motion analysis using Kinovea software.

TABLE 4
RESULTS OF THE MAXIMUM AND MINIMUM VALUES WITH L-CADEL v.5 PROTOTYPE: AI-BASED SYSTEM

Components	Max	Min
2D angle (degree)	185	95
3D angle (degree)	185	120
2D angle with Filter (degree)	183	98
3D angle with Filter (degree)	183	123

D. Range of Motion & Mean

The value range and average are calculated separately for each measurement method: L-CADEL v5 prototype sensors, video analysis in Kinovea, and the AI system. This ensures accurate data comparison. Generating a value range and an average trajectory allows for capturing a typical biomechanical movement profile and assessing exercise repeatability. In practical terms, this can improve the reliability of kinematic analysis and enable the resulting information to serve as a benchmark for subsequent exercise performance assessment or calibration of measurement systems.

The average value and a range of acceptable values are calculated in stages. In the first stage, the time scale is normalized—each recording of a single repetition is normalized to 100% of the cycle duration (0–100%), allowing accurate comparison across repetitions regardless of their actual duration. In the second stage, all obtained curves of the same type are superimposed on one another in a single coordinate system. In the next step, the min and max values are calculated for each moment, and the Average value is calculated according to the formula:

$$\text{Arithmetic Mean} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Pitch}_i}{n}, \quad \text{RMS Mean} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \text{Pitch}_i^2} \quad (12)$$

Figure 18 shows the elbow flexion-extension angle profile obtained using the inertial measurement unit (IMU) of the sensor system. The x-axis represents the normalized movement time (% of cycle), and the y-axis represents the elbow angle (degrees). The movement involves repeated cycles of elbow flexion and extension.

The red line represents the arithmetic mean, while the blue line represents the root mean square (RMS). The light orange area displays the range of minimum and maximum angle values (MIN–MAX), characterizing the variability in measurements across movement cycles.

The resulting profile demonstrates a periodic pattern of angle change corresponding to successive cycles of elbow flexion and extension. Maximum angle values are observed at approximately 180–185°, corresponding to full extension, while minimum values are around 105–110° and correspond to the maximum flexion phase. The presence of multiple repeating cycles indicates stability in movement performance throughout the experiment. The high degree of agreement between the Arithmetic Mean and RMS Mean curves indicates a low level of deviation and the absence of significant outliers in the recorded data. Minor differences between the two parameters are observed primarily in regions of extreme angle values, which may be due to sensor noise, changes in movement speed, or small variations in limb position between cycles.

The width of the MIN-MAX region varies across movement phases: the range increases primarily in the transition regions between flexion and extension, which may indicate increased variability in the movement trajectory or greater sensitivity of the inertial sensor to dynamic changes in acceleration. Overall, the results demonstrate robust recording of elbow joint kinematic parameters by the sensor system and confirm the feasibility of using an inertial sensor for quantitative motion analysis during rehabilitation.

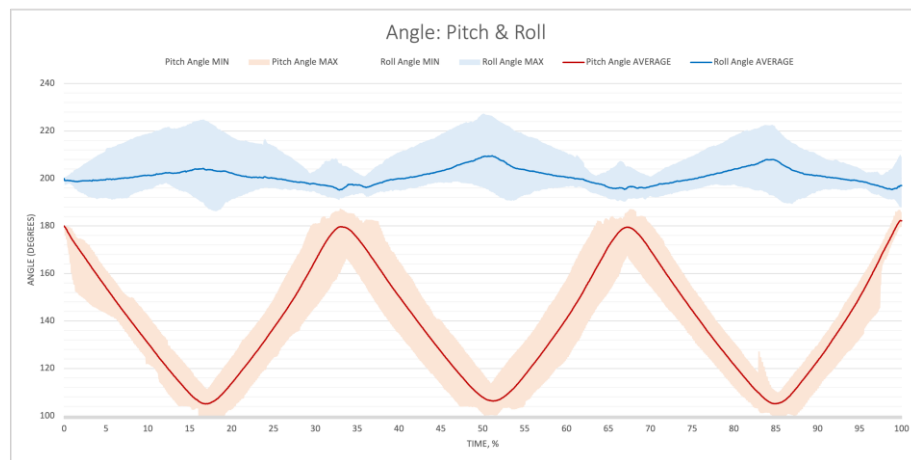


Fig. 18. Range of Motion and Mean from Sensors in terms of Pitch and Roll angles.

To further validate the sensor system data, additional elbow motion analysis was performed in Kinovea. Unlike the inertial approach, which relies on embedded sensors to record spatial orientation, video analysis enables the evaluation of kinematic motion parameters by tracking anatomical landmarks in the image. The use of Kinovea in this study aimed to obtain an independent set of measurements for comparison with the sensor system's results and to assess the consistency between different motion recording methods.

Figure 19 shows the elbow flexion-extension angle profile obtained using video analysis. The x-axis represents the normalized movement execution time (% of cycle), and the y-axis represents the angle of motion in degrees. The analysis includes several consecutive cycles of elbow flexion and extension.

The red curve represents the device average angle, while the blue curve corresponds to the arm average angle, determined from the positions of anatomical landmarks during video processing. The light orange and light blue areas represent the minimum and maximum values (MIN-MAX), reflecting the variability in measurements across repeated movement cycles.

The obtained results demonstrate a consistent periodic pattern of angular parameter changes corresponding to repeated cycles of elbow flexion and extension. The signal shape shows high repeatability across individual cycles, indicating the stability of movement performance and the reproducibility of measurement results.

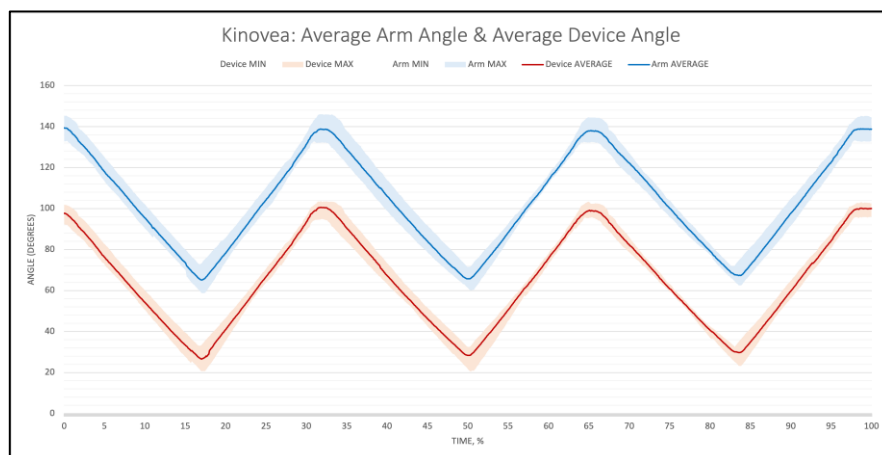


Fig. 19. Range of Motion and Mean from Kinovea software analysis in terms of Pitch angle: Anatomical angle and Device angle.

As the next step in the comparative analysis, an AI-based computer vision system was used to automatically locate joint points and calculate angular motion parameters without the use of physical markers. Unlike the sensor-based approach and semiautomated video analysis in Kinovea, this method provides fully automated data processing and allows simultaneous motion assessment in both 2D and 3D. However, in this study, the primary focus was on 2D angle analysis, as this approach demonstrated higher stability of results and better matched the comparison conditions with data obtained from the Kinovea sensor system and video analysis.

The red curve represents the average angle calculated in 2D space (2D Angle Average), and the blue curve represents the average angle in 3D space (3D Angle Average). The light orange and light blue areas represent the minimum and maximum ranges (MIN-MAX) for each measurement method.

The results demonstrate a pronounced periodic signal structure corresponding to repeated cycles of elbow flexion and extension. 2D analysis reveals a clearly defined motion profile with successive maxima and minima reflecting the transition between the flexion and extension phases. Maximum 2D angle values are approximately 150–160°, while minimum values are around 75–80°. The curve shape shows high repeatability across cycles, indicating the stability of the motion recording.

Overall, the AI-based analysis results confirm the feasibility of automatically tracking elbow joint kinematics without the use of physical markers.

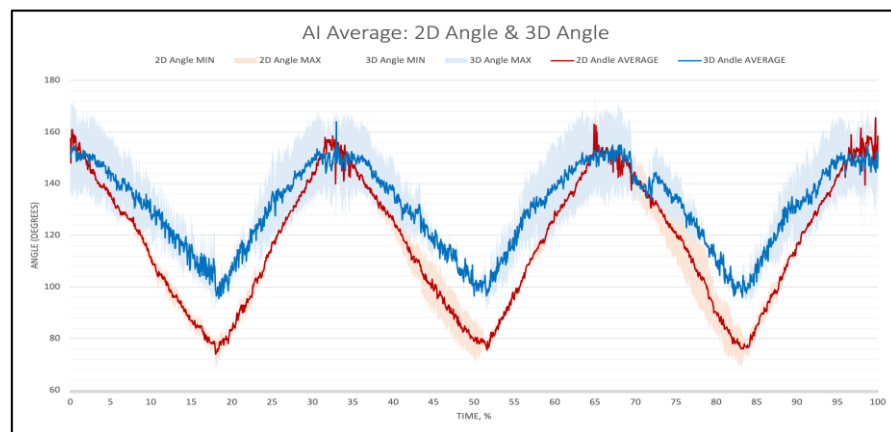


Fig. 20. Range of Motion and Mean form AI-based system in terms of Pitch angle: 2D interpretation and 3D interpretation.

The results showed that all three methods successfully captured repeated elbow flexion-extension cycles and demonstrated similar dynamics of angular parameter changes.

The IMU-based sensor system demonstrated stable real-time motion recording with low cycle-to-cycle variability, confirming the reliability of inertial sensors for monitoring rehabilitation exercises. An additional advantage of this approach is its autonomy, independence from external cameras, and the ability to be used in a home rehabilitation setting.

Video analysis using Kinovea yielded highly repeatable results and enabled reproducible assessment of motion kinematics. Despite the need for manual or semiautomated landmark determination, this method can serve as an accessible tool for comparative evaluation and data validation.

The AI-based motion analysis system provided fully automated data processing and the ability to determine motion parameters without the use of physical markers. The results showed that two-dimensional (2D) analysis was characterized by greater stability and less variability than three-dimensional (3D) analysis, making it more suitable for comparison with sensory system and video analysis results.

Despite differences in absolute angle values, all methods demonstrated a high degree of similarity in the shape of the kinematic profiles and the sequence of movement changes. Thus, the obtained results confirm the potential of L-CADEL v5 as a compact, portable, and cost-effective solution for performing elbow exercises.

IV. CONCLUSIONS

This study conducted a comprehensive evaluation of the L-CADEL v5 prototype during flexion-extension exercises. The comparative analysis included three independent measurement methods: sensor data, video analysis in Kinovea software, and an AI system. The sensor data demonstrated high stability and clearly defined cyclic dynamics corresponding to the flexion and extension phases of the elbow joint. Analysis of multiple datasets revealed a narrow range of values, indicating good repeatability of the movement and reliability of sensory registration. Calculation of the pitch angle from acceleration components showed that the device adequately reflects the primary plane of forearm motion. Video analysis in Kinovea demonstrated good agreement between the dynamics, the range of values, and the sensor data. The synchronicity of the extremes, the similarity of the amplitude, and the shape of the averaged curves confirm the correct installation of the prototype on the user's hand and minimal platform displacement during the exercise. This also demonstrates the mechanical stability of the structure and its compliance with anatomical kinematics. The consistency between the sensor data and Kinovea data provides confirmation of the prototype's validity and the appropriateness of the chosen measurement method. The AI system demonstrated the ability to correctly identify movement phases and reproduce the signal's overall cyclical structure. Despite a somewhat wider range of variability and increased noise, particularly in the 3D reconstruction, the averaged curves retained a physiologically relevant shape and were in phase with the sensory and video data. The higher variability in the AI data may be due to the specific algorithms used to detect joint points automatically.

Nevertheless, the obtained data confirm that AI analysis can be used as an additional tool for movement assessment. Of particular importance is the analysis of averaged data from more than 100 volunteers. The comparability of the dynamics and value ranges between the methods confirms the robustness and reproducibility of the prototype across a broad user population.

Thus, the L-CADEL v5 prototype demonstrated satisfactory accuracy, stability, and consistency with independent analysis methods. The device can be considered a promising tool for objectively assessing elbow joint motion, monitoring exercise technique, and for use in rehabilitation and sports programs. The obtained results confirm the feasibility of further development and implementation of the system in biomechanical analysis.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization, **MC** and **SK**; methodology, **MC**; software, **SK**; validation, **MC** and **SK**; formal analysis, **MC** and **SK**; investigation, **MC** and **SK**; resources, **MC**; data curation, **SK**; writing—original draft preparation, **MC** and **SK**; writing—review and editing, **MC** and **SK**; visualization, **SK**; supervision, **MC**; project administration, **MC**; funding acquisition, **MC**. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and was approved by the Institutional Ethics Committee of the Policlinico di Tor Vergata, Rome, under protocol code RS. 197.22 on November 15, 2022.

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: data is unavailable due to privacy restrictions linked to the volunteer of the testing activity.

Acknowledgments: The first author like to acknowledge the team of the SEPI-ESIME-Zacatenco of the National Polytechnic Institute in Mexico City for hosting him during a semester in 2025-2026 and providing frames for testing campaign. This is to acknowledge PhD scholarship funded by the DM118 program of the Italian Ministry for Research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCIAS

- [1] R. D. Zorowitz, R. Harvey, J. Stein, C. Winstein, G. Wittenberg, *Stroke Recovery and Rehabilitation*. New York, NY, USA: Demos Medical Publishing, 2014.
- [2] J. Kacprzyk, V. E. Balas, M. Ezziyyani, Eds., *Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2020)*, vol. 1417. Cham, Switzerland: Springer, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90633-7>
- [3] A. Alamdari, V. Krovi, "Robotic Physical Exercise and System (ROPES): A cable-driven robotic rehabilitation system for lower-extremity motor therapy," in *Proc. ASME 39th Mech. Robot. Conf.*, 2015, Art. no. V05AT08A032, doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2015-46393>
- [4] M. Ceccarelli, L. Ferrara, V. Petuya, "Design of a cable-driven device for elbow rehabilitation and exercise," in *Interdisciplinary Applications of Kinematics*, A. Kecskeméthy, F. Geu Flores, E. Carrera, and D. A. Elias, Eds., vol. 71. Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 61–68, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90633-7>
- [5] R. Woodward, S. Shefelbine, R. Vaidyanathan, "Pervasive motion tracking and muscle activity monitor," in *Proc. IEEE 27th Int. Symp. Comput.-Based Med. Syst.*, 2014, pp. 421–426, doi: <https://doi.org/10.1109/CBMS.2014.43>
- [6] F. Ennaïem et al., "Optimal design of a rehabilitation four cable-driven parallel robot for daily living activities," in *Advances in Service and Industrial Robotics*, S. Zeghloul, M. A. Laribi, and J. S. Sandoval Arevalo, Eds., vol. 84. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 3–12, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48989-2_1
- [7] S. Kotov, M. Ceccarelli, M. Russo, "Design problems and requirements for assisting devices," in *New Trends in Mechanism and Machine Science*, G. Rosati, A. Gasparetto, and M. Ceccarelli, Eds., vol. 165. Cham, Switzerland: Springer, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67295-8_6
- [8] M. Ceccarelli, L. Ferrara, V. Petuya, "Design of a cable-driven device for elbow rehabilitation and exercise," in *Interdisciplinary Applications of Kinematics*, A. Kecskeméthy, F. Geu Flores, E. Carrera, and D. A. Elias, Eds., vol. 71. Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 61–68, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16423-2_6
- [9] M. Ceccarelli, et al., "Design and experimental characterization of L-CADEL v2, an assistive device for elbow motion," *Sensors*, vol. 21, no. 15, Art. no. 5149, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21155149>
- [10] M. Ceccarelli, S. Kotov, E. Ofonaike, M. Russo, "Test results and considerations for design improvements of L-CADEL v.3 elbow-assisting device," *Machines*, vol. 12, no. 11, Art. no. 808, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/machines12110808>
- [11] S. Kotov, M. Ceccarelli, "Design and prototype of L-CADEL.v5 elbow assisting device," *Designs*, vol. 9, no. 6, Art. no. 126, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/designs9060126>
- [12] D. Bizhanov, N. Zhetenbayev, A. Maksut, S. Kotov, "Elbow exoskeleton for pronation-supination motion: Modeling and prototype testing," *Bull. Civil Aviat. Acad.*, 2026, doi: https://doi.org/10.53364/24138614_2026_40_1_22
- [13] H.-C. Chiu, L. Ada, "Constraint-induced movement therapy improves upper limb activity and participation in hemiplegic cerebral palsy: A systematic review," *J. Physiother.*, vol. 62, no. 3, pp. 130–137, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2016.05.013>
- [14] S. Dalla Gasperina, et al., "Review on patient-cooperative control strategies for upper-limb rehabilitation exoskeletons," *Front. Robot. AI*, vol. 8, art. no. 745018, 2021, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.745018>
- [15] D. L. Damiano, "Activity, activity, activity: Rethinking our physical therapy approach to cerebral palsy," *Phys. Ther.*, vol. 86, no. 11, pp. 1534–1540, 2006, doi: <https://doi.org/10.2522/ptj.20050397>
- [16] M. S. Demirsoy, et al., "Development of elbow rehabilitation device with iterative learning control and internet of things," *Turkish J. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 370–379, 2024, doi: <https://doi.org/10.31127/tuje.1409728>

- [17] L. Grazi, et al., “Design and experimental evaluation of a semi-passive upper-limb exoskeleton for workers with motorized tuning of assistance,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 28, no. 10, pp. 2276–2285, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3014408>
- [18] S. Grosu, et al., “Driving robotic exoskeletons using cable-based transmissions: A qualitative analysis and overview,” *Appl. Mech. Rev.*, vol. 70, no. 6, Art. no. 060801, 2018, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4042399>
- [19] A. Gupta, et al., “Developments and clinical evaluations of robotic exoskeleton technology for human upper-limb rehabilitation,” *Adv. Robot.*, vol. 34, no. 15, pp. 1023–1040, 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/01691864.2020.1749926>
- [20] Z. Kadivar, C. E. Beck, R. N. Rovekamp, M. K. O’Malley, “Single limb cable driven wearable robotic device for upper extremity movement support after traumatic brain injury,” *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.*, vol. 8, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/20556683211002448>
- [21] F. Molteni, G. Gasperini, G. Cannaviello, E. Guanziroli, “Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation: Narrative review,” *PM&R*, vol. 10, no. 9, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.06.005>

iWILL+VISER: A Blueprint for a Decision-Making Support System for Individuals and Emergency Agencies

iWILL+VISER: Un Plano para un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para Individuos y Agencias de Emergencia

Johany Negrón¹
Hecny Pérez²
Andrea Belvis³
Wynhec Ramos⁴
Verónica Díaz Pacheco⁵
Mauricio Cabrera Ríos⁶
Clara E. Isaza⁷

University of Puerto Rico,
The Applied Optimization Group, PUERTO RICO

¹ ORCID: 0009-0009-3133-5085 / negronjohany@gmail.com

Industrial Engineering Department,

² ORCID: 0009-0008-8689-6931 / hecny.perez@gmail.com

³ ORCID: 0009-0005-5729-7348 / andrea.belvis1@upr.edu

⁴ ORCID: 0009-0008-2274-3928 / wynhec.ramos@upr.edu

⁵ ORCID: 0000-0002-2582-4597 / vdiaz2@ncsu.edu

⁶ ORCID: 0000-0002-2845-7147 / mauricio.cabrera1@upr.edu

Biology Department,

⁷ ORCID: 0000-0001-5399-2566 / clara.isaza@upr.edu

<https://cientifica.site>

Recibido 15/04/2026, aceptado 30/05/2026, publicado 10/06/2026.



Abstract

In the aftermath of Hurricane Maria in 2017, Puerto Rico's vulnerability to catastrophic events highlighted the need for better preparedness and decision-making. This experience motivated the development of iWILL (Individual Wellness Inventory Level Log), a mobile application to help individuals make sound decisions during and after an emergency of such nature. The app enabled a user to: (i) monitor their wellness levels, (ii) account for loss of wellness in detrimental events and wellness gains through restorative actions, and (iii) consider three simple courses of action to follow in response to a detrimental event. Beyond the initial capabilities, it was clear that iWILL could help gather aggregated emergency information and transmit it to an information compiler to help emergency agencies allocate resources in a more precise manner. This second component was called VISER (Visual Information System for Emergencies and Resources), an online platform that offered reports of sets of iWILL users who shared information during and after a hurricane. Such integration creates a semi-dynamic feedback loop, between almost real-time challenges and precise resource allocation. The combination of iWILL+VISER holds promise as a potential tool to enhance community resilience and response efficiency during disasters in Puerto Rico.

Index terms: emergency management, decision-making, disaster relief, response efficiency, VISER, wellness level.

2

Resumen

Tras el paso del huracán María en 2017, la vulnerabilidad de Puerto Rico a eventos catastróficos destacó la necesidad de mejorar la preparación y la toma de decisiones informadas. Esta experiencia motivó el desarrollo de iWILL (por sus siglas en inglés, Individual Wellness Inventory Level Log), una aplicación móvil diseñada para ayudar a las personas a tomar decisiones acertadas durante y después de una emergencia de este tipo. La aplicación permitía al usuario: (i) monitorear sus niveles de bienestar, (ii) registrar la pérdida de bienestar durante eventos perjudiciales y las ganancias de bienestar a través de acciones restaurativas, y (iii) considerar tres cursos de acción sencillos en respuesta a estos eventos. Más allá de las capacidades iniciales, se identificó que iWILL podría facilitar la recopilación de información agregada sobre emergencias y transmitirla a un compilador de datos para ayudar a las agencias de emergencia a asignar recursos de manera más eficiente. Este segundo componente se llamó VISER (por sus siglas en inglés, Visual Information System for Emergencies and Resources), una plataforma en línea que ofrecía reportes de conjuntos de usuarios de iWILL que compartían información durante y después de un huracán. Tal integración crea un ciclo de retroalimentación semi-dinámico, que favorece que la asistencia se dirija a los usuarios según sus desafíos únicos en casi tiempo real. La combinación de iWILL+VISER promete ser una herramienta potencial para mejorar la resiliencia comunitaria y la eficiencia de la respuesta durante desastres en Puerto Rico.

Palabras clave: manejo de emergencias, toma de decisiones, ayuda en desastres, eficiencia de respuesta, VISER, bienestar.

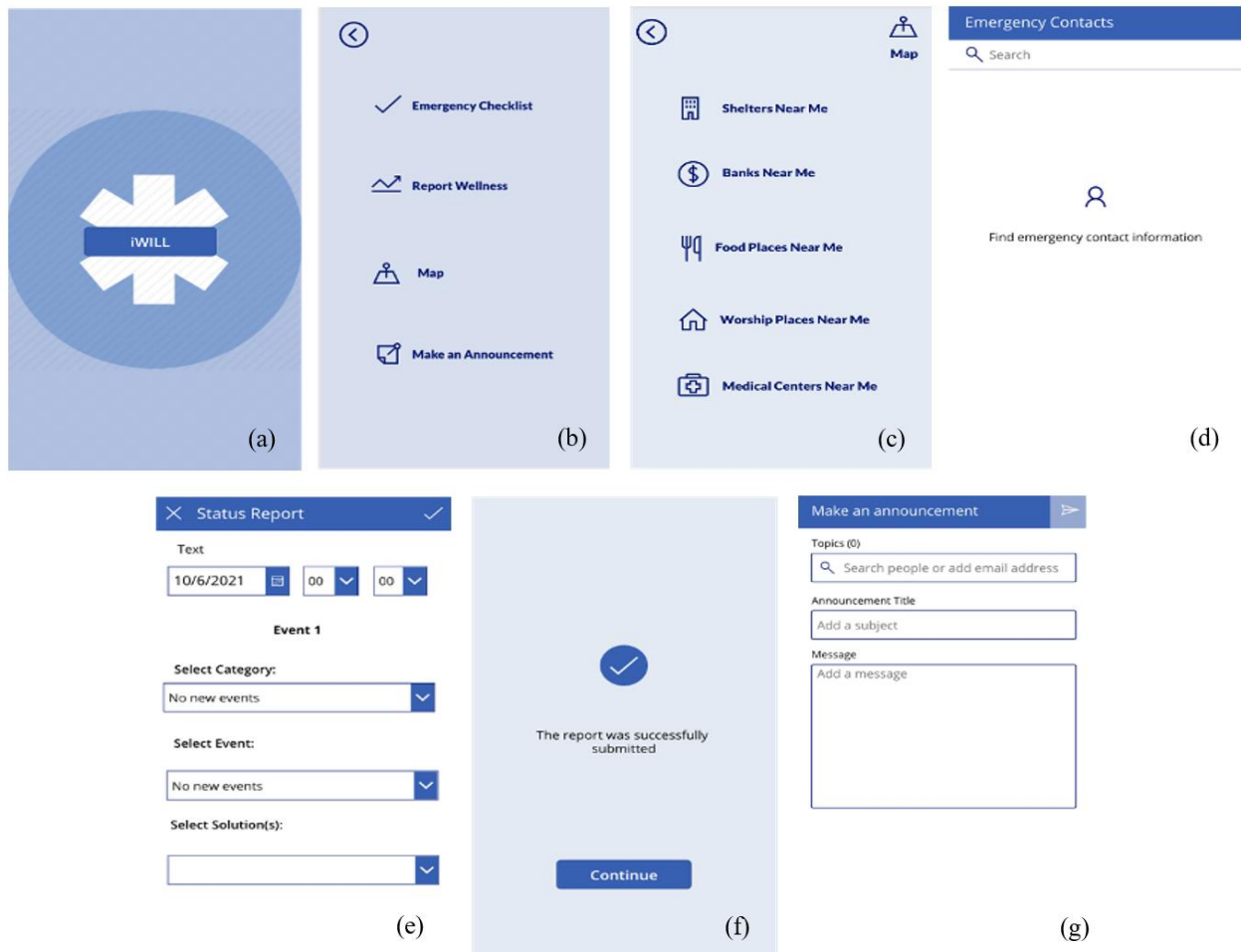
I. INTRODUCTION

On September 20th, 2017, Hurricane María devastated Puerto Rico, leading to significant challenges such as widespread shortages of food, water, supplies, and prolonged power outages [1]. The aftermath saw many residents displaced, seeking refuge in shelters, or relocating from the island [2]. The difficulties were intensified by the complex nature of decision-making in critical situations, where the right choices could mean the difference between safety and peril [3]. Moreover, while some citizens received vital assistance from the military and other relief agencies delivering essential supplies to homes or designated meeting points, a significant number remained uninformed or unable to access these crucial aids [4].

In response to this multifaceted challenge, the VISER (Visual Information System for Emergencies and Resources) project was conceived as a potential aid. By integrating the iWILL (Individual Wellness Inventory Level Log) application [6] and the VISER website, this report provides a blueprint on how to supply emergency agencies with real-time data on the number of individuals requiring critical resources, along with their general location. This information would enable the efficient allocation of resources, ensuring that the right kind of help needed per region can be delivered as soon as the opportunity becomes viable, without having to wait on the phone for hours to file a claim [5]. In essence, iWILL+VISER, at this conceptual stage, not only aims to facilitate the efficient allocation of resources but also works to enhance the decision-making capacity of individuals in crisis. This dual focus is expected to contribute to a more resilient and effective disaster relief framework for Puerto Rico.

II. iWILL

The iWILL app was envisioned as a critical decision-making tool during crises, aimed at aiding individuals in making informed choices amidst and following the impact of natural disasters. The application can be accessible both online and offline, allowing users to input their current situation, and receive personalized recommendations for actions to take. Following the selected decision, the app will calculate the individual's well-being and transmit this data to VISER. For privacy reasons, iWILL's development included an option to decide whether the user permits the application to share the information collected to aiding agencies via VISER. Fig. 1 depicts several images from the iWILL interface.



ig. 1. iWILL Application and Features: (a) iWILL Home Page, (b) Main Menu Page, (c) Map, (d) Emergency Contact Page, (e, f) Status Report Page, and (g) Make an Announcement Page [6].

The wellness level in iWILL aimed to maximize inventory levels while considering both detrimental effects, which diminish an individual's well-being, and restorative actions aimed at resolving the detrimental situation and enhancing wellness [6]. An illustration of the calculation method is shown in Fig. 2[6].

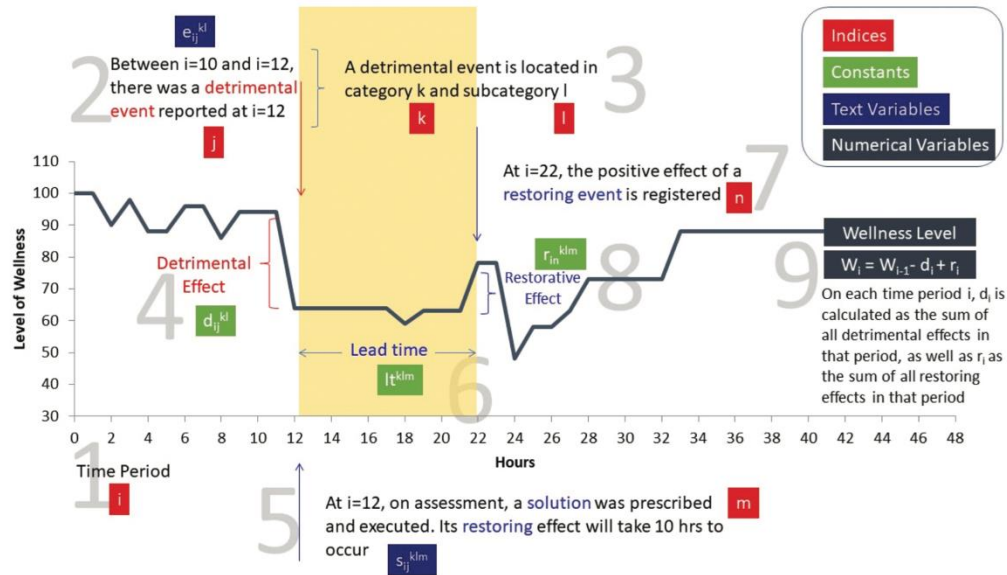


Fig. 2. Principal elements of a wellness model [6].

5

Following the paper Individual response and recovery: A learning experience from Hurricane María [6]: “This work proposes that an individual’s level of wellness during a hurricane can be seen as an inventory to be maximized. Classical inventory control models are used in manufacturing to maintain a level of inventory that minimizes production costs while meeting production demand. Using this framework for the problem at hand, a detrimental event (e.g., losing a window in your place of shelter) carries a reduction on an individual’s well-being, while working on restorative action (i.e., a solution) would carry the opposite effect. A wellness monitoring system during hurricane emergencies was envisioned so that this model could query individuals periodically—every 2 hours, for instance—to register events that occurred since the last time of query and reflect individuals’ live wellness levels. Once events were reported, the system would provide simple solutions in a prescriptive manner to help mitigate detrimental effects and restore the wellness level in the near future.”

The purpose of integrating iWILL and VISER is for the emergency agencies be able to gather aggregated information from multiple users during emergencies to assess the kind and amounts of resources needed in different geographical areas.

III. VISER

It is important to understand the distinction between the two systems, iWILL and VISER, to appreciate the scope of this idea. iWILL is a mobile phone-based app that helps each person report an emergency that occurs during and after a natural disaster. At the same time, it could work as an information channel so that emergency agencies can find out the emergencies that occur after the event. VISER, on the other hand, is a webpage where emergency agencies can go to monitor the emergencies reported by users.

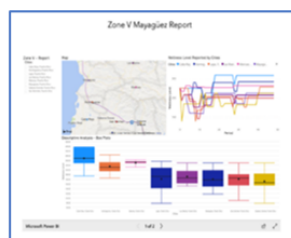
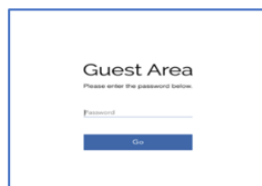
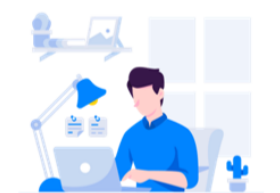
Poor preparation and decision-making by residents and emergency agencies during and after Hurricane Maria was a key observation to this idea. People who benefit from the iWILL app may make better decisions; while emergency agencies can benefit from VISER to better plan resources and be more effective in delivering them to residents, helping to improve the effectiveness of their services, perhaps even in longer terms. A year after the hurricane, a quarter of Puerto Ricans reported that their lives remained disrupted, with 26% experiencing post-traumatic stress and facing financial difficulties [2]. One study even found that 7.2% of students reported “clinically significant” symptoms of PTSD [8]. Unfortunately, “stress neurophysiologically affects the ability to make decisions effectively”, which could make a difference in these situations [3]. The idea is to provide emergency agencies, such as FEMA and AEMEAD, and support organizations with access to VISER so that they can also better plan their resources allocation.

IV. MATERIALS/METHODS

Methodology: In January 2021 a group of 540 individuals completed the survey: Individual Response and Recovery: A Learning Experience from Hurricane María [6]. The purpose of the survey was to collect information of the individuals’ actions and decision-making before, during, and after Hurricane María in 2017 [7]. Questions covered aspects like preparation, primary source of information, mental and physical health, family/friends’ health, pets, and more. The results led to the analysis of the respondents’ wellness.

The proposed methodology for aiding individuals during emergencies involved the development of the iWILL application using the Power Apps platform. The process included making the application available to emergency agencies and users. Users would access the app to report emergencies or seek guidance. The user-generated reports are then transferred to Excel Online on a cloud platform. In the Power Apps settings, the format for output should be changed in connections, and the Excel document must be on the cloud. Later, the Excel link is passed on to Power BI. Finally, Power BI will pass all the information to the online website called VISER, created in WIX platform, which makes responses available to agencies

For example, FEMA makes the decision to help people who live in Puerto Rico after a storm warning for the Island. After the storm, the agency assigns Joseph, one of the FEMA agents, to monitor the emergencies that occur in the southwest area of Puerto Rico. Joseph decides to enter the VISER platform to learn about the events reported by people in this region. Fig. 3 presents the steps that Joseph used to learn the emergencies reported in the southwest region.



1. Joseph enters to VISER platform.



2. The VISER Platform has a menu with three sections: Home, About Us and Emergency Reports. To see the reports, Joseph chooses Emergency Report section.



3. Then, the website requests a password to access to the report.



4. After the access, Joseph selects the zone of interest. In this case, he selected Zone V – Mayagüez.



5. Finally, VISER presents the report of emergencies by the people who live in the Southwest Area. The report contains two pages. The first page presents the collective wellness level of people that live in the cities located in southwest area. It also presents a statistical summary of wellness level of people by cities.

The second page presents graphs that show the events reported by cities and the solutions that people chose. Also, it presents the statistical summaries of the events reported by cities. With this information, Joseph can create a plan to help the people with a critical wellness level and the cities with most events reported, allocating better the resources. In the case of Aria, Joseph can call the agents to help to clean the blocked road in Mayagüez.

Fig. 3. Schematic of the dynamics between iWILL and VISER from an emergency agency point of view.

Materials: Power Apps [9], Excel Online [10], Power BI [11], and WIX [12] are the key to the function of iWILL and VISER (see Fig. 4). The iWILL app prototype was developed on the Power Apps Platform. The information obtained by this app will be stored in Excel Online. The VISER prototype was created on the WIX Platform. The reports generated by VISER would be automatically created in Power Apps, utilizing the information stored in Excel Online.

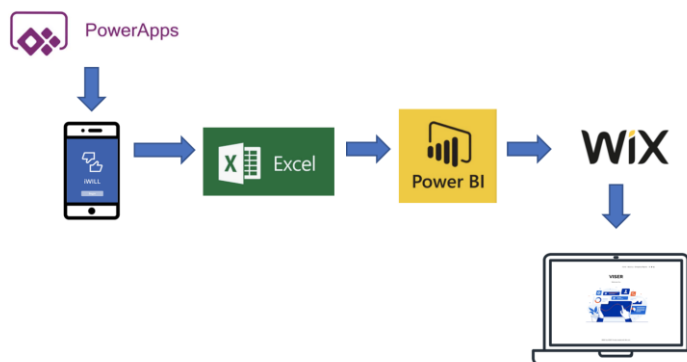


Fig. 4. Information Flow between iWILL and VISER.

The proposed connection between iWILL and VISER through Power BI aims to establish seamless collaboration. In its prototype, the VISER platform comprises various sections accessible to the public, including Home, About Us, and Emergency Reports. Fig. 5 and Fig. 6 offer a glimpse into the Homepage and About Us sections, respectively, providing insight into VISER's mission and the dedicated individuals behind it. Notably, the Emergency Reports section, vital for comprehensive disaster management, requires a password for access. Fig. 7 illustrates the prompt users encounter when attempting to enter this protected section.

V. PRELIMINARY RESULTS AND DISCUSSIONS

Gravimetric results showed that the wear rate decreases with increasing temperature, moreover slight increase in hardness was observed on the surface of the specimens as the temperature increases in the tests. This behavior is attributed to the softening of stainless steel at high temperatures, which promotes plastic deformation and reduces material removal.



Fig. 5. Homepage of Viser [13].

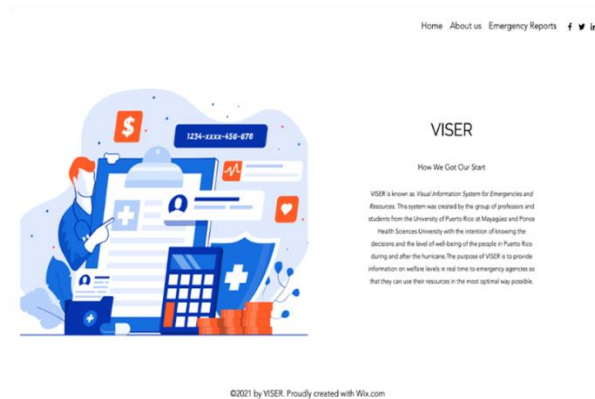


Fig. 6. About Us section [14].

Guest Area

Please enter the password below.

Password

Go

Fig. 7. Password request page to Emergency Report section.

Within Emergency Reports, users will select one of twelve emergency management zones on the island (See Fig. 8). The idea of zone divisions was inspired by Puerto Rico State Agency for Emergency and Disaster Management (AEMEAD) contact map (See Fig. 9). The purpose of dividing it per zone is to present a report about the events and solutions during and after a hurricane reported by the iWILL application.

9

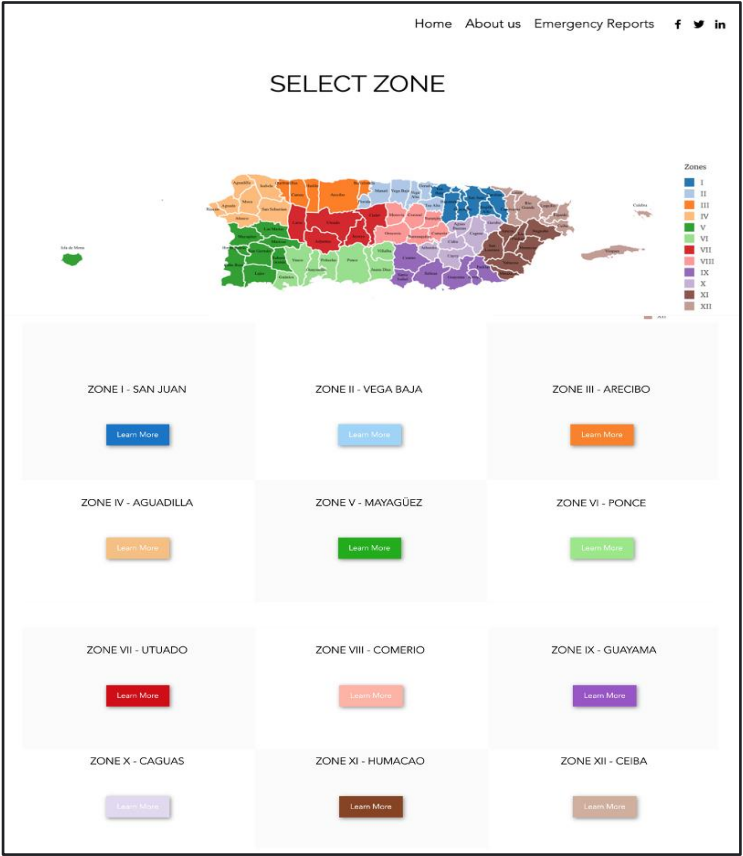


Fig. 8. Emergency Report section.



Fig. 9. Puerto Rico State Agency for Emergency and Disaster Management Contact Map [15].

10

Although data directly from the iWILL app is not currently available, a Power BI demo report provides a visual representation of how official reports may appear (see Fig. 10 and Fig. 11). This demo utilizes extracted data from Microsoft Excel expecting this to be a representation of the connection to iWILL. Showcased on Fig. 10 is a map of reported events and the well-being levels of users during and after Hurricane María, complemented by boxplots illustrating well-being variations across different towns. Additionally, Fig. 11 features a pie chart displaying the number of reported events, a histogram outlining reported solutions, and a descriptive statistical summary of well-being levels in each town. This structured approach to data presentation aids in comprehending the impact of events, fostering efficient response strategies and community resilience. These visualizations and data representations are part of the conceptual stage, with no operational system in place.

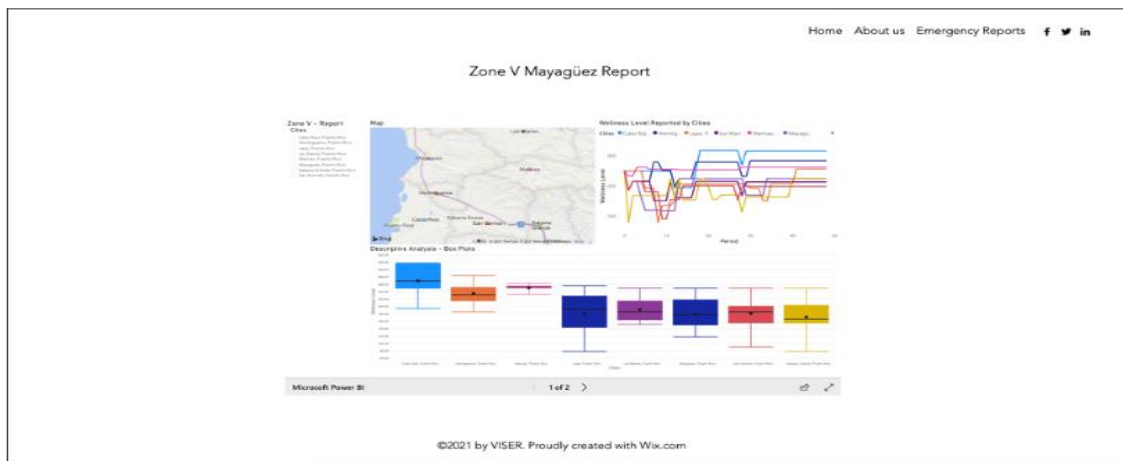


Fig. 10. Demo map of reported events and the well-being levels of users during and after Hurricane María.



11

As part of a potential expansion plan, a concise system could be integrated into the iWILL app, allowing essential business owners to submit relevant information regarding available and required inventory before, during, and after a natural disaster. By partnering with local businesses and relevant authorities, iWILL would ensure that users can quickly access critical services closest to them, saving valuable time during emergencies —where moments could mean the difference between safety and danger. This collaboration would also enable real-time updates on resource availability, ensuring a seamless experience for users when they need it most. Table 1 shows examples of businesses and how they can assist the community through the data compiled in VISER.

TABLE 1
PROPOSED APPROACH

Business	Method
Supermarket	Supermarket owners will be able to access the platform to share information about the remaining inventory of essential items (e.g., bottled water, canned food, batteries, among others).
Gas station	Gas station owners will be able to provide immediate updates on their remaining gasoline reserves. This would help reduce long lines of citizens seeking gasoline for generators and enable them to locate the nearest available gas station.
Pharmacy	Pharmacy owners will be able to provide information on perishable medications (e.g., insulin), allowing citizens experiencing power outages to find the nearest pharmacy with the required medication, thereby reducing the time spent searching for these necessities.

VII. ENVIRONMENTAL HEALTH SETTINGS: ANOTHER POSSIBILITY

An integration such as described here can be used for educational or training purposes, academic programs focused on public health or emergency management, as well as local and governmental agencies responsible for providing aid during these times. The offline version capabilities of the app would be highly valuable. During extreme weather events, power outages, and unstable internet connections can disrupt information sharing between different agencies. The ability to collect data offline reduces the risk of information being lost during online entry, ensures communities with limited connectivity are not excluded from representation, and local storage of information until synchronization becomes possible can help protect sensitive information. Providing access to this technology to students would create valuable on-the-ground experiences. Students can assist as data collectors during shelter assessments or community evaluations while helping to address workforce shortages. This approach supports collecting real-time situational conditions, data that can improve public health interventions, enhance surveillance systems, reduce risk inaccuracies associated with outdated information, and ultimately contribute to more reliable systems.

A more robust implementation of the platform, such as integrating real-time environmental data streams into the iWILL and VISER system, would significantly strengthen public health response during and after extreme weather events. By pairing user-submitted information from iWILL with live environmental monitoring data—such as air quality indices, flood gauge readings, storm tracking, and water contamination alerts—public health agencies could obtain a layered, geographical view of risk. Through VISER, agencies responsible for emergency response would be able to visualize both citizen-reported emergencies and environmental hazard indicators in a single dashboard. This integration would allow officials to identify emerging hotspots, prioritize areas with compounded risks, and deploy resources proactively to protect vulnerable populations such as children, the elderly, and individuals with chronic health conditions. In addition, implementing exposure assessment and risk prioritization within iWILL would enhance early detection of health risks. When users report specific hazards such as flooding, chemical odors, or infrastructure damage, the app could trigger structured follow-up questions to assess potential exposures, including contaminated drinking water, sewage backup, or injury. These responses could be analyzed using a simple risk-scoring algorithm that flags high-priority cases for immediate review on VISER. This approach would enable public health agencies to conduct a needs assessment remotely, allocate limited response teams more efficiently, and mitigate health impacts before they escalate into larger outbreaks or environmental health crises.

VIII. CONCLUSION AND FUTURES WORK

This work highlights the proposed integration between the iWILL App and VISER platforms. The transition of iWILL from internal storage to an external source like Microsoft Excel Online enables the sharing of application results externally. This implementation should allow agencies to access statistical analyses of areas most impacted and in need of assistance. The integration of Google Maps stands out as a pivotal addition to iWILL, enhancing its ability to pinpoint users' approximate locations and effectively allocate resources within the community. These features hold promise in improving response efforts during critical situations.

Looking ahead, future enhancements to iWILL are poised to include the integration of social media. For instance, incorporating social platforms into the "Make an Announcement" feature can extend the reach to individuals beyond immediate geographic locations, fostering a broader sense of community support and collaboration [18]. Moreover, upcoming steps involve conducting real-world tests of the application to observe actual data flowing through the VISER process. This practical approach will enable the collection of authentic case data, refining the system's responsiveness and adaptability to diverse disaster scenarios. By bridging technological innovation with community engagement, iWILL+VISER aim to create a resilient framework that not only responds effectively to disasters but also promotes proactive collaboration and resource allocation for a more prepared and connected society.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Methodology: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Investigation: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Writing-original draft preparation: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Writing-review and editing: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Supervision: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**; Formal analysis: **JN, HP, AB, WR, VD, MC, CEI**.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: This research was performed under an appointment to the US Department of Homeland Security (DHS) Science & Technology Directorate Office of University Programs Summer Research Team Program for Minority Serving Institutions, administered by the Oak Ridge Institute for Science and Education (ORISE) through an interagency agreement between the US Department of Energy (DOE) and DHS. ORISE is managed by Oak Ridge Associated Universities (ORAU) under DOE contract number DE-SC0014664. All opinions expressed in this article are the author's and do not necessarily reflect the policies and views of DHS, DOE, or ORAU/ORISE. Also, we would like to express our most sincere gratitude to Frederick González, Miriam Betancourt, Frances Morales, Linda Rivas, Elena Vargas, Dr. Cristina Pomales, Dr. Robert Whalin, MS Thomas Richardson, and Mr. Javier Gonzalez for their assistance, participation, and useful critique in this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCIAS

13

- [1] “Hurricane Maria,” CNN. [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/specials/weather/hurricane-maria>
- [2] Estudios Técnicos Inc., “Estudio post huracán María de Estudios Técnicos, Inc. se destaca en prestigiosa convención de investigadores,” *Perspectivas*, vol. 26, no. 5, May 2019. [Online]. Available: <https://www.estudios tecnicos.com/pdf/perspectivas/2019/mayo2019.pdf>
- [3] L. P. Cote-Rangel, A. M. García-Becerra, “Estrés como factor limitante en el proceso de toma de decisiones: una revisión desde las diferencias de género,” *Av. Psicol. Latinoam.*, vol. 34, no. 1, pp. 19–28, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.12804/apl34.1.2016.02>
- [4] L. M. Quintero, “El Inspector General de Estados Unidos confirma mal manejo de FEMA tras el huracán María,” *El Nuevo Día*, Sep. 20, 2020. [Online]. Available: <https://www.elnuevodia.com/noticias/gobierno/notas/el-inspector-general-de-estados-unidos-confirma-mal-manejo-de-fema-tras-el-huracan-maria/>
- [5] “Teléfonos de emergencia ante desastres naturales,” *El Nuevo Día*, 2017. [Online]. Available: <https://huracanmaria.elnuevodia.com/2017/ayudas/telefonos/>
- [6] V. Díaz-Pacheco, et al., “Individual response and recovery: A learning experience from Hurricane María,” *J. Emerg. Manag.*, vol. 19, no. 8, 2021, doi: <https://doi.org/10.5055/jem.0548> [wmp LLC.org]
- [7] D. A. Farber, “Response and recovery after Maria: Lessons for disaster law and policy,” *Rev. Jur. Univ. P. R.*, vol. 87, no. 3, pp. 743–771, 2018. [Online]. Available: <https://derecho.uprrp.edu/revistajuridica/wp-content/uploads/sites/4/2018/06/04-Disaster-law-and-policy-1.pdf> [derecho.uprrp.edu]
- [8] C. Heredia Rodríguez, “El legado de María: estudiantes en Puerto Rico sufren de estrés post traumático,” Kaiser Family Foundation, Apr. 26, 2019. [Online]. Available: <https://khn.org/news/el-legado-de-maria-estudiantes-en-puerto-rico-sufren-de-estres-post-traumatico/>
- [9] Microsoft, “Power Apps,” 2024. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-apps>
- [10] Microsoft, “Excel Online,” 2024. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/es/microsoft-365/excel?market=pr>
- [11] Microsoft, “Power BI,” 2024. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi>
- [12] “WIX website builder,” 2024. [Online]. Available: <https://www.wix.com/>

- [13] D. Vujic, “Analysis, data, database illustration,” Iconfinder. [Online]. Available:
https://www.iconfinder.com/icons/5206309/analysis_data_database_document_format_sheet_icon
- [14] D. Vujic, “Health, insurance, medicine illustration,” Iconfinder. [Online]. Available:
https://www.iconfinder.com/icons/5206318/health_insurance_medicine_protection_safe_security_icon
- [15] “Manejo de Emergencias,” Gobierno de Puerto Rico. [Online]. Available:
<https://manejodeemergencias.pr.gov/>
- [16] DHS, “FEMA’s longstanding IT deficiencies hindered 2017 response and recovery operations,” Department of Homeland Security, Aug. 27, 2019. [Online]. Available:
<https://www.oig.dhs.gov/sites/default/files/assets/2019-08/OIG-19-58-Aug19.pdf> [Accessed: Jun. 3, 2026].
- [17] J. Rivera, “A content analysis on the phases of emergency management for Hurricane Maria in Puerto Rico,” Pegasus Rev.: UCF Undergrad. Res. J., vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 2019. [Online]. Available:
<https://stars.library.ucf.edu/urj/vol11/iss1/2/>
- [18] A. Mangones, “Social media in disasters,” PrepareCenter, Jan. 7, 2015. [Online]. Available:
<https://preparecenter.org/topic/social-media-disasters/>

Detección y mitigación de ataques *evil twin* en redes inalámbricas: una revisión sistemática de la literatura

Detection and Mitigation of Evil Twin Attacks in Wireless Networks:
A Systematic Literature Review

Andres **Santacruz Menendez** ¹

Joel **Caguasango León** ²

Martha **Sevilla Abarca** ³

Universidad Técnica de Ambato,
Facultad de Ingeniería en Sistemas,
Electrónica e Industrial,
Ambato, ECUADOR

¹ ORCID: 0009-0001-0389-499X / dsantacruz9748@uta.edu.ec

² ORCID: 0009-0002-1080-2771 / acaguasango8805@uta.edu.ec

³ ORCID: 0000-0002-3928-4085 / marthaesevilla@uta.edu.ec

<https://cientifica.site>

Recibido 20/04/2026, aceptado 05/06/2026, publicado 12/06/2026.



Resumen

La expansión de dispositivos IoT y redes inalámbricas ha aumentado significativamente la susceptibilidad a los ataques de suplantación de puntos de acceso, también llamados Evil Twin (ET). Este artículo ofrece un análisis sistemático de la literatura con el propósito de evaluar el estado actual en cuanto a la detección y minimización de esta amenaza. Las arquitecturas de defensa actuales fueron clasificadas mediante un estudio detallado de 30 investigaciones primarias. Los hallazgos muestran que el 73.33% de las propuestas se centran en la alta precisión algorítmica a través de la Inteligencia Artificial, sobrepasando con frecuencia el 95% de exactitud. No obstante, se detectaron brechas tecnológicas importantes: el 36.67% de las soluciones todavía produce falsos positivos a causa de cambios en el entorno físico (RSSI) y un 33.33% está supeditado a hardware adicional. Se concluye que el desarrollo futuro exige arquitecturas híbridas, autoadaptables y enfoques del lado del cliente (Client-side) para garantizar una latencia viable en estándares emergentes.

Palabras clave: ciberseguridad, evil twin, machine learning, redes inalámbricas, revisión sistemática, WI-FI.

2

Abstract

The proliferation of wireless networks and IoT devices has critically increased vulnerability to access point spoofing attacks, known as Evil Twin (ET). This paper presents a systematic literature review aimed at evaluating the state-of-the-art in detecting and mitigating this threat. Through a rigorous analysis of 30 primary studies, current defense architectures were categorized. The results reveal that 73.33% of the proposals prioritize high algorithmic precision through Artificial Intelligence, frequently exceeding 95% accuracy. However, critical technological gaps were identified: 36.67% of the solutions still generate false positives due to physical environment fluctuations (RSSI), and 33.33% rely on additional hardware. It is concluded that future development demands hybrid, self-adaptive architectures and Client-side approaches to guarantee viable latency in emerging standards.

Index terms: cybersecurity, evil twin, machine learning, wireless networks, systematic review, Wi-Fi.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la ubicuidad de las redes de área local inalámbricas (WLAN) bajo el estándar IEEE 802.11 ha transformado la conectividad global en entornos públicos, industriales y domésticos. No obstante, esta expansión ha incrementado la superficie de ataque, posicionando a la infraestructura inalámbrica como el primer objetivo de intrusión para ciberadversarios. Entre las amenazas más críticas se encuentra el ataque de punto de acceso malicioso o *Evil Twin* (ET), el cual se fundamenta en la suplantación de un nodo legítimo mediante la clonación de su identificador de conjunto de servicios (SSID) y dirección MAC [11], [19]. A través de esta técnica, el atacante establece una posición de *Man-in-the-Middle* (MitM) que le permite interceptar tráfico sensible y ejecutar la recolección de credenciales mediante portales cautivos fraudulentos [3], [25].

Investigaciones recientes sugieren que, a pesar de la implementación del estándar *Wi-Fi Protected Access 3* (WPA3) y el uso de tramas de gestión protegidas (802.11w), el ataque *Evil Twin* (ET) sigue siendo efectivo mediante el forzado de roaming silencioso [4] y ataques de desautenticación en dispositivos legados [21]. El estado del arte actual presenta una polarización en las estrategias de defensa: por un lado, se proponen soluciones basadas en el análisis de parámetros temporales como el *Round-Trip Time* (RTT) y la carga de tráfico [1]; por otro, emerge con fuerza el uso de inteligencia artificial mediante modelos de *k-Nearest Neighbors* (KNN) y *Random Forest* para clasificar anomalías en la fuerza de la señal (RSSI) y huellas digitales de radiofrecuencia [13], [18], [22].

El problema fundamental radica en la confianza implícita de los dispositivos cliente hacia los parámetros de las capas física (PHY) y de enlace, los cuales carecen de mecanismos de autenticación mutua robustos en redes abiertas o con configuraciones WPA2 deficientes. Aunque existen propuestas de detección basadas en *software* distribuido [6] y protocolos de baja latencia como SAP [26], la implementación masiva de estas soluciones se ve limitada por la sobrecarga computacional y la heterogeneidad de los dispositivos IoT. Esto plantea la siguiente interrogante de investigación: ¿cuáles son los métodos de detección y mitigación de ataques *Evil Twin* más eficaces y escalables documentados en la literatura científica entre 2021 y 2026?

El propósito de este trabajo es realizar una revisión sistemática de la literatura (SLR) bajo la metodología PRISMA 2020 para sintetizar y evaluar críticamente las tendencias tecnológicas en la detección de puntos de acceso fraudulentos. Mediante el análisis de 30 estudios de alto impacto, esta investigación busca identificar las métricas de rendimiento más precisas y las herramientas de *hardware* libre (ej. Raspberry Pi, NodeMCU) que facilitan el despliegue de sistemas de detección de intrusiones inalámbricas (WIDS) en redes contemporáneas, considerando un periodo de estudio comprendido entre 2021 y 2026 [2], [14], [20].

II. METODOLOGÍA

La investigación se define como documental y descriptiva, con un enfoque cualitativo orientado al análisis de seguridad en redes inalámbricas [13]. Se implementó una revisión sistemática de literatura (SLR) bajo los estándares de la declaración PRISMA 2020 [31], asegurando así que el estudio sea transparente y sea replicable. Las etapas jerárquicas que se describen a continuación fueron la estructura del desarrollo de la investigación.

A. Experimental test rig

Esta fase implicó la definición del área de estudio y el establecimiento de las herramientas para recuperar información técnica en bases de datos con un alto impacto. Se planteó la pregunta: ¿qué formas de detectar ataques Evil Twin son las más escalables y eficaces, según lo documentado durante el periodo 2021-2026? Para encontrar la respuesta, se eligieron los repositorios Google Scholar e IEEE Xplore.

1) Cadena de búsqueda y depuración inicial

Para optimizar la sensibilidad de los resultados, se diseñó una cadena de búsqueda compleja: ((“Evil Twin” OR “Rogue Access Point”) AND (“Detection” OR “Mitigation”) AND (“WLAN” OR “Wi-Fi security”)). Esta etapa produjo un total de 60 registros iniciales. Tras la comparación de metadatos, se suprimieron 7 artículos duplicados, resultando en 53 estudios únicos para la fase de evaluación.

B. Criterios de selección y proceso de cribado

Se llevaron a cabo filtros sucesivos basados en la relevancia temática y la calidad técnica para perfeccionar la muestra y garantizar que únicamente artículos rigurosos desde el punto de vista experimental se incluyeran en el análisis. Para ello, se establecieron criterios de inclusión específicos: 1) Estudios primarios empíricos publicados entre 2021 y 2026; 2) Investigaciones que propongan arquitecturas o métodos directos de detección/mitigación de ataques Evil Twin en redes WLAN; y 3) Disponibilidad de texto completo en inglés o español. Por otro lado, los criterios de exclusión contemplaron: 1) Estudios secundarios o teóricos sin validación experimental; 2) Entornos de red no aplicables o enfocados exclusivamente en IoT sin contexto WLAN; y 3) Propuestas con un nivel de generalidad excesivo.

Para la evaluación de calidad y riesgo de sesgo, se priorizó la inclusión de artículos revisados por pares en bases de datos de alto impacto, garantizando que todos los estudios seleccionados presentaran métricas de rendimiento comprobables.

1) Fases de exclusión y muestra técnica final

El proceso de selección operó bajo una dinámica de revisión independiente. Los metadatos de los 53 estudios únicos fueron importados a la herramienta colaborativa Rayyan para un cribado estructurado. Durante esta fase inicial, dos revisores independientes leyeron los resúmenes y títulos, tras lo cual se eliminaron cinco registros; de esos, dos eran sobre temas no relacionados con el objetivo de investigación y tres eran estudios secundarios (revisiones). Cualquier discrepancia en los criterios de inclusión fue resuelta mediante debate y consenso directo entre ambos investigadores.

Más tarde, de los 48 informes que quedaban, se eliminaron 4 porque no había acceso al archivo PDF completo. Durante la etapa de idoneidad, se revisaron 44 artículos completos y se descartaron 14 registros por razones técnicas concretas fundamentadas en los criterios de exclusión: 6 por tratarse de entornos de red no relevantes, 4 por centrarse únicamente en IoT, 2 porque no tratan el ataque directamente y 2 debido a que sus propuestas son demasiado generales. Por último, se estableció una selección técnica de 30 artículos (consulte la Fig. 1)

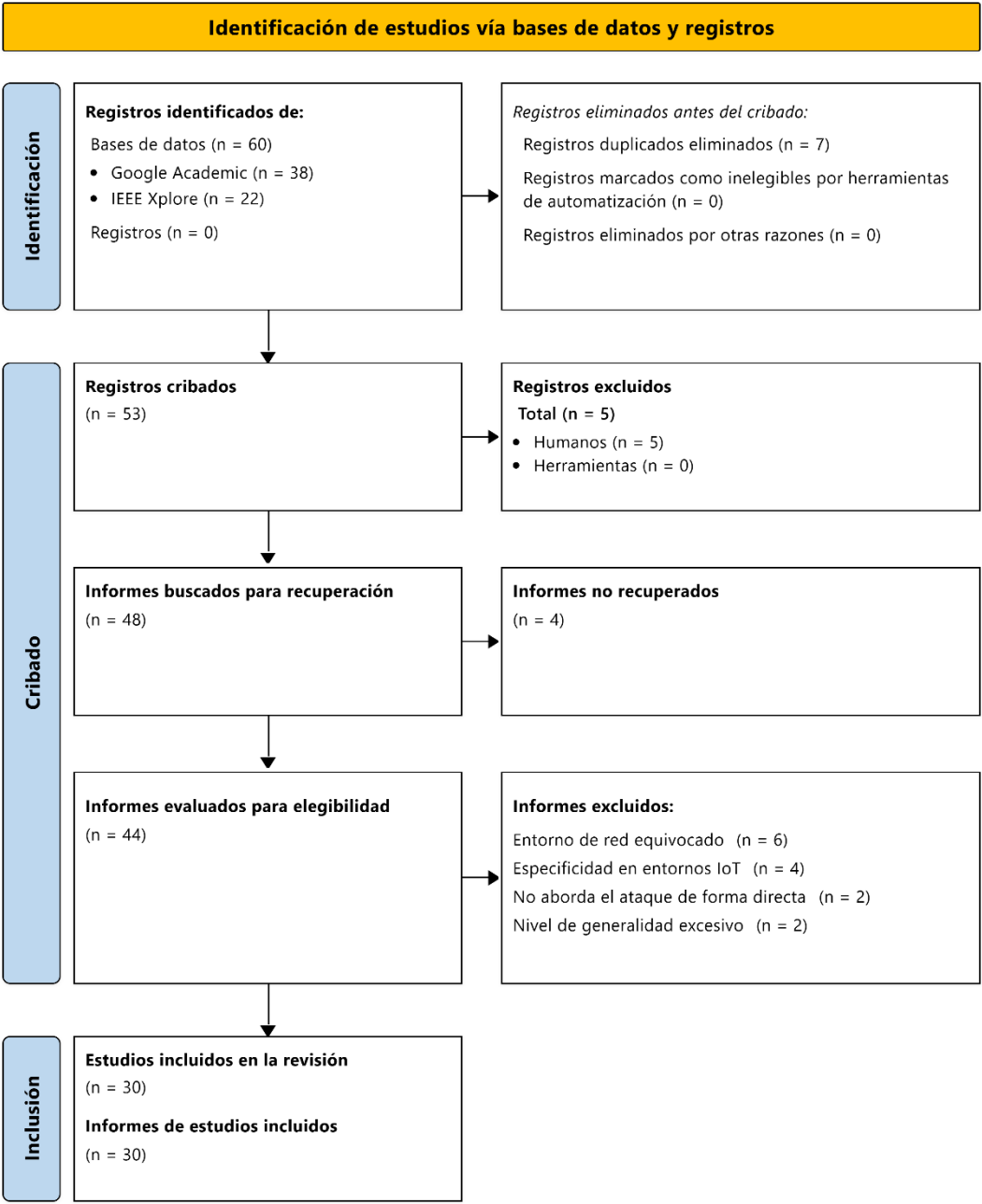


Fig. 1. Diagrama de flujo PRISMA para la selección de estudios.

2) Extracción y clasificación de la información

Para sistematizar la información de la muestra técnica final, se diseñó una matriz de extracción de datos estandarizada. De cada uno de los 30 artículos se extrajeron las siguientes variables: autor(es) y año de publicación, país o región de origen de la propuesta empírica, técnica principal implementada, y los resultados o aportes clave reportados. Posteriormente, para facilitar la síntesis temática, la información extraída fue clasificada en tres categorías funcionales de defensa: 1) Detección en el Lado del Cliente (Client-side); 2) Inteligencia Artificial y Machine Learning; y 3) Monitoreo de Red, WIDS y Auditoría de Protocolos.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados logrados después del análisis sistemático de la bibliografía que se considera relevante para identificar y reducir ataques Evil Twin se muestran a continuación. Se percibe un aumento en las investigaciones publicadas entre 2023 y 2024 en la totalidad de la muestra seleccionada (30 publicaciones científicas), lo que se relaciona con el cambio global hacia la norma de seguridad WPA3 y el crecimiento de redes IoT. Además, la mayor parte de sugerencias experimentales viene de las zonas de Europa y Asia, resaltando el progreso de algoritmos de detección en el borde de la red. La Tabla 1 presenta la base empírica de esta revisión y muestra todos los artículos examinados, además de sus autores, el enfoque metodológico utilizada y la principal métrica de éxito reportada.

TABLA 1
PUBLICACIONES LITERARIAS SELECCIONADAS (MUESTRA TOTAL).

Núm.	Título de la investigación	Autor(es) y Año	País o Región	Técnica Principal	Resultados y Aportes Clave
1	<i>A Client-Side Evil-Twin Attack Detection System, [1]</i>	Ueda, T. et al. (2023)	Alemania	RTT (Tiempo de ida y vuelta) con umbral adaptativo.	Mejora de los criterios de detección asumiendo la congestión de la red.
2	<i>A Lightweight Frame-Based Wireless Intrusion..., [2]</i>	S. M. et al. (2026)	No especificado	Análisis a nivel de tramas MAC, variaciones de señal) sin ML.	Precisión >97% y latencia <1s; ideal para dispositivos IoT.
3	<i>A New Approach to Disabling SSL/TLS, [3]</i>	Kimura, K. et al. (2023)	Japón	Explotación de portal cautivo y redirección a motores falsos.	Anulación exitosa de SSL/TLS y HSTS sin alertas al usuario.
4	<i>Evil Twin MiTM through 802.11v protocol..., [4]</i>	Louca, C. et al. (2023)	Chipre	Explotación de tramas BSS Transition Management (802.11v).	Forzado de roaming silencioso independiente de la potencia de señal.
5	<i>A Robust Certificate Management System..., [5]</i>	Daldoul, Y. et al. (2020)	Túnez e Indonesia	RCMS y Autenticación 802.1X.	Protección total y rechazo de certificados de servidor no autorizados.
6	<i>A distributed and cooperative signature-based..., [6]</i>	Thankappan, M. et al. (2024)	España e India	DC-SWIDS, Firmas de ataque (CSA, Jamming) y MQTT.	Precisión promedio del 98% en ataques multi-canal (FragAttacks).
7	<i>An Active User-Side Detector for Evil Twins, [7]</i>	Hsu, F. H. et al. (2022)	Taiwán	AWPD basado en reglas de retransmisión TCP/IP.	Detección activa sin requerir hardware adicional o dispositivos asistentes.
8	<i>An Intelligent Rule-Based System for Detecting..., [8]</i>	Naik, D. B. et al. (2025)	No especificado	Framework basado en reglas deterministas y perfiles de señal.	Alta precisión de detección con baja demanda computacional para PYMES.

9	<i>Security Analysis of Evil Twin Attacks, [9]</i>	Rahman, R. et al. (2026)	Bangladesh	Penetration testing experimental con Aircrack-ng y RCMS.	Identifica interceptación de tráfico HTTP/HTTPS y valida certificados.
10	<i>Client-side Evil-Twin access point detection..., [10]</i>	Wakhloo, A. et al. (2023)	Irlanda	Análisis de RSSI, retardo de tramas Beacon y desviación del OUI.	Determinación efectiva mediante la inconsistencia de MAC y Timestamp.
11	<i>Data Mining Approach for Evil Twin Attack..., [11]</i>	Banakh, R. et al. (2024)	Ucrania y EE. UU.	KNN, Algoritmo generativo de RSSI y triangulación.	Identificación exitosa basada en huellas digitales del espectro (100%).
12	<i>Deauthentication Attacks, Rogue and Fake..., [12]</i>	Myrtaj, E. et al. (2024)	Bélgica	Fingerprinting de Capas MAC/PHY y Sniffing con Scapy.	Mitigación en tiempo real de deautenticación con alertas vía Telegram.
13	<i>Detection using autonomous sensors, [13]</i>	Banakh, R. et al. (2023)	Ucrania	Sensores autónomos (Raspberry Pi + Alfa) y clasificación KNN.	Logra 100% de precisión en entornos controlados mediante triangulación.
14	<i>DPETAs: Detection and Prevention of Evil Twin..., [14]</i>	Rofoo, F. F. H. et al. (2020)	Irak e India	Parámetros de configuración BSSID y cálculo de fórmula FSPL.	Localización física del atacante mediante atenuación de energía radio.
15	<i>Enhanced Detection of Evil Twin Attacks..., [15]</i>	Nanayakkara, J. et al. (2024)	Sri Lanka	Clasificador Random Forest con selección de rasgos AWID2.	El algoritmo Random Forest logró una precisión del 99.9186%.
16	<i>EvilSpot: Detection and Mitigation in Multi Channel, [16]</i>	Ahadi, S. A. A. et al. (2023)	India	Algoritmo multicanal, distribución de prefijos IP y listas blancas.	Detecta BSSID no autorizados y bloquea tramas de deautenticación.
17	<i>FakeAP Detector: An Android-Based Client-Side..., [17]</i>	Mwinuka, L. J. et al. (2022)	Tanzania	Análisis de Probe Responses, RSSI y seguridad en Android.	Precisión del 99.7% en redes cerradas sin requerir permisos root.
18	<i>Feature Selection in Wireless Intrusion..., [18]</i>	Kamble, A. et al. (2023)	India	Clasificador Random Forest con algoritmo Gini Index.	Precisión de detección del 99.99% utilizando el dataset AWID3.
19	<i>Implementación y evaluación de un prototipo MITM, [19]</i>	Yulán Mendoza, L. et al. (2025)	Ecuador y España	Simulación con Kali Linux, Airededdon y estándares NIST.	92% de usuarios ingresó credenciales en 15-19 segundos; fragilidad WPA2.
20	<i>Mobile Proxy framework for privacy, [20]</i>	Xhemajli, A. et al. (2024)	No especificado	Proxy móvil en Raspberry Pi con túneles VPN.	Mejora la privacidad del usuario y reduce la severidad MitM (CVSS).
21	<i>Performing Man in the Middle Attacks Within a..., [21]</i>	Buckle, R. et al. (2023)	Reino Unido	Envenenamiento ARP, desautenticación y clonación con BeEF.	Intercepción exitosa; evalúa ineficacia frente al estándar 802.11w.

22	<i>PHYSICAL LAYER AUTHENTICATION: MITIGATING..., [22]</i>	Tafoor, M. W. et al. (2025)	Reino Unido	RF Fingerprinting, NESDR mini 2 SDR y análisis FFT.	Autenticación basada en imperfecciones de fabricación del hardware.
23	<i>Public Wi-Fi security threat evil twin attack..., [23]</i>	Ahadi, S. A. A. et al. (2022)	India	Sistema 'ETDetector' basado en RSSI y recuento de saltos.	Detección efectiva mediante huellas de AP difíciles de replicar.
24	<i>Real-Time Detection of Rogue Wi-Fi Hotspots..., [24]</i>	Yusuf, S. L. et al. (2024)	No especificado	Association Rule Mining (ARM) integrado con análisis de comportamiento.	Identifica relaciones ocultas entre potencia de señal y tiempos de conexión.
25	<i>Rogue Access Points and Their Impact on Networks, [25]</i>	Belmokhtar, S. et al. (2025)	Estados Unidos	Análisis cualitativo y experimental de credential harvesting.	Analiza riesgos en infraestructura crítica y la importancia de túneles TLS.
26	<i>SAP: A Secure Low-Latency Protocol for Mitigating..., [26]</i>	Jain, V. et al. (2023)	Alemania, India y Francia	Protocolo SAP, Criptografía de Curva Elíptica (ECC) y AES-CCMP.	Baja sobrecarga computacional; mitiga overhead en redes industriales.
27	<i>Security Risks from the Modern Man-in-the-Middle..., [27]</i>	Cekerevac, Z. et al. (2025)	Serbia, Rusia e Irak	Revisión sistemática de ataques MITM y vulnerabilidades BLE.	Revela vulnerabilidades arquitectónicas en Bluetooth 5.4 (BLUFS).
28	<i>Smart Cyber Defense: Machine Learning Powered..., [28]</i>	Kaya, M. et al. (2024)	Turquía	Dataset Wi-ADS con clasificadores optimizados LGBM y RF.	El clasificador LightGBM logró una precisión del 96.39%.
29	<i>Optimization of attack scripts for robustness, [29]</i>	Augustyniak, A. et al. (2024)	No especificado	Optimización de scripts de ataque desde perspectiva del adversario.	Propone mejoras en la robustez de los WIDS mediante sintonización.
30	<i>WPFd: Active User-Side Detection of Evil Twins, [30]</i>	Hsu, F. H. et al. (2022)	Taiwán y China	WPFd basado en handshake de 3 vías TCP/IP.	Tasa de verdaderos positivos del 100% incluso con señales débiles (RSSI 45%).

A. Síntesis temática y categorización técnica

Con el fin de brindar un entendimiento estructurado del estado actual del arte, se dividió la muestra documental en tres categorías funcionales que caracterizan las arquitecturas de defensa vigentes. Como se muestra en la Tabla 2, el estudio indica que la mayoría de las investigaciones se enfocan en soluciones del lado de la red y en auditoría de protocolos (Network-side), después de estas vienen las implementaciones predictivas fundamentadas en Inteligencia Artificial y los métodos reactivos dirigidos al usuario final (Client-side).

TABLA 2
SÍNTESIS TEMÁTICA DE LOS ENFOQUES DE DETECCIÓN ET.

Categoría técnica y enfoque	Referencias asociadas	Características Principales (Ventajas – Desventajas)
Detección en el Lado del Cliente (Client-side)		Ventaja: Independencia total de la infraestructura de red; no requiere la instalación de hardware adicional o sensores.
(Análisis de tráfico y retransmisión desde el usuario)	[1], [7], [10], [17], [30]	Limitación: Depende de los recursos del dispositivo final (batería, procesamiento) y puede requerir permisos específicos en sistemas operativos móviles.
Inteligencia Artificial y Machine Learning	[11], [13], [15], [18], [24], [28]	Ventaja: Tasas de precisión superiores al 95% y capacidad de adaptación dinámica frente a atacantes que cambian sus firmas de radiofrecuencia.
(Clasificación predictiva de señales y tráfico)		Limitación: Alto costo computacional para el procesamiento en tiempo real y fuerte dependencia de <i>datasets</i> exhaustivos (como AWID) para evitar falsos positivos.
Monitoreo de Red, WIDS y Auditoría de Protocolos	[2], [3], [4], [5], [6], [8], [9], [12], [14], [16], [19], [20], [21], [22], [23], [25], [26], [27], [29]	Ventaja: Visión global del ecosistema inalámbrico, protección centralizada y capacidad de auditar vulnerabilidades críticas en estándares vigentes (802.11v, WPA2/3, TLS).
(Sistemas distribuidos y análisis de capa física/enlace)		Limitación: Alta susceptibilidad a fluctuaciones ambientales (obstáculos que alteran el RSSI) y necesidad de hardware dedicado (sondas, Raspberry Pi) para cobertura total.

B. Beneficios y métricas de rendimiento

Con base en los estudios analizados, se determinaron y organizaron las ventajas competitivas de cada propuesta técnica. Los beneficios clave que se han encontrado en la muestra documental se resaltan en la figura 2. El estudio del corpus mostró que el 73.33% ($n=22$ de 30 estudios) de las investigaciones consideraron la Alta Precisión y la Tasa de Detección Exacta como su mayor beneficio, logrando frecuentemente niveles por encima del 95%, e incluso llegando al 100% en situaciones controladas de laboratorio. En segundo lugar, el 13.33% ($n=4$ de 30 estudios) destacó la independencia de infraestructura, lo que posibilitó la detección sin hardware adicional en la red (enfoque del lado del cliente). El resto de la muestra priorizó el bajo costo y latencia (10.00%, $n=3$) y la escalabilidad (3.33%, $n=1$). Estos hallazgos evidencian que, aunque el objetivo principal es la precisión algorítmica, se está mostrando un interés cada vez mayor en soluciones autónomas y descentralizadas.

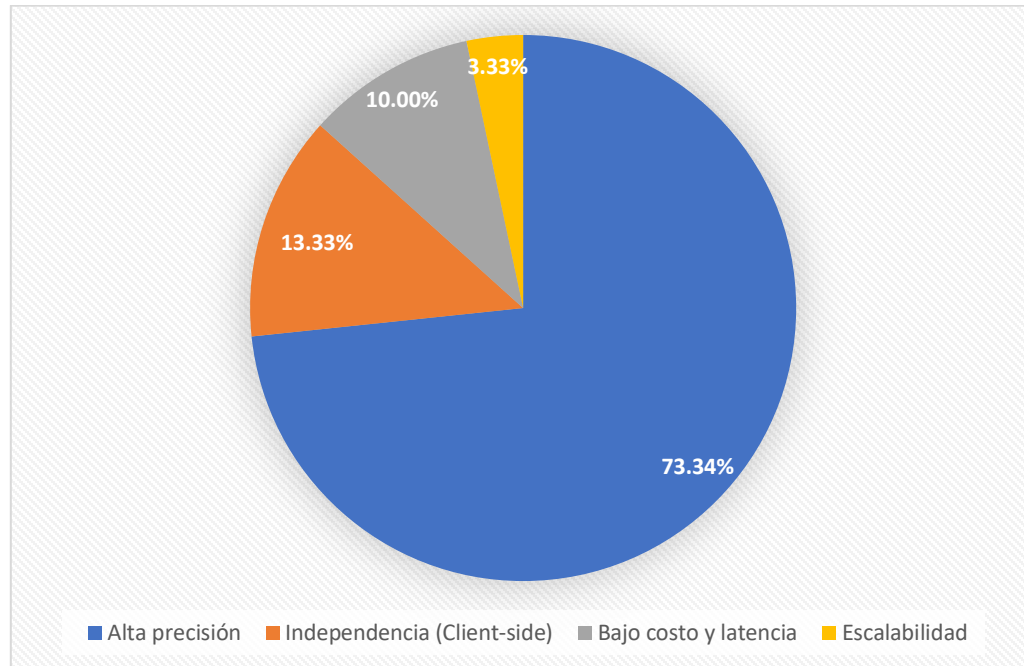


Fig. 2. Beneficios y métricas de rendimiento predominantes en la literatura.

C. Limitaciones técnicas y desafíos

Aunque se registraron índices de detección elevados, se encontraron obstáculos significativos para poner en práctica estas defensas y riesgos importantes. Como se muestra en la figura 3, el principal impedimento sigue siendo la dependencia del entorno físico y la producción de falsos positivos (debido a que los obstáculos o el movimiento provocan cambios en la señal RSSI), según lo informaron el 36.67% ($n=11$ de 30 estudios) de los autores. Además, el 33.33% ($n=10$ de 30 estudios) de las soluciones necesita sensores o hardware adicionales para la supervisión distribuida, lo que aumenta de manera significativa los costos de implementación a gran escala. Por último, la sobrecarga computacional (16.67%, $n=5$) tiene un impacto negativo considerable en los modelos predictivos de aprendizaje profundo que operan en tiempo real, mientras que una minoría (13.33%, $n=4$) reportó susceptibilidad a técnicas modernas de evasión.

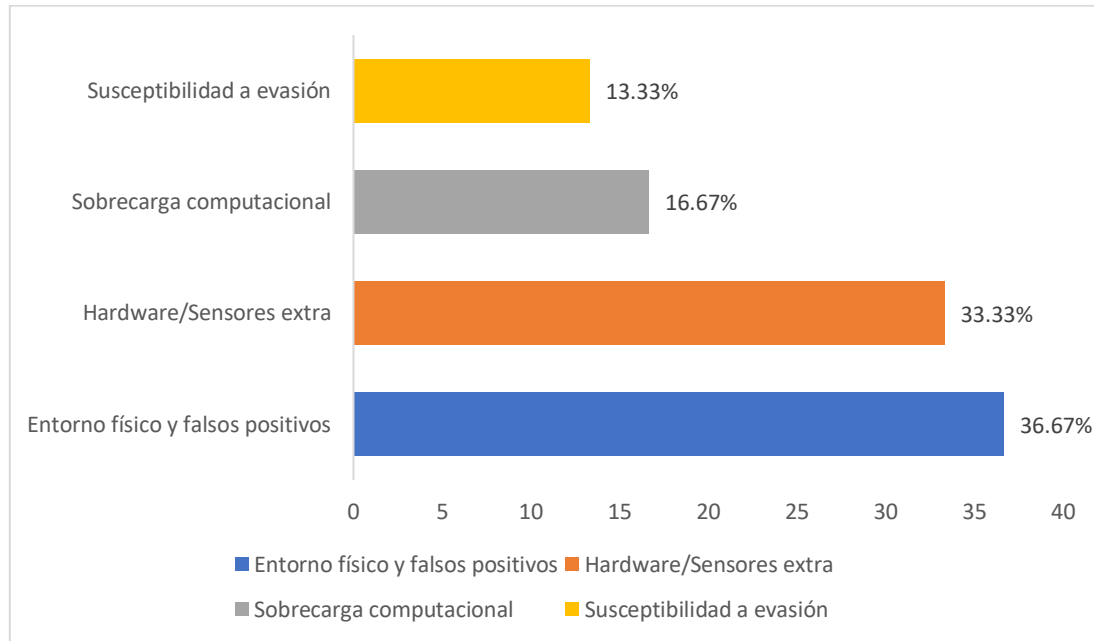


Fig. 3. Principales limitaciones técnicas identificadas en las propuestas de detección.

IV. DISCUSIÓN

Una minuciosa revisión sobre la literatura actual acerca de la detección de ataques Evil Twin (ETA) muestra un panorama tecnológico disperso, en el cual los investigadores luchan entre la precisión algorítmica y la factibilidad operativa en redes reales. Se examinan a continuación las disparidades más importantes, los huecos tecnológicos no cubiertos y las proyecciones futuras en esta área.

A. El debate central: complejidad vs. ligereza

La cuestión principal en la literatura contemporánea es si usar modelos complejos de Machine Learning (ML) o soluciones ligeras (Lightweight) del lado del cliente. Por un lado, se sostiene que las metodologías tradicionales de ML exigen una carga alta en términos de infraestructura y computación, lo cual restringe su uso en ecosistemas periféricos o PYMES, por lo que los sistemas basados en reglas deterministas son más adecuados [8]. Las propuestas del lado del cliente apoyan fuertemente esta preferencia por la independencia en la infraestructura, sosteniendo que los métodos de servidor impiden que el usuario final verifique la legitimidad del punto de acceso [10]. En este contexto, las soluciones que se operan directamente desde el dispositivo del usuario resultan ideales, pues no necesitan la asistencia del operador de la WLAN ni el rastreo de IP por medio de puertas de enlace [7]. Además, una parte significativa de la investigación apoya el empleo requerido de la Inteligencia Artificial, evidenciando que, bajo condiciones experimentales y con conjuntos de datos específicos, algoritmos de clasificación multiclase como Random Forest obtienen precisiones sobresalientes que superan el 99.91% [15], y que iteraciones optimizadas como LightGBM llegan al 96.39%. Así, se justifica la carga de procesamiento a cambio de una considerable disminución en la vulnerabilidad [28].

B. Brechas de investigación y limitaciones físicas

A pesar de los avances algorítmicos, el problema crítico que la literatura admite como no resuelto es la alta tasa de falsos positivos derivados de las fluctuaciones físicas del entorno. La propagación de ondas de radio y la métrica de intensidad de señal (RSSI) dependen de factores incontrolables como la atenuación, la propagación multitrayecto, la reflexión y la dispersión, lo que dificulta que los sensores diferencien una falsificación MAC de un cambio ambiental legítimo [11]. En entornos dinámicos, estas obstrucciones físicas distorsionan las señales de radiofrecuencia, conduciendo inevitablemente a falsas alarmas [22]. Adicionalmente, emerge una brecha crítica en el rendimiento de los nuevos estándares: a medida que los protocolos aumentan su robustez criptográfica (como en WPA3), se produce un aumento significativo en la latencia computacional, degradando el rendimiento de sistemas críticos como el Internet de las Cosas Industrial (IIoT) [26]. Sumado a esto, se ha demostrado que los atacantes modernos logran evadir defensas tradicionales explotando vectores previamente considerados seguros, como la manipulación silenciosa de tramas de gestión de transición BSS en el protocolo IEEE 802.11v [4].

C. Direcciones futuras

Para mitigar estas deficiencias, la academia propone dos grandes directrices tecnológicas. En primer lugar, se recomienda la integración de Inteligencia Artificial dinámica y autoadaptable. En lugar de depender de perfiles de tráfico estáticos, los sistemas futuros deben incorporar técnicas avanzadas de ML que se adapten a topologías de red complejas [24], fusionando la identificación por radiofrecuencia (RF fingerprinting) con modelos de Deep Learning para contrarrestar métodos de ofuscación sofisticados [22]. En segundo lugar, se plantea la transición hacia arquitecturas distribuidas y nuevos estándares. Resulta imperativo que los marcos de detección evolucionen hacia módulos instalables en ecosistemas de domótica para proteger el borde del IoT [6], así como el diseño de sistemas analíticos basados en la nube que garanticen una integración nativa y retrocompatible con estándares emergentes como Wi-Fi 6 y Wi-Fi 6E [12].

D. Limitaciones del estudio

Es importante reconocer ciertas limitaciones en la presente revisión sistemática. En primer lugar, el sesgo de selección de bases de datos, dado que la búsqueda se limitó principalmente a IEEE Xplore y Google Scholar, excluyendo repositorios de pago cerrados. En segundo lugar, se excluyeron 4 estudios relevantes por restricciones de acceso al texto completo. Finalmente, aunque la revisión abarcó literatura de diversas regiones a nivel global, el corpus analizado se concentró predominantemente en publicaciones en inglés y español, lo que podría representar un sesgo idiomático parcial frente a la totalidad de la producción científica en otros idiomas nativos.

V. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática de la literatura muestra que se ha producido un cambio importante en la identificación y reducción de ataques Evil Twin, pasando de realizar análisis perimetrales simples a contar con ecosistemas de seguridad predictiva. El estudio de la muestra revela una dicotomía tecnológica contemporánea: la industria se encuentra en una lucha entre poner en marcha modelos de Inteligencia Artificial que, de acuerdo con los resultados reportados por los autores en los estudios analizados, proporcionan precisiones por encima del 99% en ambientes controlados, pero requieren un elevado costo computacional y generar soluciones ligeras del lado del cliente (Client-side), las cuales son ideales para contextos con recursos escasos. La alta vulnerabilidad a la generación de falsos positivos debido a las variaciones físicas de las señales de radiofrecuencia (RSSI) en contextos dinámicos continúa siendo el reto más persistente, aun con estos progresos. Por ende, se concluye que la trayectoria de la seguridad en redes inalámbricas, sobre todo frente al crecimiento del Internet de las cosas y a los nuevos estándares como WPA3 y Wi-Fi 6, no se

basará en una sola tecnología. En cambio, dependerá del progreso de arquitecturas híbridas y autoadaptables que consigan balancear la precisión algorítmica profunda con una latencia operativa factible.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **DASM**; Metodología: **DASM, AJCL, MESA**; Investigación: **DASM, AJCL**; Análisis formal: **DASM, AJCL**; Redacción y preparación del borrador original: **DASM**; Redacción, revisión y edición: **DASM, AJCL, MESA**; Supervisión: **MESA**; Adquisición de fondos: No aplica.

Financiamiento: Los autores declaran que no se requirió de adquisición de fondos para este estudio.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos analizados se encuentran integrados en la muestra documental dentro del artículo.

Agradecimientos: Los autores desean expresar su agradecimiento a la profesora Martha Esperanza Sevilla Abarca por su guía académica y metodológica en este proyecto. Adicionalmente, se agradece a la plataforma de Inteligencia Artificial generativa, Gemini, por haber brindado asistencia en la etapa de pulido del formato, estructuración del lenguaje y adaptación al manual de estilo. Es importante destacar que la investigación profunda, el análisis formal y la interpretación técnica de los resultados presentados son responsabilidad exclusiva de los autores humanos.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] T. Ueda, A. Saif, S. Miyata, M. Nakahara, A. Kubota, "A client-side evil-twin attack detection system with threshold considering traffic load," in *2023 IEEE 13th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, 2023, pp. 68–69, doi: <https://doi.org/10.1109/icce-berlin58801.2023.10375616>
- [2] S. Sudhakaran, et al., "A lightweight frame-based wireless intrusion detection system for resource-constrained networks," in *2026 8th International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, 2026, pp. 1–8, doi: <https://doi.org/10.1109/iciss67859.2026.11453957>
- [3] K. Kimura, Y. Shiraishi, M. Morii, "A New Approach to Disabling SSL/TLS: Man-in-the-Middle Attacks are still Effective," in *2023 Eleventh International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, 2023, pp. 11–19, doi: <https://doi.org/10.1109/candar60563.2023.00010>
- [4] C. Louca, A. Peratikou, S. Stavrou, "A novel Evil Twin MiTM attack through 802.11v protocol exploitation," *Comput. Secur.*, vol. 130, p. 103261, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103261>
- [5] Y. Daldoul, M. Berrima, "A robust certificate management system to prevent evil twin attacks in IEEE 802.11 networks," *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 3589–3599, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s41870-024-02008-4>
- [6] M. Thankappan, H. Rifà-Pous, C. Garrigues, "A distributed and cooperative signature-based intrusion detection system framework for multi-channel man-in-the-middle attacks against protected Wi-Fi networks," *Int. J. Inf. Secur.*, vol. 23, no. 6, pp. 3527–3546, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s10207-024-00899-9>
- [7] F.-H. Hsu, C.-H. Lee, C.-S. Wang, "An active user-side detector for evil twins," in *Smart Innovation, Systems and Technologies, Cham: Springer International Publishing*, 2023, pp. 153–158, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05491-4_16
- [8] D. S. B. Naik, V. Dondeti, "An intelligent rule-based system for detecting evil twin attacks in wireless networks," in *2025 IEEE 17th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, 2025, pp. 750–757, doi: <https://doi.org/10.1109/cicn67655.2025.11368194>
- [9] R. Rahman, N. Ramli, A. P. Rahmadani, "Analisis keamanan jaringan Wi-Fi publik terhadap serangan evil twin," *Journal Riset Sistem Inf.*, vol. 3, no. 2, pp. 35–38, 2026, doi: <https://doi.org/10.69714/vzqtrw67>
- [10] A. Wakhloo, "Client-side Evil-Twin access point detection using beacon-frame delay and wireless network parameter deviation," National College of Ireland, Dublin, 2023, available: <https://norma.ncirl.ie/6555/>
- [11] R. Banakh, E. Nyemkova, C. Justice, A. Piskozub, Y. Lakh, "Data mining approach for evil twin attack identification in Wi-Fi networks," *Data*, vol. 9, no. 10, p. 119, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/data9100119>
- [12] E. Myrtaj, et al., "Deauthentication attacks, rogue and fake wireless access points detection through fingerprinting," 2024, available: https://www.researchgate.net/profile/Ernando-Myrtaj/publication/384253853_Deauthentication_Attacks_Rogue_and_Fake_Wireless_Access_Points_Detection_Through_Fingerprinting.pdf

- [13] R. Banakh, A. Piskozub, I. Oprsky, "Devising a method for detecting 'evil twin' attacks on IEEE 802.11 networks (Wi-Fi) with KNN classification model," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 3, no. 9 (123), pp. 20–32, 2023, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282131>
- [14] F. F. H. Rofoo, M. G. Galety, N. Arulkumar, R. Maaroo, "DPETAs: Detection and prevention of evil twin attacks on Wi-Fi networks," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 559–568, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9012-9_45
- [15] J. Nanayakkara, et al., "Enhanced detection of evil twin attacks in public Wi-Fi networks using machine learning algorithms," in *2024 9th International Conference on Information Technology Research (ICITR)*, 2024, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/icitr64794.2024.10857762>
- [16] S. A. A. Ahadi, T. Arora, V. Abrol, K. Sharma, "EvilSpot: Detection and mitigation in multi channel," in *2023 International Conference on Advances in Electronics, Communication, Computing and Intelligent Information Systems (ICAECIS)*, 2023, pp. 121–126, doi: <https://doi.org/10.1109/icaecis58353.2023.10170047>
- [17] L. J. Mwinuka, A. Z. Agghey, S. F. Kaijage, J. D. Ndibwile, "FakeAP detector: An android-based client-side application for detecting Wi-Fi hotspot spoofing," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 13611–13623, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3146802>
- [18] A. Kamble, D. Kshirsagar, "Feature selection in wireless intrusion detection system for evil twin attack detection," in *2023 3rd International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies (CISCT)*, 2023, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/cisct57197.2023.10351382>
- [19] L. Yulán Mendoza, et al., "Implementación y evaluación de un prototipo MITM Evil Twin Attack," *Quitensis*, 2025, available: <https://quitensis.com/index.php/home/article/view/33>
- [20] N. Xhemajli, Z. Tafa, "Mobile proxy in public WiFi networks: A tool against MITM attacks," in *2024 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2024, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/meco62516.2024.10577803>
- [21] R. Buckle, "Performing man in the middle attacks within a wireless local area network," 2022, doi: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21176347.v1>
- [22] M. W. Tafoor, "Physical layer authentication: Mitigating MitM and eavesdropping in public w lans," *Theses Journal*, vol. 3, no. 12, pp. 869–899, 2025, available: <https://thesesjournal.com/index.php/1/article/view/1743>
- [23] S. A. A. Ahadi, et al., "Public Wi-Fi security threat evil twin attack detection based on signal variant and hop count," 2022, available: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2424/1/020002/2822329/Public-Wi-Fi-security-threat-evil-twin-attack>
- [24] S. L. Yusuf, et al., "Real-Time detection of rogue Wi-Fi hotspots using association rule mining and behavioral analysis," 2024, available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5233478
- [25] S. Belmokhtar, "Rogue access points and their impact on networks," *Cybersecurity Undergraduate Research Showcase*, Old Dominion University, 2025, doi: <https://doi.org/10.25776/H2C7-3166>
- [26] V. Jain, U. Wetzker, V. Laxmi, M. S. Gaur, M. Mosbah, D. Mery, "SAP: A secure low-latency protocol for mitigating high computation overhead in Wi-Fi networks," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 84620–84635, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3302529>
- [27] Z. Čekerevac, P. Čekerevac, L. Prigoda, F. Al-Naima, "Security risks from the modern man-in-the-middle attacks," *MEST J.*, vol. 13, no. 1, pp. 34–51, 2025, doi: <https://doi.org/10.12709/mest.13.13.01.04>
- [28] M. Kaya, H. K. Kucukates, M. Demez, I. F. Kilincer, "Smart cyber defense: Machine learning powered intrusion detection in 802.11 networks," in *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 2024, pp. 1–7, doi: <https://doi.org/10.1109/idap64064.2024.10710835>
- [29] P. Augustyniak, O. Rogowicz, P. Zwierzykowski, "Theoretical and practical aspects of the evil twin attack," in *Communications in Computer and Information Science*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 224–236, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-62843-6_23
- [30] F. H. Hsu, et al., "WPDF: Active user-side detection of evil twins," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 16, p. 8088, 2022, available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8088>
- [31] M. J. Page, et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, no. n71, 2021, doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Estudio sobre agentes de inteligencia artificial aplicados a la ciberseguridad y pruebas de penetración en sistemas

Study on Artificial Intelligence Agents Applied to Cybersecurity and Penetration Testing in Systems

Gerardo **Cruz Espinosa**¹
Mariana **Velasco Trejo**²

Instituto Politécnico Nacional,
¹ Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ciudad de México, MÉXICO
ORCID: 0009-0005-4054-8702 / geecr07@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional,
² Escuela Superior de Cómputo,
Ciudad de México, MÉXICO
ORCID: 0009-0006-5522-9250 / mvelascot1601@alumno.ipn.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 13/03/2026, aceptado 05/06/2026, publicado 18/06/2026.



Resumen

La presente investigación analiza el funcionamiento técnico y la implementación de agentes de inteligencia artificial orientados a dominios específicos, particularmente en el ámbito de la ciberseguridad desde un enfoque ofensivo. Estos agentes permiten un cierto grado de automatización en ejecución de pruebas de penetración en sistemas informáticos, ya que, en la actualidad, este tipo de pruebas se realizan con herramientas operadas por profesionales de ciberseguridad.

El objetivo del estudio es examinar su arquitectura y capacidades operativas. Las pruebas realizadas evidencian su capacidad para procesar información contextual, coordinar el uso de herramientas y ejecutar acciones mediante el uso de modelos de lenguaje de gran tamaño. Los resultados sugieren que estas nuevas tecnologías pueden apoyar a los profesionales de ciberseguridad en diversas tareas operativas que actualmente se realizan de manera manual.

La metodología empleada es estructurada y se desarrolla por etapas, integrando la adquisición de información, el análisis contextual, la planificación de acciones, la ejecución controlada y la retroalimentación continua.

Palabras clave: ciberseguridad, agentes de inteligencia artificial, ciberseguridad ofensiva, pruebas de penetración, modelos de lenguaje grande, automatización.

Abstract

This investigation analyzes the technical functioning and implementation of artificial intelligence agents oriented toward specific domains, particularly in the field of cybersecurity from an offensive perspective. These agents enable a certain degree of automation in the execution of penetration tests on computer systems due to this type of proofs are made through tools operated by cybersecurity professionals.

The objective of this study is to examine their architecture and operational capabilities. The conducted tests demonstrate their ability to reason and perform actions through the use of large language models. The results suggest that these emerging technologies can support cybersecurity professionals in various operation tasks, it is important to note that these tasks are already being done manually.

The methodology employed is structured and developed in stages, integrating information acquisition, contextual analysis, action planning, controlled execution, and continuous feedback.

Index terms: cybersecurity, artificial intelligence agents, offensive cybersecurity, penetration testing, large language models.

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, la tecnología y el internet se han convertido en herramientas indispensables en el día a día de la mayoría de personas. En paralelo, en el campo de la inteligencia artificial (IA) se han desarrollado modelos de aprendizaje automático y modelos de lenguaje a gran escala. De acuerdo con datos de Google, la percepción positiva hacia la inteligencia artificial ha aumentado recientemente [1].

En este sentido y con respecto al ámbito profesional, el surgimiento y auge de la tecnología en la nube, la IA, los *smartphones* y las aplicaciones móviles, han ampliado la superficie de ataque, lo cual es aprovechado por los ciberdelincuentes. Ejemplo de ello, y de acuerdo con datos del NIST [2], los ataques informáticos han ido al alza durante los últimos años. Actualmente, la ciberseguridad constituye un pilar fundamental para garantizar la integridad, disponibilidad y confidencialidad de la información dentro de los sistemas digitales [3].

Desde esta perspectiva, se busca minimizar el riesgo de ciberataques mediante pruebas de penetración, ya que estos permiten identificar vulnerabilidades en sistemas informáticos al analizar información como: CVEs, registros de red, configuraciones, datos obtenidos de herramientas de escaneo y respuestas de servicios. Sin embargo, el resultado de estas pruebas depende en gran medida de la experiencia del profesional que las lleva a cabo, así como del tiempo que se tenga disponible para realizarlo y de la capacidad que se tenga para analizar grandes volúmenes de información, lo cual podría ocasionar que no se identifique la totalidad de las vulnerabilidades del sistema durante la prueba, dejando oportunidades de explotación para los ciberdelincuentes.

Con el surgimiento de los Modelos de Lenguaje Grande (LLM, por sus siglas en inglés), se ha observado que estos permiten analizar grandes cantidades de información y generar respuestas fundamentadas en patrones identificados durante su entrenamiento. Asimismo, cuando forman parte de arquitecturas basadas en agentes, pueden apoyar la selección de acciones a ejecutar de acuerdo con los objetivos definidos y la información disponible. Lo anterior es relevante debido a que, hasta hace poco tiempo, los modelos de lenguaje se utilizaban principalmente para tareas de generación y procesamiento de texto. En años recientes, han surgido agentes de IA capaces de interactuar con herramientas externas y ejecutar acciones dentro de entornos controlados.

En el ámbito de la ciberseguridad, los agentes de IA podrían permitir llevar a cabo tanto tareas ofensivas como defensivas, lo que suele realizarse por *Red Teams* y *Blue Teams*, respectivamente. Dentro del *Red Team*, se encuentra un especialista conocido como *Pentester*, el cual es el encargado de realizar las pruebas de penetración en sistemas, estas pruebas también son conocidas como *pentests*. Un agente de IA podría asistir en un *pentest* al realizar una serie de tareas, como lo son: reconocimiento, escaneo, evaluación de vulnerabilidades, explotación y generación de informes [4], haciendo uso de herramientas que los *Pentesters* suelen emplear. Con respecto al *Blue Team*, esta tecnología podría contribuir en la detección de Indicadores de Compromiso (IoCs), detección y correlación de eventos, así como respuesta ante incidentes [5].

Cabe destacar que esta tecnología permite generar una retroalimentación con base en los resultados obtenidos en cada prueba, lo que posibilita que el modelo itere hasta que determine que no es necesario continuar. Asimismo, puede aprender patrones a lo largo del tiempo, lo que les permite que mejoren sus resultados en la medida que sea utilizada para que pueda generar aprendizaje.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Inteligencia artificial

La Inteligencia Artificial (IA) es un área de las ciencias computacionales que tiene el objetivo de crear sistemas con capacidades suficientes para realizar tareas que tradicionalmente requieren inteligencia y razonamiento humano. Estos sistemas adquieren la capacidad de generalizar patrones a partir de datos previamente observados y de la adaptación a entornos cambiantes [6].

Los primeros desarrollos en IA estuvieron basados en sistemas expertos y modelos fundamentados en reglas lógicas explícitas, las cuales, junto con los datos, eran proporcionadas por programadores especialistas. Estos sistemas se ejecutaban en entornos controlados; sin embargo, presentaban importantes limitaciones. Además, resultaba inviable supervisar y corregir constantemente la información que el sistema generaba. Por lo que la necesidad de reducir, en la medida de lo posible, la intervención humana, así como la recopilación de grandes volúmenes de información y los avances en el estudio del lenguaje natural, dirigieron a la inteligencia artificial hacia enfoques probabilísticos y estadísticos [7].

Adicionalmente, el avance de capacidad en el ámbito computacional permitió realizar el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos. En este contexto, el aprendizaje profundo, aprendizaje automático, análisis masivo de información y procesamiento del lenguaje natural, se consolidaron como pilares de la IA moderna, haciendo posible que los sistemas aprendieran patrones y comportamientos a partir de grandes volúmenes de datos.

B. Modelos de lenguaje y razonamiento (LLM)

Los LLM se fundamentan en técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN), disciplina de la inteligencia artificial orientada al análisis y generación de lenguaje humano considerando el contexto y significado de la información procesada [8].

Mientras se realizaban estudios referentes al PLN, se identificó un problema: los textos estaban siendo procesados de manera secuencial, lo cual causaba dificultad para recordar un contexto muy grande, lentitud en el entrenamiento y problemas con dependencias largas. Ante esta problemática, un grupo de investigadores crearon el concepto de *Transformer* [8] (Fig. 1).

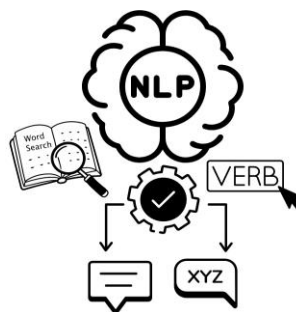


Fig. 1. Procesamiento de lenguaje natural.

Un *Transformer* se refiere a la arquitectura neuronal que permitió que los PLMs modernos funcionaran a la perfección, ya que esta arquitectura observa una oración completa al mismo tiempo y decide cuáles son las partes importantes, es decir, ve una frase como un todo y no como un conjunto ordenado de palabras individuales. Cabe mencionar que existen tres tipos de *Transformers* (Fig. 2):

- **Encoder.** Entiende texto al procesar una entrada haciendo uso de la capa de atención.
- **Decoder.** Genera texto de acuerdo con el objetivo del modelo gracias a que toma la representación realizada por el *encoder*.
- **Encoder-Decoder.** Entiende y genera texto.

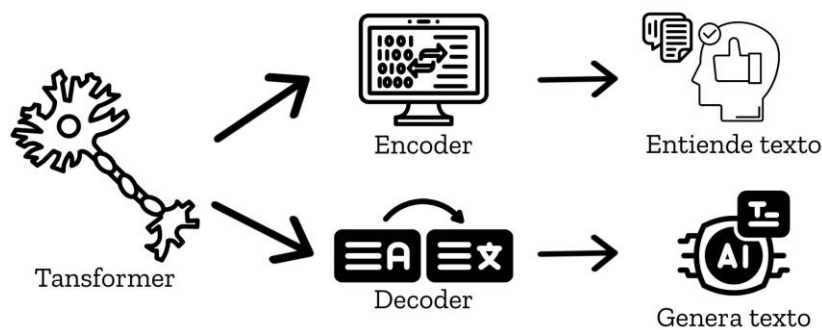


Fig. 2. Funciones de los tipos de Transformers.

Con la creación de los *Transformers*, surgieron los modelos, que son modelos matemáticos (red neuronal tipo *Transformer*) que aprenden patrones estadísticos. Aunque, un modelo no razona, sí predice, y al hacerlo millones de veces, acierta la mayor parte del tiempo.

Posteriormente y gracias a este avance, se crearon los Modelos de Lenguaje Grande (*Large Language Models*, LLM, por sus siglas en inglés), mismos que consisten en modelos de IA que tienen la finalidad de comprender contexto, generar texto y resolver tareas complejas mediante patrones aprendidos durante el entrenamiento, así como predecir la siguiente palabra en una secuencia (Fig. 3).

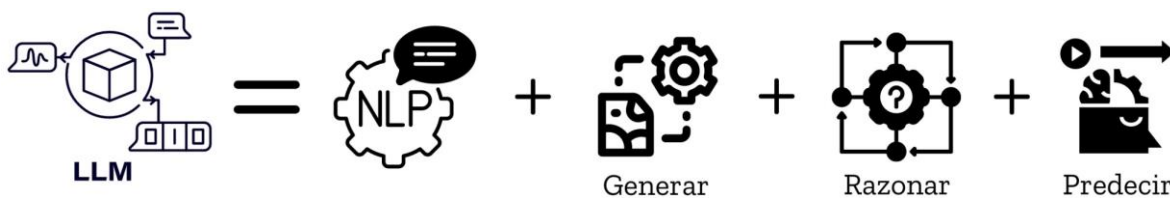


Fig. 3. Estructura de un LLM.

Una vez finalizado su proceso de entrenamiento, el modelo entra en la parte llamada inferencia, misma en la que aplica los parámetros aprendidos para generar texto a partir de una entrada, la cual es denominada como *prompt* (instrucción de entrada) en el contexto de los *chatbots*. Durante esta fase, el mecanismo de atención desempeña un papel fundamental, ya que permite comprender el contexto y generar respuestas coherentes. Es importante destacar que los LLM no son capaces de interactuar con su entorno por sí solos.

Por otra parte, además del proceso de inferencia, existen otros métodos que permiten ajustar o complementar el conocimiento de un modelo previamente entrenado. Uno de dichos métodos es el ajuste fino (*fine tuning*), técnica que consiste en continuar el entrenamiento del modelo sobre un conjunto de datos específico con el objetivo de modificar sus parámetros internos y especializarlo en una tarea u objetivo específico. Sin embargo, reentrenar modelos a gran escala requiere de una considerable capacidad computacional y recursos económicos, por lo que su desarrollo suele ser realizado por grandes empresas.

Ante dicha problemática, una alternativa es el uso de la técnica conocida como *Retrieval-Augmented Generation* (RAG), ya que, a diferencia del ajuste fino, esta no altera los parámetros del modelo, sino que incorpora información externa durante la inferencia por medio de la recuperación e incorporación de documentos relevantes. De esta forma, el modelo es capaz de generar respuestas fundamentadas en información adicional sin necesidad de modificar su entrenamiento original (Fig. 4).

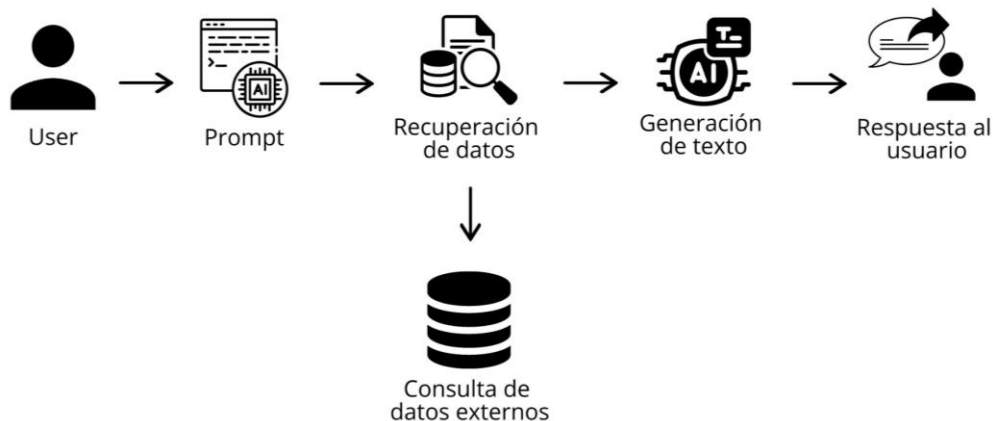


Fig. 4. Funcionamiento de la estructura RAG.

Las capacidades de razonamiento, generación de contenido y acceso a conocimiento externo han permitido que los LLM trasciendan las aplicaciones tradicionales de procesamiento de lenguaje natural. En años recientes, estos modelos han comenzado a incorporarse en dominios especializados como la ciberseguridad, donde apoyan actividades relacionadas con la detección de amenazas, análisis de vulnerabilidades, automatización de tareas operativas y asistencia en pruebas de penetración. Este avance ha impulsado el desarrollo de arquitecturas más complejas basadas en agentes inteligentes capaces de interactuar con herramientas y sistemas externos.

C. Agentes inteligentes

Un agente inteligente es un sistema basado en modelos de IA capaz de percibir información de su entorno, procesarla y ejecutar acciones mediante herramientas externas con un grado de autonomía. En este contexto, el modelo de lenguaje actúa como componente de decisión dentro de una arquitectura orientada al cumplimiento de objetivos específicos [9].

Dentro de las arquitecturas basadas en herramientas, el modelo de lenguaje selecciona las acciones más adecuadas para cumplir un objetivo y delega su ejecución a componentes especializados (Fig. 5).

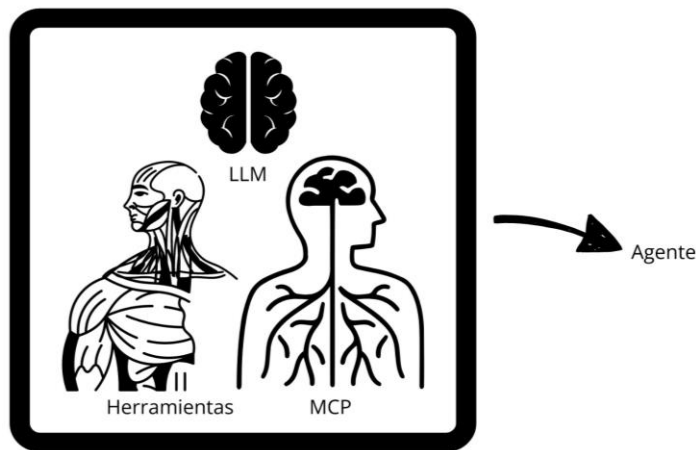


Fig. 5. Estructura de un agente.

Uno de los enfoques más utilizados para coordinar este comportamiento es ReAct (Reasoning + Acting), técnica que estructura la resolución de tareas mediante un ciclo iterativo compuesto por pensamiento, acción y observación [10] (Fig. 6).

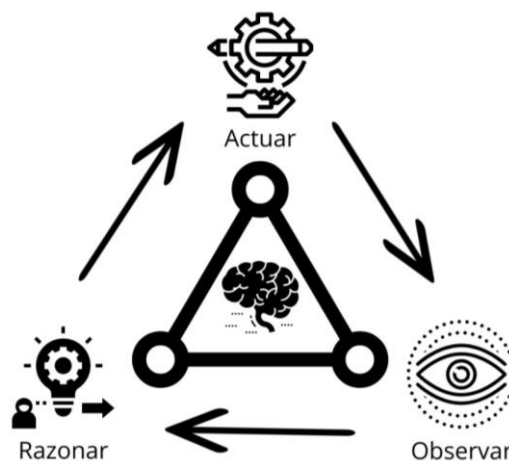


Fig. 6. Funcionamiento del enfoque *ReAct*.

La combinación de modelos de lenguaje, mecanismos de razonamiento y herramientas externas ha convertido a los agentes inteligentes en una de las principales líneas de investigación actuales. Particularmente en ciberseguridad, estos sistemas han demostrado potencial para automatizar procesos de análisis, correlación de eventos, generación de consultas, ejecución de herramientas especializadas y apoyo a la toma de decisiones, lo que ha motivado el desarrollo de soluciones orientadas tanto a actividades ofensivas como defensivas.

D. Ciberseguridad ofensiva y defensiva (Red Team/Blue Team)

La ciberseguridad en la industria moderna se estructura en torno a capacidades ofensivas y defensivas. Para describir estas funciones, se han adoptado los términos *Red Team* y *Blue Team*, los cuales se refieren a equipos que se encargan de simular ataques, así como a los profesionales responsables de la defensa y protección de sistemas (Fig. 7).

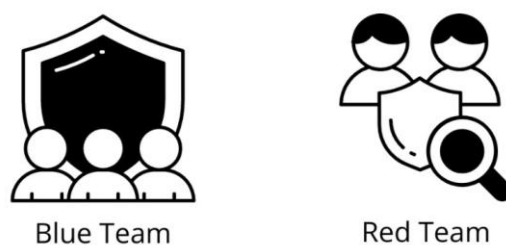


Fig. 7. Equipos de ciberseguridad ofensiva y defensiva.

8

El *Red Team* se centra en ejecutar las Tácticas, Técnicas y Procedimientos (TTPs) que suele utilizar un adversario real con el objetivo de identificar fallas de configuración, vulnerabilidades, código vulnerable y deficiencias en los controles de seguridad empleados [11]. Para estructurar y estandarizar la descripción de dichas TTPs, se emplean marcos de referencia, como lo es MITRE ATT&CK, el cual permite modelar amenazas y proporciona una taxonomía estructurada de las tácticas y técnicas observadas en ataques reales.

Adicionalmente, las pruebas de penetración permiten a las empresas priorizar vulnerabilidades de alto impacto y facilitar su mitigación. Los profesionales que las desarrollan utilizan clasificaciones de riesgos, uno de ellos es el OWASP Top 10, este es un documento de referencia que describe las principales vulnerabilidades en aplicaciones web, es importante destacar que este es actualizado periódicamente para adaptarlo a nuevas amenazas [13].

El estudio de estos patrones ha permitido estructurar los ataques en fases que describen la evolución del compromiso, entre las principales fases se encuentran: acceso inicial, ejecución, persistencia, elevación de privilegios, movimientos laterales y filtración de información, entre otras [12].

Por otro lado, el *Blue Team* está conformado por diferentes equipos que se encargan de realizar tareas específicas, mismas que se describen a continuación:

- Gestionar incidentes y dar respuesta a ellos, por lo que otro referente relevante es el NIST, el cual proporciona mejores prácticas y describe la capacidad de respuesta ante incidentes, la detección de anomalías y los mecanismos para reducir el impacto de los ataques. De acuerdo con el NIST, los pasos a realizar para la gestión de un incidente son: preparación, detección y análisis, contención, erradicación, recuperación y actividades posteriores al incidente [14].

- Monitorear las 24 horas del día y los 7 días de la semana la red de una empresa con el objetivo de identificar comportamiento inusual que sugiera posible actividad maliciosa. Cada vez que se detecta un comportamiento que sigue ciertos patrones, se genera un incidente. Para esta actividad, el NIST también proporciona mejores prácticas, las cuales consisten principalmente en combinar diferentes fuentes de datos, comportamientos y firmas para la detección de ataques.

Es fundamental identificar y responder de manera rápida y efectiva ante un incidente para evitar que un adversario logre comprometer un sistema [15]. Incorporar a la IA en los procesos para asegurar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información representa una evolución natural que ya comienza a observarse en la actualidad: con la ayuda de LLM que verifican datos en tiempo real y responden en consecuencia, los agentes de IA aplicados a la ciberseguridad pueden apoyar tanto los procesos del *Red Team* como a los del *Blue Team*. Sin embargo, todavía existen múltiples áreas de oportunidad en esta iniciativa.

La convergencia entre agentes inteligentes, modelos de lenguaje y procesos de ciberseguridad ha dado lugar a nuevas soluciones capaces de asistir tareas tradicionalmente realizadas por especialistas. Como resultado, diversas organizaciones y grupos de investigación han desarrollado herramientas que integran capacidades de razonamiento, acceso a información contextual y ejecución de acciones, ampliando el nivel de automatización alcanzable en entornos de seguridad. En la siguiente sección se presentan algunas de las propuestas y plataformas más representativas identificadas en la literatura reciente.

9

III. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, la automatización en el ámbito de la ciberseguridad ha evolucionado desde mecanismos basados en firmas, reglas predefinidas, *scanners* y *playbooks* estáticos hacia enfoques más avanzados que incorporan análisis conductual, correlación de eventos y modelos basados en IA.

Dentro del enfoque del *Blue Team*, existen herramientas conocidas como “Agentes en *endpoints*” (EDR/XDR). Estas herramientas son programas que se instalan en cada una de las computadoras que se desean proteger y que se comunican con un sistema central o “cerebro” [16]. Algunos de los datos que pueden recolectarse mediante estos agentes son: programas instalados con versiones vulnerables, comportamientos anómalos e indicadores de compromiso.

Algunos ejemplos claros y populares de dichos agentes son: Qualys [17], soluciones de *Endpoint Detection and Response* (EDR), Nessus que permite escanear redes, potenciando su funcionamiento mediante *plugins* para que sea utilizado en tecnologías específicas [18].

Asimismo, los agentes inteligentes se están empleando para clasificar eventos y patrones, así como correlacionarlos. Algunos ejemplos de este enfoque son los siguientes:

- Sec-PaLM, este es un modelo de lenguaje diseñado para apoyar a la seguridad en la nube de Google. Sec-PaLM brinda apoyo para la detección de indicadores de amenazas, comportamientos sospechosos, presencia de *malware* y existencia de vulnerabilidades [19].
- Microsoft Security Copilot, esta es una solución basada en IA que implementa agentes para simplificar tareas como la corrección y clasificación de vulnerabilidades, así como la detección y clasificación de ataques de *phishing*, entre muchas otras funciones [20].

- VulnBot, aplica la automatización tradicional de las pruebas de penetración apoyándose en herramientas que realizan escaneos, enumeración y, en algunos casos, explotación asistida. Una herramienta que propone utilizar agentes y modelos de lenguaje para automatizar pruebas [21].
- HexStrike, una herramienta que combina las capacidades de inferencia y planificación de un LLM con agentes capaces de ejecutar hasta 200 *software* diferentes de *pentesting*. Este proyecto puede integrarse con modelos ampliamente utilizados, como Cursor, ChatGPT o Gemini [22].

Una parte fundamental para el uso de los agentes inteligentes son los servidores MCP (*Model Context Protocol*) [23]. Este protocolo está diseñado para que los modelos de IA puedan conectarse a herramientas, datos y sistemas externos, de manera que MCP actúa como un puente estandarizado entre LLM, agentes inteligentes y aquellas herramientas disponibles para su ejecución (Fig. 8).



Fig. 8. Capas de un servidor MCP.

Además, este protocolo define la forma en que se realiza la comunicación y delimita su alcance. Cada acción que ejecuta un agente debe pasar por el servidor MCP. En otras palabras, un servidor MCP funciona como una capa intermedia entre el agente y las distintas herramientas (Fig. 9).

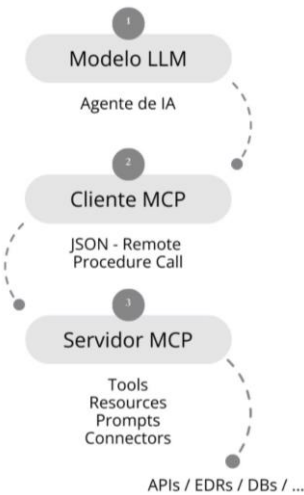


Fig. 9. Arquitectura de comunicación en MCP.

En el contexto de las pruebas de penetración, el servidor MCP habilita el acceso del agente a herramientas como: *nmap*, *sqlmap*, *Burp Suite*, *ffuf*, *amass*, *nuclei*, entre muchas otras que son ampliamente utilizadas en la industria.

Es importante destacar que, si bien estas herramientas permiten automatizar múltiples procesos, actualmente no es viable que estos reemplacen por completo al ser humano, solo deben ser considerados mecanismos de apoyo a la toma de decisiones. Los LLM, al ser modelos probabilísticos, no están exentos de generar errores, sesgos o interpretaciones no fundamentadas, por ello se requiere validar los resultados, descartar posibles falsos positivos y considerar el impacto asociado a su implementación.

Asimismo, la integración de estas tecnologías en entornos empresariales requiere considerar los riesgos de seguridad derivados de su uso. Entre estos se encuentran ataques como *prompt injection*, uso inadecuado de la herramienta, deficiencias en los controles de acceso y la necesidad de alinearse a marcos de referencia como el NIST. De manera que, su incorporación debe estar acompañada de políticas, mecanismos de supervisión y controles técnicos adecuados.

IV. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Una minuciosa revisión sobre la literatura actual acerca de la detección de ataques Evil Twin (ETA) muestra un panorama tecnológico disperso, en el cual los investigadores luchan entre la precisión algorítmica y la factibilidad operativa en redes reales. Se examinan a continuación las disparidades más importantes, los huecos tecnológicos no cubiertos y las proyecciones futuras en esta área.

11

A. OBJETIVO GENERAL

Analizar la viabilidad del uso de agentes inteligentes basados en LLM e integrados mediante servidores MCP para llevar a cabo la ejecución de pruebas de penetración, identificando sus beneficios, limitaciones y posibles áreas de oportunidad.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar en qué medida las herramientas que implementan agentes inteligentes cumplen con los marcos y estándares de ciberseguridad, tales como OWASP Top 10, MITRE ATT&CK y NIST.
2. Identificar y analizar las herramientas que utilizan agentes inteligentes para ejecutar pruebas de penetración automatizadas, descritas en el estado del arte.
3. Evaluar la contribución de los agentes de IA en la automatización de las pruebas de penetración, comparando sus capacidades con enfoques manuales y semi automatizados.
4. Realizar una comparativa de los resultados proporcionados por el agente mediante el uso de distintos LLM.

A partir de los objetivos previamente definidos, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿En qué actividades puede apoyar la automatización que ofrecen los agentes inteligentes y el razonamiento de los LLM en la ciberseguridad?
2. ¿Cuál es la implementación actual de estos agentes en la industria, dentro de soluciones comerciales?
3. ¿Cuáles son las ventajas, desventajas y limitaciones de realizar pruebas de penetración en sistemas utilizando estas nuevas herramientas?

Con base en las preguntas listadas anteriormente, se estructura un análisis desde diversas perspectivas, considerando su uso futuro en entornos empresariales.

V. METODOLOGÍA

Una minuciosa revisión sobre la literatura actual acerca de la detección de ataques Evil Twin (ETA) muestra un panorama tecnológico disperso, en el cual los investigadores luchan entre la precisión algorítmica y la factibilidad operativa en redes reales. Se examinan a continuación las disparidades más importantes, los huecos tecnológicos no cubiertos y las proyecciones futuras en esta área.

La metodología utilizada en este trabajo se basa en un enfoque conceptual y operativo para el diseño y análisis de agentes de IA dedicados a pruebas de penetración.

Esta investigación se desarrolló en cinco etapas:

1. Adquisición de información
2. Análisis y razonamiento
3. Planificación de acciones
4. Ejecución controlada
5. Retroalimentación y aprendizaje

Estas etapas fueron definidas con base en el ciclo operativo comúnmente utilizado por agentes inteligentes orientados a la ejecución de tareas complejas, así como en procesos empleados durante pruebas de penetración. Esta estructura permite evaluar de manera sistemática la capacidad de los agentes para obtener información, procesarla, planificar acciones, interactuar con herramientas especializadas y ajustar su comportamiento a partir de los resultados obtenidos. Debido a que estas actividades forman parte de múltiples escenarios de evaluación de seguridad, la metodología puede ser reproducida y adaptada a diferentes entornos de pruebas de penetración asistidas por agentes de IA.

A. Adquisición de información

Durante esta etapa se recopiló información sobre conceptos clave para el desarrollo de la presente investigación, como: PLN, modelos, *transformers*, LLM y agentes inteligentes, por mencionar algunos, ya que para la implementación de este agente inteligente primero se requería conocer y comprender el funcionamiento de los mismos para poder utilizarlo de manera correcta y obtener datos confiables.

Asimismo, se realizó una investigación acerca de herramientas disponibles públicamente que permiten la ejecución de *software* de *pentesting* a través de un LLM con la finalidad de conocer las funcionalidades ofrecidas por cada una de ellas.

La información recopilada en esta fase puede ser consultada en las secciones ‘II. Revisión de la literatura’ y III. ‘Estado del arte’.

B. Análisis y razonamiento

Luego de haber llevado a cabo la recopilación de información, se realizó una evaluación respecto a las herramientas identificadas que permiten la ejecución de *software* de *pentesting*, ya que se requería elegir una de ellas para poder implementarla y realizar las pruebas necesarias. Tras la evaluación de las mismas, se determinó que se haría uso de HexStrike, ya que, entre las herramientas identificadas, esta es la que proporciona un mayor número de *software* de *pentesting* y una arquitectura basada en agentes capaz de coordinar su ejecución. Esta característica resulta particularmente relevante para los objetivos del presente trabajo, ya que permite analizar el comportamiento de agentes de IA en escenarios que abarcan múltiples fases de una prueba de penetración. Mediante 12 agentes especializados,

HexStrike integra herramientas dedicadas a redes y reconocimiento, seguridad en aplicaciones *web*, autenticación y contraseñas, análisis de binarios, ingeniería inversa y seguridad en la nube, facilitando la evaluación de un amplio conjunto de actividades que comúnmente son realizadas por un *pentester*.

Si bien HexStrike fue utilizado como plataforma experimental debido a su amplia cobertura de herramientas de *pentesting*, la contribución de este trabajo se centra en analizar la viabilidad del uso de agentes inteligentes integrados mediante servidores MCP, así como en identificar sus beneficios, limitaciones y áreas de oportunidad dentro de escenarios de pruebas de penetración.

Para llevar a cabo las actividades anteriores, la arquitectura lógica de este agente sigue el enfoque ReAct y se encuentra conformado de la siguiente manera:

- **Módulo de adquisición de información.** Se encarga de recolectar datos sobre el sistema objetivo mediante herramientas de enumeración y reconocimiento.
- **Módulo de razonamiento y análisis.** Examina la información obtenida y define la superficie de ataque.
- **Módulo de planificación.** Selecciona las tácticas y los procedimientos que deben utilizarse.
- **Módulo de ejecución autónoma.** Se encarga de ejecutar las herramientas de *pentesting* con ayuda del servidor MCP.
- **Módulo de retroalimentación.** Su objetivo es que el modelo aprenda de las entradas que reciba y las respuestas que proporciona con el objetivo de mejorar las decisiones en futuras ejecuciones.

Esta arquitectura permite medir y observar el comportamiento, la eficacia y los resultados del modelo durante su ejecución. Para ello, se define un conjunto estructurado de reglas que el modelo incorpora en cada interacción con un usuario como parte del *prompt* o contexto de entrada. De esta manera, el modelo toma en consideración dichas instrucciones al generar la respuesta o al elegir la ejecución de alguna herramienta. Este enfoque no modifica los parámetros del modelo, sino que orienta su comportamiento en tiempo de inferencia mediante la incorporación dinámica de restricciones o criterios operativos.

Por otra parte, se realizó una evaluación respecto a qué LLM utilizar, luego de valorar las características de los más populares, se decidió hacer uso de Gemini, ChatGPT y Cursor.

C. Planificación de acciones

Para la realización de las pruebas se utilizaron las siguientes herramientas y configuraciones:

- Cada agente requería ser desplegado en un entorno aislado y controlado: una máquina virtual en el *software* de virtualización VMware, asignándole 6 GB de memoria RAM. Este enfoque permite que el agente no pueda causar daños a la máquina física, lo que se alinea con los principios de diseño y contención utilizados en la industria de la ciberseguridad.
- Gemini como LLM encargado de analizar el contexto disponible, generar estrategias de acción y seleccionar los siguientes pasos a ejecutar.
- ChatGPT como LLM encargado de analizar la información disponible, planificar acciones y determinar los siguientes pasos dentro del flujo del trabajo.

- Cursor aprovechando sus capacidades de agente embebido para trabajar directamente sobre archivos del sistema.
- HexStrike como servidor MCP que expone herramientas de *hacking* ético para ser utilizadas por LLM mediante agentes.

Posteriormente, se definieron las acciones puntuales realizadas en los escenarios, las cuales consistieron en: escaneos de vulnerabilidades y servicios, búsqueda de puertos abiertos y, en algunos casos, la explotación de aplicaciones vulnerables.

Las pruebas fueron ejecutadas por dos personas:

- Un *pentester senior* con 5 años de experiencia en pruebas de penetración de sistemas *web*, aplicaciones móviles e infraestructura bancaria crítica, incluyendo plataformas SWIFT y otros sistemas de alta criticidad.
- Un analista de Inteligencia de Amenazas (Nivel 2) con 5 años de experiencia en ciberinteligencia, modelado de amenazas y análisis de actores, campañas e Indicadores de Compromiso (IoC).

Se llevaron a cabo las mismas actividades dentro del mismo alcance y bajo criterios de evaluación equivalentes, la diferencia radicó en que la analista utilizó el agente de inteligencia y el *pentester* llevó a cabo las actividades manualmente y con base en su experiencia.

Las fases consideradas para este *pentest* fueron:

1. *Reconnaissance*, el objetivo de esta es identificar superficie expuesta.
2. *Scanning*, en esta etapa se tiene el objetivo de identificar puertos y servicios.
3. *Enumeration*, durante esta etapa se extrae información sensible.
4. *Gaining access*, en esta es posible obtener RCE inicial.
5. *Lateral movement*, se busca realizar un *pivot* a usuario real del sistema.
6. *Privilege escalation*, en este punto el objetivo es escalar a *root*.
7. *Maintaining access*, la finalidad de esta fase es establecer persistencia (conceptual).
8. *Clearing tracks*, finalmente se busca borrar evidencia (teórico).

D. Ejecución controlada

En esta etapa, tanto la analista como el *pentester* llevaron a cabo las actividades de *pentesting* correspondientes a las fases definidas anteriormente, esto con ayuda de distintos LLM y siguiendo una secuencia estructurada de ataque. De manera paralela, el *pentester* realizó las mismas fases sin ayuda de ningún modelo de IA.

El agente de IA se implementó en un *host* con el sistema operativo Kali Linux, desde el cual se realizaron las actividades de evaluación. Además, tanto las pruebas realizadas por el agente como por el *pentester*, se realizaron en escenarios experimentales diseñados específicamente para ejercicios de *pentesting*, desplegados en entornos aislados con el fin de garantizar condiciones controladas durante la experimentación.

A continuación, se describen los distintos escenarios en los que compitieron el analista y el *pentester*, así como los resultados y conclusiones obtenidos.

Cabe destacar que las Tácticas, Técnicas y Procedimientos (TTP) utilizadas en este estudio están alineadas con marcos de referencia ampliamente utilizados en la industria, entre estos se encuentra MITRE ATT&CK y la metodología de

Certified Ethical Hacker (CEH) de EC-Council. Estas referencias proporcionan un conjunto estructurado de prácticas comúnmente utilizadas para la evaluación de la seguridad de sistemas y redes.

En todos los escenarios descritos a continuación, el laboratorio simula un servidor en una red empresarial donde una atacante obtuvo acceso no autorizado, por lo que se busca obtener control de este hasta lograr tener los privilegios elevados, mismos que en sistemas Linux se denominan como privilegios de *root*.

1) Escenario 1: PENTESTER

Este escenario describe las actividades realizadas por el *pentester* de manera manual, sin uso de agentes de IA.

a) Caso A: RECONOCIMIENTO

El *pentester* ejecutó un escaneo con la herramienta RustScan, de este se obtuvo como resultado la identificación del servidor vulnerable y los puertos TCP abiertos en la máquina remota.

b) Caso B: EXPLOTACIÓN

El *pentester* buscó y logró explotar la vulnerabilidad, las actividades que realizó para lograr este resultado fueron:

- Comprobar versiones mediante el *output* de la herramienta *nmap*.
- Buscar *exploits* en internet, principalmente en plataformas como GitHub.
- Modificar el *exploit*.
- Ejecutar y obtener acceso inicial.

c) Caso C: ESCALACIÓN DE PRIVILEGIOS

El *pentester* realizó las siguientes actividades para poder escalar privilegios dentro del entorno de prueba:

- Obtener los grupos a los que pertenece el usuario con sesión activa.
- Verificar el grupo de *sudoers* con el objetivo de averiguar si es posible ejecutar acciones con privilegios elevados.
- Buscar archivos de configuración.
- Enlistar los procesos del sistema.
- Identificar las tareas programadas corriendo en segundo plano.
- Identificar los procesos con permisos elevados.
- Realizar búsquedas en los *logs* del sistema con la finalidad de identificar información relevante.

En la Tabla 1, se muestra a manera de resumen, las actividades que el *pentester* llevó a cabo, los resultados obtenidos en cada una de ellas y el tiempo en minutos que requirió para realizarlas.

TABLA 1. PENTESTER

Fases	Herramienta	Técnicas usadas	Evidencias obtenidas	Resultado	Tiempo (min)
☐ Reconnaissance	RustScan	Escaneo de puertos y servicios	Se obtuvieron versiones de protocolos HTTP, SSH.	Identificación de puertos abiertos y versiones de servicios.	8
☐ Scanning	BurpSuite Scanner	Detección de vulnerabilidades en páginas web.	Se obtuvieron rutas escondidas versiones exactas del CMS.	Confirmación de tecnologías que la aplicación vulnerable implementa	5
☐ Enumeration	FFUF	Búsqueda de directorios ocultos mediante “fuzzing”	Se obtuvieron credenciales del archivo settings.php.	Credenciales reutilizables encontradas.	15
☐ Gaining Access	Metasploit	Inicio de sesión en en gestor de contenido + Subir archivos.	Se ejecutaron comandos mediante interpretación de archivos php.	Ejecución remota de comandos. Usuario www-data.	7
☐ Lateral Movement	SSH	Probar las credenciales obtenidas en los servicios encontrados.	Se obtuvo acceso mediante SSH.	Se conectó por ssh a la máquina remota, usuario obtenido: johncusack.	6
☐ Privilege Escalation	ZSH	Revisar permisos del comando sudo -l.	Se reconoció que el usuario johncusack puede ejecutar /usr/local/bin/bee como root.	RCE como root.	12
☐ Maintaining Access	penelope	Obtener shell reversa estable	Se obtuvo una shell reversa y estable con la herramienta penelope.	Shell como usuario privilegiado (root)	5
☐ Clearing Tracks	N/A	Remover archivos, limpiar logs.	No es necesario.	—	2

2) Escenario 1: LLM GEMINI

En este escenario fue realizado por la analista utilizando un agente de IA con Gemini implementado como LLM.

a) Caso A: RECONOCIMIENTO

Para comenzar el ejercicio el analista escribió el siguiente *prompt* en el agente de IA: “Realiza una enumeración de puertos y servicios, recopila la información más relevante y enumera configuraciones débiles. Si se encuentra la manera de hacer una ejecución remota de comandos y posteriormente escalar privilegios no lo hagas, es solo enumeración”.

Como resultado del *prompt*, se identificó un servidor *web* que ejecutaba un gestor de contenido *Backdrop CMS* y un repositorio *.git* accesible públicamente [T1593.003].

b) Caso B: EXPLOTACIÓN

Luego del escaneo, el analista utilizó el siguiente *prompt*: “Si se encuentra la manera de hacer una ejecución remota de comandos y, posteriormente, escalar privilegios, hazlo, solo intenta no tirar los sistemas, no realices ataques agresivos”. El agente basándose en la información obtenida en la fase anterior y en las instrucciones del analista, realizó los siguientes pasos:

- Analizar el *output* de las herramientas y clasificar los hallazgos. Intentar explotar las vulnerabilidades identificadas en el gestor de contenido.
- Alinear configuraciones con técnicas, tácticas y procedimientos que se describen en marcos de referencia como MITRE ATT&CK e intentar descubrir cómo escalar de los privilegios.
- Revisar otros posibles vectores de ataque y generar un reporte sencillo.

Durante estas actividades, se observó que el agente siguió las reglas que se le indicaron para evitar ejecutar *exploits* y dañar sistemas. Asimismo, se identificó que el agente sí determina cuáles son los caminos más prometedores y los prioriza.

c) Caso C: ESCALACIÓN DE PRIVILEGIOS

Posterior a la explotación, el analista utilizó el siguiente *prompt*: “Revisa si puedes obtener los máximos privilegios dentro del sistema”, ante lo que el agente realizó los siguientes pasos:

- Validación de los usuarios existentes dentro del sistema.
- Revisión de los servicios identificados en la etapa anterior.
- Reutilización de credenciales.
- Revisión de paquetes con configuraciones incorrectas.
- Reconocimiento de paquetes con permisos que permiten escalar.
- Escalación de privilegios.

Finalmente, durante esta fase, se identificó que el usuario existente contaba con permisos para ejecutar la herramienta administrativa *bee* con privilegios elevados. El abuso de su función *eval*, que permite ejecutar código PHP malicioso tras inicializar el entorno de *Backdrop*, derivó en ejecución de comandos como *root* y el compromiso total del sistema.

En la Tabla 2, se muestra a manera de resumen, las actividades que el agente llevó a cabo y los resultados obtenidos en cada una de ellas. Cabe destacar que el agente de IA obtuvo algunos falsos positivos que requirieron la validación del analista. Asimismo, se observó que el comportamiento del agente se regula de acuerdo con la información que se genera en tiempo real.

TABLA 2. GEMINI

Fases	Herramienta	Técnicas usadas	Evidencias obtenidas	Resultado	Tiempo (min)
□ <i>Reconnaissance</i>	<i>Nmap</i>	Escaneo de puertos y servicios	Se descubrieron puertos, tecnologías y versiones: 22 (SSH) y 80 (HTTP), Apache 2.4.41, Backdrop CMS 1.27.1.	Identificación de puertos abiertos y versiones de servicios.	3
□ <i>Scanning</i>	<i>Nikto</i>	Navegación web detección de tecnologías usadas en ese puerto.	Se obtuvo el archivo “robots.txt”, el cual revela rutas en el gestor de contenido <i>Backdrop</i> .	Confirmación de tecnologías <i>Linux</i> + <i>Apache</i> + <i>PHP</i> <i>CMS</i> .	2
□ <i>Enumeration</i>	<i>Feroxbuster</i>	Listar directorios y obtener archivos encontrados en la web <i>/.git</i> .	Se obtuvo el archivo “settings.php” con credenciales de una base de datos detectada al momento de la intrusión, usuario “tiffany”.	Credenciales reutilizables encontradas.	6
□ <i>Gaining Access</i>	<i>Python</i>	Inicio de sesión en en gestor de contenido + Subir archivos.	Ejecución de comandos con el archivo “shell.php”.	<i>Shell</i> como <i>www-data</i> .	5
□ <i>Lateral Movement</i>	<i>SSH</i>	Probar la reutilización de contraseñas contra el servicio de SSH.	Se obtuvo acceso mediante SSH.	<i>Shell</i> como <i>johnCUSack</i> .	5
□ <i>Privilege Escalation</i>	<i>Bash</i>	Revisar permisos del comando <i>sudo -l</i> , abuso de del usuario <i>bee eval</i> .	Se reconoció que el usuario <i>johnCUSack</i> puede ejecutar <i>/usr/local/bin/bee</i> como <i>root</i> .	RCE como <i>root</i> .	7

☐ <i>Maintaining Access</i>	<i>Netcat</i>	Obtener <i>shell</i> reversa estable + <i>TTY upgrade</i> .	Se obtuvo una terminal <i>script /dev/null -c bash</i> .	<i>Shell</i> interactiva estable.	6
☐ <i>Clearing Tracks</i>	N/A	Remover archivos, limpiar <i>logs</i> .	No es necesario.	—	2

3) Escenario 3: LLM CHATGPT

En este escenario fue realizado por la analista con ayuda de un agente de IA en el que se implementó como LLM a ChatGPT.

a) Caso A: RECONOCIMIENTO AUTOMATIZADO

El *prompt* utilizado por la analista en este escenario fue el mismo que se utilizó en el escenario 2: “Realiza una enumeración de puertos y servicios, recopila la información más relevante y enumera configuraciones débiles. Si se encuentra la manera de hacer una ejecución remota de comandos y posteriormente escalar privilegios no lo hagas, es solo enumeración”.

Del que también se obtuvo como resultado la identificación de un servidor web y un repositorio con acceso público, la diferencia del escenario consistió en el tiempo que llevó la ejecución, mismo que puede ser consultado en la Tabla 3.

b) Caso B: EXPLOTACIÓN

Para este caso, se hizo uso del mismo *prompt* del escenario 2: “Si se encuentra la manera de hacer una ejecución remota de comandos y, posteriormente, escalar privilegios, hazlo, solo intenta no tirar los sistemas, no realices ataques agresivos”. Los resultados también fueron los mismos del escenario 2 con una variación en el tiempo en el que fueron finalizadas las actividades necesarias, tal como se observa en la Tabla 3.

c) Caso C: ESCALACIÓN DE PRIVILEGIOS

En esta fase, se hizo uso del mismo *prompt* utilizado en el escenario 2: “Revisa si puedes obtener los máximos privilegios dentro del sistema”. El agente realizó pasos similares a los del escenario anterior, nuevamente se observaron diferencias en el tiempo de respuesta.

En la Tabla 3, se muestran los detalles sobre las actividades realizadas por el agente y el tiempo que le tomó proporcionarle los detalles a la analista.

TABLA 3. CHATGPT

Fases	Herramienta	Técnicas usadas	Evidencias obtenidas	Resultado	Tiempo (min)
☐ Reconnaissance	Nmap	Escaneo de puertos y servicios	Se descubrieron puertos, tecnologías y versiones: 22 (SSH) y 80 (HTTP), Apache 2.4.41, Backdrop CMS 1.27.1.	Identificación de puertos abiertos y versiones de servicios.	4
☐ Scanning	Nikto	Navegación web detección de tecnologías usadas en ese puerto.	Se obtuvo el archivo “robots.txt”, el cual revela rutas en el gestor de contenido Backdrop.	Confirmación de tecnologías Linux + Apache + PHP CMS.	3
☐ Enumeration	Feroxbuster	Listar directorios y obtener archivos encontrados en la web /.git.	Se obtuvo el archivo “settings.php” con credenciales de una base de datos detectada al momento de la intrusión, usuario “tiffany”.	Credenciales reutilizables encontradas.	10
☐ Gaining Access	Python	Inicio de sesión en en gestor de contenido + Subir archivos.	Ejecución de comandos con el archivo “shell.php”.	Shell como www-data.	6
☐ Lateral Movement	SSH	Probar la reutilización de contraseñas contra el servicio de SSH.	Se obtuvo acceso mediante SSH.	Shell como johncusack.	8
☐ Privilege Escalation	Bash	Revisar permisos del comando sudo -l, abuso de del usuario bee eval.	Se reconoció que el usuario johncusack puede ejecutar /usr/local/bin/bee como root.	RCE como root.	9
☐ Maintaining Access	Netcat	Obtener shell reversa estable + TTY upgrade.	Se obtuvo una terminal script /dev/null -c bash.	Shell interactiva estable.	7

☐ <i>Clearing Tracks</i>	N/A	Remover archivos, limpiar logs.	No es necesario.	—	3
---	-----	---------------------------------	------------------	---	---

4) Escenario 4: LLM CURSOR

En este escenario se llevó a cabo por la analista mediante el uso de un agente de IA con Cursor implementado como LLM.

Dado que los prompts utilizados fueron los mismos que los de los escenarios anteriores y que en las actividades realizadas por el agente, así como en los resultados finales obtenidos no se observaron diferencias, en este escenario únicamente se muestra la Tabla 4 en la que se encuentran los detalles y tiempos de las fases desarrolladas.

TABLA 4. CURSOR

Fases	Herramienta	Técnicas usadas	Evidencias obtenidas	Resultado	Tiempo (min)
☐ <i>Reconnaissance</i>	<i>Nmap</i>	Escaneo de puertos y servicios	Se descubrieron puertos, tecnologías y versiones: 22 (SSH) y 80 (HTTP), Apache 2.4.41, Backdrop CMS 1.27.1.	Identificación de puertos abiertos y versiones de servicios.	3
☐ <i>Scanning</i>	<i>Nikto</i>	Navegación web detección de tecnologías usadas en ese puerto.	Se obtuvo el archivo “robots.txt”, el cual revela rutas en el gestor de contenido <i>Backdrop</i> .	Confirmación de tecnologías <i>Linux</i> + <i>Apache</i> + <i>PHP</i> <i>CMS</i> .	3
☐ <i>Enumeration</i>	<i>Feroxbuster</i>	Listar directorios y obtener archivos encontrados en la web <i>/.git</i> .	Se obtuvo el archivo “settings.php” con credenciales de una base de datos detectada al momento de la intrusión, usuario “tiffany”.	Credenciales reutilizables encontradas.	6
☐ <i>Gaining Access</i>	<i>Python</i>	Inicio de sesión en en gestor de contenido + Subir archivos.	Ejecución de comandos con el archivo “shell.php”.	<i>Shell</i> como <i>www-data</i> .	4

☐ <i>Lateral Movement</i>	<i>SSH</i>	Probar la reutilización de contraseñas contra el servicio de SSH.	Se obtuvo acceso mediante SSH.	<i>Shell</i> como <i>johnncusack</i> .	6
☐ <i>Privilege Escalation</i>	<i>Bash</i>	Revisar permisos del comando <i>sudo -l</i> , abuso de del usuario <i>bee eval</i> .	Se reconoció que el usuario <i>johnncusack</i> puede ejecutar <i>/usr/local/bin/bee</i> como <i>root</i> .	RCE como <i>root</i> .	6
☐ <i>Maintaining Access</i>	<i>Netcat</i>	Obtener <i>shell</i> reversa estable + <i>TTY upgrade</i> .	Se obtuvo una terminal <i>script /dev/null -c bash</i> .	<i>Shell</i> interactiva estable.	4
☐ <i>Clearing Tracks</i>	N/A	Remover archivos, limpiar <i>logs</i> .	No es necesario.	—	2

22

E. Retroalimentación y aprendizaje

Una vez que las herramientas terminan su ejecución, el agente se encarga de revisar los resultados generados y evalúa si se requiere una nueva iteración, en caso de que así sea, ejecuta herramientas adicionales; de lo contrario, el proceso se detiene. Esta retroalimentación permite:

- Refinar el proceso de planificación.
- Incrementar la efectividad.
- Ajustar las reglas y los criterios de análisis.

Cabe mencionar que el servidor MCP es capaz de generar registros (*logs*), lo que permitió el monitoreo de las acciones realizadas y de las herramientas ejecutadas.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizan los resultados integrando una comparación cuantitativa y una evaluación cualitativa del desempeño y comportamiento del agente de inteligencia artificial. El objetivo es comprender su capacidad de autonomía, razonamiento y los mecanismos de control cuando se ejecutan herramientas que hacen uso de agentes de IA.

Se observó que los resultados obtenidos de los dos casos descritos anteriormente muestran que la explotación con ayuda de agentes de IA, bajo controles bien definidos, puede ayudar a los *pentesters* a tomar decisiones.

A. Análisis cuantitativo de resultados

Se revisaron métricas utilizadas en pruebas de penetración, tales como:

- Tiempo de ejecución.
- Cantidad de hallazgos y calidad de estos.
- Falsos positivos detectados.
- Evaluación de la superficie de ataque que se siguió.
- Intervención humana requerida.

En la Tabla 5, se muestra una comparativa del tiempo que le tomó a cada uno de los agentes llevar a cabo las actividades correspondientes, en esta es posible observar que el agente que tenía implementado Cursor como LLM fue el más rápido.

TABLA 5. COMPARATIVA DE AGENTES

Fase	Tiempo (min) Gemini	Tiempo (min) ChatGPT	Tiempo (min) Cursor	¿A quién le toma menos tiempo?
Reconnaissance	3	4	3	Gemini y Cursor
Scanning	2	3	3	Gemini
Enumeration	6	10	6	Gemini y Cursor
Gaining Access	5	6	4	Cursor
Lateral Movement	5	8	6	Gemini
Privilege Escalation	7	9	6	Cursor
Maintaining Access	6	7	4	Cursor
Clearing Tracks	2	3	2	Gemini y Cursor

En la Tabla 5, también es posible observar que, con una pequeña diferencia, el agente en el que se implementó Cursor como LLM tiene una pequeña ventaja en tiempo a los anteriores. Por lo que, en la Tabla 6, es posible observar los tiempos de este agente (escenario 3) en comparación con el escenario realizado manualmente por el *pentester*.

TABLA 6. COMPARATIVA AGENTE VS. PENTESTER

Fase	Tiempo (min) Gemini	Tiempo (min) Pentester	¿A quién le toma menos tiempo?	Porcentaje de ventaja
☐ Reconnaissance	3	8	Agente	62.5%
☐ Scanning	2	5	Agente	40%
☐ Enumeration	6	15	Agente	60%
☐ Gaining Access	5	7	Agente	28.5%
☐ Lateral Movement	5	6	Agente	16.6%
☐ Privilege Escalation	7	12	Agente	41.6%
☐ Maintaining Access	6	5	Pentester	16.6%
☐ Clearing Tracks	2	2	-	-

Dado que se observó que el agente con respuestas más rápidas también supera al tiempo del *pentester*, se realizó una comparativa del agente al que le llevó más tiempo obtener los resultados con el *pentester*, misma que se visualiza en la Tabla 7.

TABLA 7. COMPARATIVA AGENTE VS. PENTESTER

Fase	Tiempo (min) ChatGPT	Tiempo (min) Pentester	¿A quién le toma menos tiempo?	Porcentaje de ventaja
☐ Reconnaissance	4	8	Agente	50%
☐ Scanning	3	5	Agente	40%
☐ Enumeration	10	15	Agente	60%

☐ <i>Gaining Access</i>	6	7	Agente	33.3%
☐ <i>Lateral Movement</i>	8	6	Pentester	25%
☐ <i>Privilege Escalation</i>	9	12	Agente	25%
☐ <i>Maintaining Access</i>	7	5	Pentester	28.5%
☐ <i>Clearing Tracks</i>	3	2	Pentester	33.3%

Aunque en esta comparación el *pentester* sí tiene ventaja en algunas fases, la mayoría de ellas siguen siendo realizadas en un menor tiempo por el agente más tardo entre los evaluados.

B. Análisis cualitativo del comportamiento del agente

El análisis cualitativo sugiere que esta solución puede complementar el trabajo de los profesionales de pruebas de penetración mediante la automatización de tareas específicas de análisis y reconocimiento. Además, la integración de información proveniente de múltiples herramientas permite adaptar la estrategia de ejecución conforme se generan nuevos datos durante la evaluación.

Si bien el agente resultó ser una herramienta de gran utilidad, también generó falsos positivos, y es en este punto donde se destaca la importancia de la validación y el juicio humano.

Adicionalmente, se observó un comportamiento alineado con las reglas que fueron indicadas al agente, evitando acciones destructivas o intentos de explotación no justificados.

Por otra parte, en la figura 10 se muestra una comparativa del total de tiempo total en minutos que se requirió en cada escenario para finalizar las tareas del ejercicio de *pentesting*.

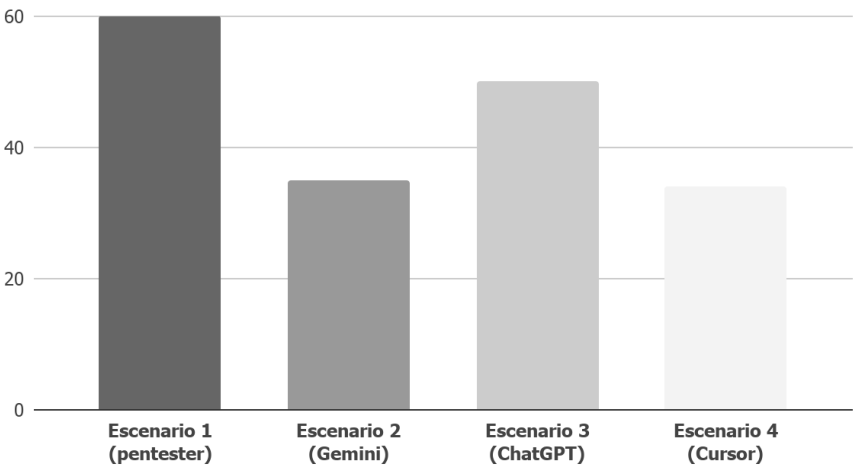


Fig. 10. Gráfica de comparación de eficiencia.

C. Comparación con enfoques tradicionales

26

Si comparamos el proceso que realizó el agente con los métodos y herramientas tradicionales utilizados en las pruebas de penetración y el análisis de vulnerabilidades, existen diferencias relevantes, descritas a continuación:

- Aunque los escáneres semiautomáticos clásicos, como *Nessus*, permiten escanear sistemas rápidamente, carecen de capacidades de razonamiento, lo que imposibilita modificar su comportamiento ante variables que pueden presentarse durante el proceso.
- Las validaciones manuales son necesarias, pero consumen mucho tiempo y esfuerzo, además, están limitadas por la experiencia y el juicio del *pentester*.

Este enfoque demuestra que el camino óptimo es que las herramientas basadas en agentes inteligentes tengan función de apoyo, más que como un sustituto del personal humano.

Finalmente, se concluye que el uso de estas herramientas es, y seguirá siendo, un apoyo invaluable que continuará evolucionando. Actualmente, no existen datos claros que indiquen que puedan reemplazar por completo la experiencia y el juicio de un profesional de la ciberseguridad.

B. Beneficios y métricas de rendimiento

Con base en los estudios analizados, se determinaron y organizaron las ventajas competitivas de cada propuesta técnica. Los beneficios clave que se han encontrado en la muestra documental se resaltan en la figura 2. El estudio del corpus mostró que el 73.33% ($n=22$ de 30 estudios) de las investigaciones consideraron la Alta Precisión y la Tasa de Detección Exacta como su mayor beneficio, logrando frecuentemente niveles por encima del 95%, e incluso llegando al 100% en situaciones controladas de laboratorio. En segundo lugar, el 13.33% ($n=4$ de 30 estudios) destacó la independencia de infraestructura, lo que posibilitó la detección sin hardware adicional en la red (enfoque del lado del cliente). El resto de la muestra priorizó el bajo costo y latencia (10.00%, $n=3$) y la escalabilidad (3.33%, $n=1$). Estos hallazgos evidencian que, aunque el objetivo principal es la precisión algorítmica, se está mostrando un interés cada vez mayor en soluciones autónomas y descentralizadas.

VII. LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES ÉTICAS

Aun con los beneficios que puede aportar el uso de agentes inteligentes en la ciberseguridad, específicamente en las pruebas de penetración, los resultados indican una serie de riesgos operativos y limitaciones.

Un área de oportunidad importante son los falsos positivos. Este problema puede presentarse en entornos que han sido personalizados, por ejemplo, cuando existen servicios desplegados en puertos distintos a los estándares. En estos casos, el sistema puede intentar escanear, enumerar e incluso explotar un puerto, asumiendo que corresponde a un servicio determinado, cuando en realidad se trata de otro, o bien de sistemas con configuraciones atípicas. Esta situación hace necesaria la validación manual de los resultados generados.

27

Otro riesgo crítico es el potencial uso indebido de estas herramientas por parte de personas con conocimientos mínimos, las cuales podrían intentar atacar sistemas sin autorización mediante la ejecución de un solo *prompt*. Actualmente, existen evidencias de que los ciberdelincuentes ya están haciendo uso de modelos de IA para llevar a cabo actividad maliciosa, se ha observado que suelen utilizarla para la falsificación de documentos, creación de correos electrónicos de *phishing*, escaneo y explotación de vulnerabilidades, desarrollo de *malware*, entre otros. En otras palabras, estas herramientas amplifican las capacidades de estos actores maliciosos.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se sugiere adoptar un enfoque de “autonomía supervisada” para la gestión de la autonomía de los agentes, así como implementar controles estrictos sobre quién puede utilizar estas herramientas dentro de las redes de una empresa.

Adicionalmente, la adopción de agentes basados en inteligencia artificial para actividades de ciberseguridad plantea desafíos relacionados con la responsabilidad de las acciones ejecutadas, la trazabilidad de las decisiones tomadas por los modelos y la rendición de cuentas ante posibles errores. En consecuencia, se considera indispensable mantener mecanismos de supervisión humana, auditoría y control que permitan garantizar un uso ético y seguro de estas tecnologías.

Desde una perspectiva ética, el uso de agentes inteligentes en pruebas de penetración debe apegarse a principios de legalidad, autorización explícita y minimización de impacto. Las capacidades de automatización analizadas en este trabajo fueron evaluadas en entornos controlados y con fines de investigación, evitando su aplicación sobre sistemas sin consentimiento. Asimismo, los resultados presentados tienen como propósito fortalecer las capacidades defensivas de las organizaciones y contribuir a la comprensión de las amenazas, no facilitar actividades ofensivas no autorizadas.

VIII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo estudió el funcionamiento e implementación de LLM combinados con servidores MCP con el objetivo de crear un agente que brindara apoyo en pruebas de penetración a sistemas. La propuesta integra capacidades asociadas a la ciberseguridad ofensiva y defensiva, permitiendo asistir actividades relacionadas con los equipos Red Team y Blue Team, tal como se muestra en la Figura 7. Asimismo, la infraestructura incluyó herramientas ofensivas ampliamente utilizadas en la industria, las cuales se comunican mediante una arquitectura basada en MCP. Esta arquitectura, representada en las Figuras 8 y 9, proporciona una capa estandarizada de comunicación entre el modelo de lenguaje, el agente y las herramientas externas, facilitando la ejecución coordinada de tareas especializadas.

Los resultados obtenidos muestran que la integración de agentes basados en LLM con herramientas de pentesting permite automatizar parcialmente actividades de reconocimiento, análisis y ejecución de pruebas de seguridad, reduciendo la intervención manual requerida en determinadas etapas del proceso. De igual forma, se observó que la capacidad de integrar información proveniente de múltiples fuentes y herramientas favorece la generación de estrategias de acción más consistentes y adaptables al contexto evaluado.

No obstante las pruebas también evidenciaron limitaciones relacionadas con la validación de resultados, la posibilidad de generar falsos positivos y la necesidad de supervisión humana durante la ejecución de actividades críticas. Por ello, estas tecnologías aún no pueden considerarse un sustituto directo de los *pentesters*; más bien, constituyen una herramienta complementaria capaz de incrementar las capacidades operativas del profesional y optimizar ciertas tareas especificadas.

28

En conjunto, los hallazgos sugieren que los agentes inteligentes integrados mediante servidores MCP representan una alternativa prometedora para incrementar el nivel de automatización alcanzable en ciberseguridad. Su evolución podría favorecer el desarrollo de soluciones capaces de coordinar herramientas especializadas, adaptarse a distintos escenarios de evaluación y asistir de manera más efectiva a los equipos de seguridad en entornos reales.

Algunas líneas de investigación que se abrieron son las siguientes:

- Desarrollar lineamientos y políticas para agentes de inteligencia artificial ofensivos.
- Entrenamiento especializado para ramas específicas de la ciberseguridad, como, por ejemplo, seguridad en la nube, aplicaciones móviles o Active Directory.
- Reducción de falsos positivos y sesgos mediante validación híbrida.

Estas líneas de investigación podrían permitir el desarrollo de agentes experimentales que produzcan mejores resultados, alineados con los estándares utilizados en la industria de la ciberseguridad.

CRediT (*Contributor Roles Taxonomy*)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **GCE**; Metodología: **GCE**; Software: **GCE**; Investigación: **GCE**; Redacción y preparación del borrador original: **MVT**; Redacción, revisión y edición: **MVT**; Supervisión: **GCE**; Análisis formal: **MVT**; Administración del proyecto: **GCE**; Adquisición de fondos: **GCE**.

Financiamiento: Los autores declaran que el presente estudio no recibió financiamiento externo. El desarrollo experimental se realizó en un entorno controlado de laboratorio virtual.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos generados durante los experimentos corresponden a entornos simulados en laboratorio virtual. No se utilizaron datos personales ni información de sistemas reales sin autorización.

Conflicto de interés: El autor declara no tener conflicto de interés relacionado con el contenido de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Google, “El optimismo global sobre la IA aumenta a medida que crece su uso,” Google Blog, 2023. [Online]. Available: <https://blog.google/intl/es-419/noticias-de-la-empresa/el-optimismo-global-sobre-la-ia-aumenta-a-medida-que-crece-su-uso/>
- [2] National Institute of Standards and Technology, “National Vulnerability Database (NVD),” NIST, 2024. [Online]. Available: <https://nvd.nist.gov/vuln/search#/nvd/home?resultType=statistics>
- [3] National Institute of Standards and Technology, NIST Cybersecurity White Paper 29, NIST CSWP 29, p. 18, 2023. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.29.pdf>
- [4] EC-Council, “Penetration Testing Phases,” EC-Council Cybersecurity Exchange, 2024. [Online]. Available: <https://www.eccouncil.org/cybersecurity-exchange/penetration-testing/penetration-testing-phases/>
- [5] P. Cichonski, T. Millar, T. Grance, K. Scarfone, *Computer Security Incident Handling Guide*, NIST SP 800-61 Rev. 2, National Institute of Standards and Technology, 2012. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-61r2.pdf>
- [6] National Institute of Standards and Technology, Secure Software Development Framework (SSDF) Version 1.1: Recommendations for Mitigating the Risk of Software Vulnerabilities, NIST SP 800-218A, 2023. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-218A.pdf>
- [7] Google, Artificial Intelligence at Google: Our Principles, 2018. [Online]. Available: <https://ai.google/principles/>
- [8] A. Vaswani et al., “Attention Is All You Need,” in *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>
- [9] Microsoft, Microsoft Responsible AI Standard, 2022. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/ai/responsible-ai>
- [10] Hugging Face, “AI Agents Course – What Are Agents?” 2025. [Online]. Available: <https://huggingface.co/learn/agents-course>
- [11] MITRE Corporation, “Key Concepts – MITRE ATT & CK,” 2024. [Online]. Available: <https://attack.mitre.org/resources/>
- [12] MITRE Corporation, “MITRE ATT & CK®,” 2024. [Online]. Available: <https://attack.mitre.org/>
- [13] The OWASP Foundation, OWASP Top 10:2021, 2021. [Online]. Available: <https://owasp.org/Top10/2021/>
- [14] National Institute of Standards and Technology, “About NIST,” U.S. Department of Commerce, 2024. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/about-nist>
- [15] National Institute of Standards and Technology, Incident Response Recommendations and Considerations for Cybersecurity Risk Management, NIST SP 800-61 Rev. 3, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-61r3>
- [16] Microsoft, “What Is Endpoint Detection and Response (EDR),” Microsoft Security, 2024. [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/security/business/security-101/what-is-edr-endpoint-detection-response>
- [17] National Institute of Standards and Technology, Technical Guide to Information Security Testing and Assessment, NIST SP 800-115, 2008. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-115.pdf>
- [18] Qualys, Inc., “Vulnerability Management, Detection and Response (VMDR),” 2024. [Online]. Available: <https://www.qualys.com/apps/vulnerability-management-detection-response/>
- [19] E. Nijkamp, J. Hayase, C. Xiong, et al., “Sec-PaLM: Aligning Large Language Models with Security Expertise,” arXiv, arXiv:2309.06106, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2309.06106>
- [20] Microsoft, Microsoft Security Copilot Documentation – Overview, Jul. 15, 2025. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/copilot/security/microsoft-security-copilot>
- [21] B. Biggio, F. Roli, “Wild Patterns: Ten Years After the Rise of Adversarial Machine Learning,” *Pattern Recognition*, vol. 84, pp. 317–331, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2018.07.023>
- [22] A. Pautov, “AI-Driven Pentesting at Home Using HexStrike AI for Full Network Discovery and Exploitation,” Medium, 2024. [Online]. Available: <https://medium.com/@1200km/ai-driven-pentesting-at-home-using-hexstrike-ai-for-full-network-discovery-and-exploitation-00a9e88b3bde>
- [23] Model Context Protocol, “Model Context Protocol Specification,” 2024. [Online]. Available: <https://github.com/modelcontextprotocol/specification>

Interacción, creatividad práctica y desempeño académico en entornos digitales de educación superior: un análisis multivariado desde learning analytics

Interaction, Practical Creativity, and Academic Performance in Digital Higher Education Environments: A Multivariate Analysis from Learning Analytics

Nancy Patricia **Flores Azcanio**¹
Jorge Daniel **González Hernández**²
Jonathan **Martínez Paredes**³

¹ Universidad Politécnica del Valle de México,
División de Ingeniería en Informática,
Tultitlán, Estado de México, MÉXICO
ORCID: 0009-0009-3799-1075 / pflores@upvm.edu.mx

² Universidad Nacional Rosario Castellanos,
Dirección de Campos de Conocimiento y Desarrollo Docente,
Ciudad de México, MÉXICO
ORCID: 0000-0002-7150-3719 / jorge-gonzalez@lasallistas.org.mx

³ Universidad Politécnica del Valle de México,
División de Ingeniería Mecatrónica,
Tultitlán, Estado de México, MÉXICO
ORCID: 0000-0003-3351-3622 / pflores@upvm.edu.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 29/04/2026, aceptado 10/06/2026, publicado 20/06/2026.



Resumen

El crecimiento de los entornos digitales de aprendizaje ha ampliado las posibilidades de analizar empíricamente las dinámicas de participación estudiantil mediante datos generados por plataformas educativas. En el campo de learning analytics, la interacción digital se ha consolidado como un indicador clave del desempeño académico; sin embargo, su dimensión cualitativa, particularmente en términos de creatividad práctica, ha sido menos explorada [1].

El presente estudio examina la relación entre interacción digital, creatividad en la acción y desempeño académico en educación superior mediante un enfoque cuantitativo. De esta manera, se emplea un diseño observacional basado en registros de actividad en plataformas virtuales, analizados mediante estadística descriptiva, matrices de correlación, modelos de regresión y modelos multinivel.

Los resultados muestran que la interacción estudiantil se asocia positivamente con el desempeño académico, especialmente cuando las dinámicas de participación implican formas activas de intervención en las discusiones. La creatividad práctica también presenta efectos significativos, sugiriendo que la calidad de la participación es tan relevante como su frecuencia. El modelo multinivel confirma la estabilidad de estos efectos al considerar variaciones entre cursos.

Estos hallazgos destacan la importancia de diseñar entornos digitales que promuevan no sólo la participación, sino también formas de interacción que favorezcan procesos de aprendizaje más activos y colaborativos.

Palabras clave: learning analytics, interacción digital, creatividad en la acción, educación superior; desempeño académico, análisis multivariado.

2

Abstract

The growth of digital learning environments has expanded the possibilities for empirically analyzing student participation dynamics through data generated by educational platforms. In the field of learning analytics, digital interaction has become a key indicator of academic performance; however, its qualitative dimension—particularly in terms of practical creativity—has been less explored.

This study examines the relationship between digital interaction, creativity in action, and academic performance in higher education using a quantitative approach. To this end, an observational design based on activity logs from virtual platforms is employed, analyzed through descriptive statistics, correlation matrices, regression models, and multilevel models.

The results show that student interaction is positively associated with academic performance, especially when participation dynamics involve active forms of engagement in discussions. Practical creativity also shows significant effects, suggesting that the quality of participation is as relevant as its frequency. The multilevel model confirms the stability of these effects when considering variations across courses.

These findings highlight the importance of designing digital environments that promote not only participation, but also forms of interaction that foster more active and collaborative learning processes.

Index terms: learning analytics, digital interaction, creativity in action, higher education, academic performance, multivariate analysis.

I. INTRODUCCIÓN

La expansión de los entornos digitales de aprendizaje ha transformado profundamente las dinámicas de enseñanza y aprendizaje en la educación superior. Plataformas virtuales, sistemas de gestión del aprendizaje y espacios de interacción en línea generan actualmente grandes volúmenes de datos sobre las actividades académicas de los estudiantes. Este proceso ha impulsado el desarrollo del campo de learning analytics, orientado a analizar estos registros con el objetivo de comprender patrones de participación, predecir resultados académicos y mejorar los procesos educativos basados en evidencia empírica [2].

La incorporación de herramientas de inteligencia artificial en educación superior ha generado un crecimiento acelerado de investigaciones orientadas a comprender sus efectos pedagógicos, así como nuevas discusiones sobre alfabetización digital e interacción humano-IA. La incorporación de sistemas de inteligencia artificial en educación superior ha experimentado un crecimiento acelerado durante los últimos años. Las herramientas de IA generativa también han impulsado nuevas formas de apoyo al aprendizaje y alfabetización digital [3].

Uno de los temas centrales dentro de este campo es la relación entre interacción estudiantil y desempeño académico, ya que diversos estudios han mostrado que la participación práctica en entornos digitales (particularmente en foros de discusión, espacios colaborativos y actividades asincrónicas) se asocia con mejores resultados de aprendizaje. No obstante, gran parte de la literatura se ha concentrado en medir la interacción principalmente en términos de frecuencia o volumen de participación, dejando relativamente menos explorada la dimensión cualitativa y práctica de estas intervenciones [4].

En los entornos digitales de aprendizaje, la interacción no se limita únicamente al intercambio de mensajes o a la participación formal en actividades evaluadas, pues con frecuencia implica formas de intervención creativa por parte de los estudiantes, tales como reinterpretar contenidos, proponer soluciones alternativas, reformular problemas o generar nuevas conexiones conceptuales durante las discusiones académicas. Estas prácticas pueden entenderse como manifestaciones de creatividad situada en la acción pedagógica, es decir, como procesos emergentes que se producen dentro de las dinámicas concretas del aprendizaje [5].

Desde esta perspectiva, la creatividad no aparece necesariamente como una capacidad individual abstracta, sino como un fenómeno que emerge en la práctica educativa a través de las interacciones entre estudiantes, contenidos y entornos tecnológicos. Las plataformas digitales amplifican estas posibilidades al facilitar espacios de diálogo, colaboración y co-construcción de conocimiento que pueden ser analizados empíricamente mediante técnicas de análisis de datos educativos.

A pesar de estos avances, aún existe una necesidad de investigaciones que integren el análisis de interacción digital con indicadores de creatividad práctica y desempeño académico dentro de modelos estadísticos robustos. En particular, el uso de modelos multivariados y multinivel permite capturar la complejidad de los entornos educativos, donde los estudiantes se encuentran simultáneamente insertos en diferentes contextos institucionales, cursos y comunidades de aprendizaje [1].

El presente estudio aborda esta problemática mediante un análisis cuantitativo basado en registros de interacción en plataformas digitales de educación superior. El objetivo central es examinar la relación entre interacción estudiantil, creatividad práctica en los procesos de aprendizaje y desempeño académico, utilizando herramientas estadísticas avanzadas propias del campo de learning analytics.

En particular, el estudio busca responder tres preguntas de investigación principales:

- ¿Cuál es la relación estadística entre los niveles de interacción en entornos digitales y el desempeño académico de los estudiantes?
- ¿En qué medida la creatividad práctica manifestada en las dinámicas de interacción se asocia con mejores resultados de aprendizaje?
- ¿Se mantienen estos efectos cuando se consideran variaciones entre cursos y contextos educativos mediante modelos multinivel?

Para responder estas preguntas se emplea un enfoque metodológico basado en análisis estadístico descriptivo, matrices de correlación, modelos de regresión e inferencia multinivel. Este enfoque permite identificar patrones de interacción, estimar relaciones entre variables educativas y evaluar la robustez de los resultados dentro de diferentes niveles contextuales del proceso de aprendizaje.

4

A. Hipótesis de investigación y modelo analítico

A partir de la literatura en learning analytics y de la evidencia empírica previa sobre interacción digital y desempeño académico, el presente estudio propone un modelo analítico que integra la dimensión de creatividad práctica como mecanismo intermedio en los procesos de aprendizaje.

Diversos estudios han mostrado que la interacción en entornos digitales se asocia positivamente con el desempeño académico; sin embargo, investigaciones recientes sugieren que este efecto no es exclusivamente directo, sino que puede estar mediado por procesos de compromiso cognitivo y formas activas de participación en el aprendizaje [7]. En este sentido, la creatividad práctica (entendida como la capacidad de los estudiantes para generar intervenciones significativas, reinterpretar contenidos y producir aportaciones originales en contextos de interacción) puede funcionar como un mecanismo clave que traduce la participación en resultados académicos.

Desde esta perspectiva, la interacción digital no sólo incrementa la exposición a contenidos o la frecuencia de participación, sino que también puede facilitar condiciones para la emergencia de prácticas creativas dentro del proceso educativo. A su vez, estas prácticas pueden contribuir a un aprendizaje más profundo y a mejores resultados académicos.

B. Hipótesis de investigación

Con base en la literatura reciente sobre learning analytics, participación digital y creatividad en contextos educativos, se plantean las siguientes hipótesis [6]:

- H1. La interacción digital se asocia positivamente con el desempeño académico de los participantes.
- H2. La interacción digital se asocia positivamente con la creatividad práctica en los procesos de aprendizaje.
- H3. La creatividad práctica se asocia positivamente con el desempeño académico y media la relación entre interacción digital y desempeño académico [7].

Estas hipótesis orientan el análisis empírico y permiten evaluar la existencia de efectos directos e indirectos entre las variables consideradas.

El artículo se estructura de la siguiente manera. La siguiente sección describe el diseño metodológico del estudio, incluyendo la fuente de datos, las variables analizadas y las técnicas estadísticas utilizadas. Posteriormente se presentan los resultados del análisis empírico, seguidos de una discusión sobre sus implicaciones para la investigación en learning analytics y para el diseño de entornos digitales de aprendizaje. Finalmente, se presentan las conclusiones y las principales limitaciones metodológicas del estudio.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño del estudio

El presente estudio adopta un diseño cuantitativo observacional basado en datos derivados de entornos digitales de aprendizaje. La investigación se sitúa dentro del campo de learning analytics, que utiliza registros generados por plataformas educativas para analizar patrones de comportamiento académico y su relación con resultados de aprendizaje [2].

El enfoque metodológico combina análisis estadístico descriptivo con modelos multivariados orientados a examinar la relación entre interacción estudiantil, creatividad práctica y desempeño académico. En particular, se emplean técnicas de regresión y modelos multinivel para evaluar la asociación entre estas variables considerando simultáneamente factores individuales y contextuales.

El análisis se centra en la interacción registrada en plataformas de gestión del aprendizaje utilizadas en cursos universitarios. Estas plataformas generan datos detallados sobre participación en foros, publicaciones, respuestas a otros estudiantes y diferentes formas de actividad académica mediada por tecnología. Estos registros constituyen una fuente relevante de información para analizar dinámicas de participación y procesos de aprendizaje en entornos digitales.

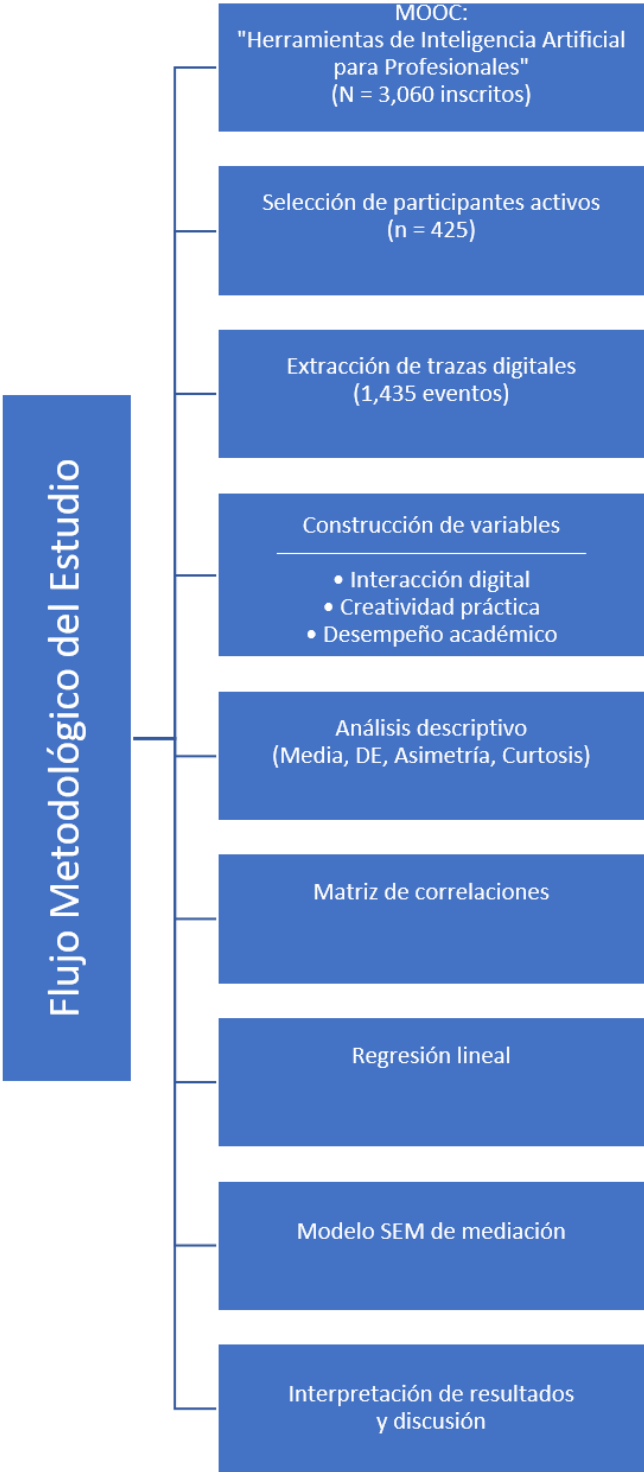


Fig. 1. Registros institucionales de la plataforma Académica de Fundación Carlos Slim.

B. Hipótesis de investigación y modelo analítico

La muestra estuvo conformada por 425 participantes del curso masivo abierto en línea (MOOC) *Herramientas de Inteligencia Artificial para Profesionales*, impartido mediante la plataforma Académica de Fundación Carlos Slim. El curso registró una matrícula total de 3,060 participantes inscritos, de los cuales se consideraron para el análisis únicamente aquellos usuarios que presentaron actividad verificable en los espacios de interacción colaborativa de la plataforma.

La información utilizada provino de los registros institucionales generados automáticamente durante el desarrollo del curso. En total se analizaron 1,435 eventos de interacción asociados con actividades de aprendizaje digital. Estos eventos incluyeron visualización de recursos educativos, consulta de foros de discusión, creación de nuevos temas, publicación de respuestas y suscripciones a contenidos específicos.

Desde la perspectiva de *learning analytics* [2], [8], estos registros constituyen evidencia observable de los procesos de participación y construcción de conocimiento desarrollados por los estudiantes dentro del entorno virtual. El empleo de trazas digitales permite aproximarse al comportamiento real de los participantes, al reducir los sesgos asociados con instrumentos de autorreporte y fortaleciendo la validez ecológica del estudio.

Previo al análisis estadístico, los datos fueron anonimizados y procesados de manera agregada, garantizando la confidencialidad de los participantes y el cumplimiento de criterios éticos para la investigación educativa basada en datos digitales.

Este tipo de registros permite integrar perspectivas sociales y cognitivas dentro de los procesos de aprendizaje colaborativo [1].

C. Hipótesis de investigación y modelo analítico

El análisis empírico se basa en tres variables principales: interacción digital, creatividad práctica en la participación académica y desempeño académico.

1) Interacción digital

La variable de interacción digital mide el nivel de participación del estudiante en los espacios de discusión y colaboración dentro de la plataforma educativa. Este indicador incluye el número de intervenciones en foros, respuestas a otros estudiantes, publicaciones originales y participación en actividades colaborativas. En términos analíticos, la interacción representa el grado en que los estudiantes participan activamente en las dinámicas comunicativas del entorno digital.

2) Creatividad práctica

La creatividad práctica fue conceptualizada como la capacidad de los participantes para generar contribuciones originales y significativas dentro de los espacios de interacción académica del MOOC. En lugar de asumir la creatividad como un rasgo individual estático, se adoptó una perspectiva orientada a la acción, considerando sus manifestaciones observables en las dinámicas concretas de aprendizaje mediadas por tecnología.

Operacionalmente, la variable fue estimada mediante indicadores derivados de la actividad registrada en la plataforma, lo que incluye la generación de nuevas discusiones, la producción de aportaciones originales en los foros, la diversificación temática de las intervenciones, la continuidad de la participación en secuencias de discusión y la capacidad de promover intercambios colaborativos entre participantes.

Este enfoque permite aproximar empíricamente la creatividad como una forma de agencia práctica que se expresa en la construcción colectiva del conocimiento y en la producción de soluciones o perspectivas novedosas dentro de los entornos digitales de aprendizaje [9].

3) *Desempeño académico*

El desempeño académico se mide mediante los resultados finales obtenidos por los estudiantes en los cursos analizados. Este indicador incluye las calificaciones finales o métricas equivalentes de rendimiento académico utilizadas por la institución educativa.

D. *Estadísticos descriptivos*

Antes de realizar el análisis multivariado se calcularon estadísticos descriptivos para cada una de las variables principales del estudio. Estos indicadores permiten evaluar la distribución de los datos y detectar posibles patrones de asimetría o concentración que puedan influir en los resultados del análisis estadístico.

TABLA 1
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES PRINCIPALES

Variable	Media	Desviación estándar	Skewness	Curtosis
Interacción digital	12.47	6.21	0.84	3.12
Creatividad práctica	8.35	4.10	0.67	2.89
Desempeño académico	7.82	1.14	-0.21	2.45

Los resultados muestran que las variables de interacción y creatividad presentan niveles moderados de asimetría positiva, lo cual es consistente con patrones típicos observados en entornos digitales de aprendizaje. En estos contextos, una proporción relativamente pequeña de estudiantes suele concentrar altos niveles de participación, mientras que una parte significativa mantiene niveles más moderados de interacción.

E. *Estrategia de análisis estadístico*

El análisis empírico se realizó en tres etapas complementarias.

En primer lugar, se calcularon matrices de correlación entre las variables principales del estudio con el objetivo de identificar asociaciones preliminares entre interacción, creatividad y desempeño académico. Este análisis permite explorar relaciones estadísticas antes de estimar modelos multivariados más complejos.

En segundo lugar, se estimaron modelos de regresión lineal para analizar la relación entre interacción digital y desempeño académico, incorporando la creatividad práctica como variable explicativa adicional. Este modelo permite evaluar si la participación en entornos digitales se asocia con resultados académicos superiores.

La utilización combinada de indicadores objetivos y subjetivos constituye una estrategia ampliamente utilizada en modelos predictivos educativos.

Finalmente, se estimó un modelo multinivel con el fin de considerar la estructura jerárquica de los datos educativos. En este modelo, los estudiantes constituyen el primer nivel de análisis, mientras que los cursos representan el segundo nivel. Este enfoque permite capturar variaciones contextuales entre diferentes entornos pedagógicos y evaluar si los efectos observados se mantienen al considerar estas diferencias estructurales.

Los modelos multinivel son particularmente adecuados para investigaciones educativas, ya que permiten analizar simultáneamente factores individuales y contextuales que influyen en los procesos de aprendizaje [10].

Extensión del modelo: análisis de mediación (SEM)

Adicionalmente, se estimó un modelo de ecuaciones estructurales (SEM) [11] con el objetivo de evaluar la relación simultánea entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico, así como el posible efecto de mediación de la creatividad práctica.

El modelo especificado incluye:

- Una relación directa entre interacción digital y desempeño académico
- Una relación entre interacción digital y creatividad práctica
- Una relación entre creatividad práctica y desempeño académico

Este enfoque permite evaluar tanto efectos directos como indirectos dentro de un mismo marco analítico, lo que resulta particularmente adecuado para examinar procesos educativos complejos en entornos digitales. La estimación del modelo se realizó al utilizar coeficientes estandarizados y evaluar su ajuste mediante indicadores convencionales como el Comparative Fit Index (CFI), el Tucker-Lewis Index (TLI) y el *Root Mean Square Error of Approximation* (RMSEA).

F. Software y procesamiento de datos

Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante IBM SPSS Statistics versión 2024. El procesamiento incluyó análisis descriptivos, estimación de matrices de correlación, modelos de regresión lineal, análisis multinivel y modelado de ecuaciones estructurales. Las variables fueron previamente depuradas y estandarizadas cuando fue necesario para asegurar la comparabilidad entre indicadores.

La estrategia analítica se desarrolló en tres etapas. En primer lugar, se efectuó un análisis descriptivo orientado a caracterizar las distribuciones de las variables estudiadas. Posteriormente se estimaron correlaciones bivariadas y modelos de regresión para examinar asociaciones entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico. Finalmente, se implementaron modelos multinivel y de ecuaciones estructurales con el propósito de evaluar relaciones directas e indirectas entre las variables de interés.

G. Especificación del modelo de ecuaciones estructurales

Con el propósito de evaluar simultáneamente las relaciones entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico, se estimó un modelo de ecuaciones estructurales (SEM). El modelo considera a la creatividad práctica como variable mediadora entre la interacción digital y el desempeño académico.

La especificación estructural se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\text{Creatividad Práctica} &= \alpha + \beta_1 (\text{Interacción Digital}) + \varepsilon \\ \text{Desempeño Académico} &= \gamma + \beta_2 (\text{Interacción Digital}) + \beta_3 (\text{Creatividad Práctica}) + \mu\end{aligned}$$

En este esquema, la interacción digital influye tanto directamente sobre el desempeño académico como indirectamente a través de la creatividad práctica. Este enfoque permite analizar simultáneamente efectos directos, indirectos y totales dentro de un mismo modelo analítico.

La calidad del ajuste fue evaluada mediante los indicadores comúnmente utilizados en la literatura especializada: Comparative Fit Index (CFI), Tucker-Lewis Index (TLI) y Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA). Los valores obtenidos se ubicaron dentro de los rangos considerados aceptables para estudios de ciencias sociales y educación digital.

H. Consideración de validez y confiabilidad

Para fortalecer la robustez metodológica del estudio se realizaron diferentes procedimientos de verificación estadística. En primer lugar, se evaluaron posibles problemas de multicolinealidad entre las variables independientes mediante el cálculo de indicadores de inflación de varianza (VIF). En segundo lugar, se analizaron los residuos de los modelos de regresión con el fin de verificar los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Asimismo, el uso de modelos multinivel permite controlar variaciones entre cursos y contextos educativos, lo que contribuye a mejorar la validez interna de los resultados. Este enfoque reduce el riesgo de atribuir efectos a variables individuales cuando en realidad pueden estar asociados con características del entorno pedagógico.

En conjunto, estas estrategias metodológicas permiten construir un análisis empírico robusto orientado a examinar la relación entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico dentro de entornos educativos mediados por tecnología.

III. RESULTADOS

A. Análisis de correlaciones

Como primer paso del análisis empírico se estimó una matriz de correlaciones entre las variables principales del estudio con el objetivo de identificar asociaciones preliminares entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico. Este análisis permite observar la dirección y magnitud de las relaciones entre variables antes de estimar modelos multivariados más complejos.

TABLA 2
MATRIZ DE CORRELACIONES ENTRE VARIABLES PRINCIPALES

Variable	1	2	3
1. Interacción digital	1.00		
2. Creatividad práctica	0.62	1.00	
3. Desempeño académico	0.41	0.47	1.00

Nota: $P < 0.01$

Los resultados muestran una correlación positiva moderada entre interacción digital y creatividad práctica ($r = 0.62$), lo que sugiere que los estudiantes con mayores niveles de participación en los entornos digitales tienden también a generar intervenciones académicas más diversas y dinámicas.

Asimismo, se observa una correlación positiva entre interacción digital y desempeño académico ($r = 0.41$), lo cual indica que la participación en las plataformas educativas se asocia con mejores resultados académicos. De manera similar, la creatividad práctica presenta una correlación positiva con el desempeño académico ($r = 0.47$), sugiriendo que las intervenciones creativas en las discusiones académicas pueden contribuir a procesos de aprendizaje más efectivos.

Estos resultados preliminares proporcionan evidencia inicial de que la interacción y la creatividad práctica están relacionadas con el desempeño académico, lo que justifica la estimación de modelos estadísticos más complejos para examinar estas relaciones con mayor precisión [12].

B. Modelo de regresión lineal

Con el objetivo de evaluar la relación entre interacción digital y desempeño académico, se estimó un modelo de regresión lineal en el que el desempeño académico constituye la variable dependiente, mientras que la interacción digital y la creatividad práctica se incluyen como variables explicativas.

TABLA 3
RESULTADOS DEL MODELO DE REGRESIÓN

Variable	Coficiente	Error estándar	t	p
Intercepto	5.12	0.42	12.19	<0.001
Interacción digital	0.084	0.021	4.00	<0.001
Creatividad práctica	0.116	0.028	4.14	<0.001

$R^2 = 0.32$

Los resultados del modelo indican que tanto la interacción digital como la creatividad práctica se asocian positivamente con el desempeño académico. En particular, el coeficiente estimado para interacción digital ($\beta = 0.084$) sugiere que mayores niveles de participación en los entornos virtuales se relacionan con incrementos significativos en los resultados académicos.

De manera similar, la creatividad práctica muestra un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre el desempeño académico ($\beta = 0.116$). Este resultado sugiere que no sólo la cantidad de participación es relevante, sino también la calidad o carácter creativo de las intervenciones dentro de los procesos de aprendizaje.

El valor de R^2 indica que el modelo explica aproximadamente el 32% de la variabilidad observada en el desempeño académico, lo cual representa una proporción considerable en estudios educativos basados en comportamiento estudiantil [7].

C. Resultados del modelo de mediación (SEM)

Con el fin de contrastar las hipótesis planteadas, se estimó un modelo de ecuaciones estructurales que incorpora a la creatividad práctica como variable mediadora entre la interacción digital y el desempeño académico.

Los resultados muestran que la interacción digital ejerce un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre la creatividad práctica ($\beta = 0.58$, $p < .001$). Asimismo, la creatividad práctica presenta una asociación positiva con el desempeño académico ($\beta = 0.47$, $p < .001$). El efecto directo de la interacción digital sobre el desempeño académico se mantiene significativo ($\beta = 0.18$, $p = .021$), aunque con una magnitud inferior a la observada para el efecto indirecto mediado por la creatividad.

Los indicadores de ajuste global mostraron valores satisfactorios (CFI = .95; TLI = .93; RMSEA = .041), sugiriendo una adecuada correspondencia entre el modelo teórico propuesto y los datos observados.

En conjunto, estos resultados respaldan la hipótesis de que la creatividad práctica constituye un mecanismo relevante mediante el cual la interacción digital contribuye al desempeño académico en entornos de aprendizaje mediados por tecnología.

D. Modelo multinivel

Dado que los estudiantes se encuentran agrupados dentro de diferentes cursos, se estimó un modelo multinivel para considerar posibles variaciones contextuales entre entornos pedagógicos. En este modelo, los estudiantes constituyen el primer nivel de análisis, mientras que los cursos representan el segundo nivel. Este enfoque permite analizar simultáneamente efectos individuales y variaciones estructurales entre cursos.

TABLA 4
RESULTADOS DEL MODELO MULTINIVEL

Variable	Coficiente	Error estándar	P
Intercepto	5.04	0.38	<0.001
Interacción digital	0.071	0.019	<0.001
Creatividad práctica	0.102	0.025	<0.001

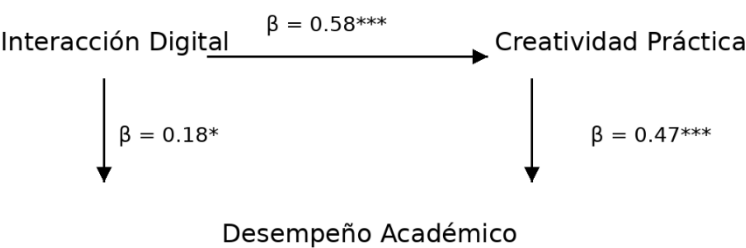
VARIANZA ENTRE CURSOS: 0.18
VARIANZA RESIDUAL: 0.92

Los resultados del modelo multinivel muestran que los efectos positivos de interacción digital y creatividad práctica sobre el desempeño académico se mantienen incluso cuando se consideran diferencias entre cursos.

En particular, el coeficiente estimado para interacción digital ($\beta = 0.071$) permanece estadísticamente significativo, lo que indica que la relación entre participación en entornos digitales y resultados académicos no depende únicamente de características específicas de cada curso. La varianza estimada entre cursos sugiere que existe cierta heterogeneidad entre contextos pedagógicos, aunque la mayor parte de la variación en el desempeño académico se explica por factores individuales asociados con los estudiantes.

E. Modelo de mediación (SEM)

Con el fin de evaluar las hipótesis planteadas, se estimó un modelo de ecuaciones estructurales que permite analizar simultáneamente los efectos directos e indirectos entre las variables del estudio. Los resultados muestran que la interacción digital tiene un efecto positivo y significativo sobre la creatividad práctica ($\beta = 0.58$, $p < 0.001$), lo que indica que mayores niveles de participación en entornos digitales se asocian con un incremento en las formas de intervención creativa de los estudiantes.



Indicadores de ajuste

Indicador	Valor
CFI	0.95
TLI	0.93
RMSEA	0.041

Fig. 2. Modelo de mediación entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico. Los coeficientes corresponden a estimaciones estandarizadas del modelo de mediación. La creatividad práctica actúa como mediador parcial entre interacción digital y desempeño académico.

A su vez, la creatividad práctica presenta un efecto positivo significativo sobre el desempeño académico ($\beta = 0.47$, $p < 0.001$), lo que sugiere que las prácticas de participación activa y creativa contribuyen a mejores resultados de aprendizaje.

En cuanto al efecto directo, la interacción digital mantiene una relación positiva con el desempeño académico ($\beta = 0.18$, $p = 0.021$), aunque con menor magnitud en comparación con el efecto indirecto.

Los índices de ajuste del modelo indican un buen ajuste a los datos:

- CFI = 0.95
- TLI = 0.93
- RMSEA = 0.041

Estos resultados sugieren que la creatividad práctica actúa como un mediador parcial [4] en la relación entre interacción digital y desempeño académico, confirmando las hipótesis planteadas.

F. Visualización de relaciones estadísticas

Con el fin de complementar los resultados de los modelos estadísticos, se generaron visualizaciones que permiten representar gráficamente las relaciones entre las variables analizadas. La matriz de correlaciones confirma visualmente las asociaciones positivas entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico. Por su parte, el gráfico de regresión muestra una tendencia ascendente consistente entre niveles de interacción y resultados académicos [5], lo que refuerza los resultados obtenidos en los modelos econométricos. Estas visualizaciones permiten observar de manera intuitiva patrones que también se reflejan en los coeficientes estadísticos estimados.

G. Síntesis de resultados

En conjunto, los resultados del análisis empírico sugieren tres hallazgos principales.

En primer lugar, la interacción estudiantil en entornos digitales se asocia de manera positiva con el desempeño académico. Los estudiantes que participan con mayor frecuencia en los espacios de discusión y colaboración tienden a obtener mejores resultados en los cursos analizados.

En segundo lugar, la creatividad práctica manifestada en las intervenciones académicas también muestra una relación significativa con el desempeño académico. Este resultado indica que la calidad de la participación puede ser tan relevante como su frecuencia.

En tercer lugar, estos efectos se mantienen incluso al considerar variaciones entre cursos mediante modelos multinivel, lo que sugiere que las relaciones observadas no se explican únicamente por características específicas de los contextos pedagógicos.

En conjunto, estos resultados aportan evidencia empírica sobre la importancia de la interacción y la creatividad práctica dentro de los entornos digitales de aprendizaje.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio aportan evidencia empírica sobre la relación entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico en entornos de educación superior mediada por plataformas tecnológicas. En términos generales, los hallazgos sugieren que los niveles de participación estudiantil en espacios digitales de aprendizaje se asocian positivamente con los resultados académicos, particularmente cuando estas dinámicas de interacción implican formas activas de intervención en las discusiones académicas [13].

Los resultados del modelo de mediación aportan evidencia adicional sobre los mecanismos a través de los cuales la interacción digital influye en el desempeño académico. En particular, el efecto indirecto identificado sugiere que la creatividad práctica constituye un proceso intermedio relevante en la traducción de la participación en resultados de aprendizaje. Este hallazgo refuerza la idea de que la interacción en entornos digitales no opera únicamente a través de la exposición o la frecuencia, sino mediante la activación de formas de agencia práctica en los estudiantes.

Uno de los principales aportes del análisis consiste en mostrar que la interacción en entornos digitales no puede reducirse únicamente a una dimensión cuantitativa de participación. Si bien la frecuencia de intervenciones constituye un indicador relevante, los resultados sugieren que las formas de participación que implican mayor creatividad práctica

(como la generación de nuevas líneas de discusión o la reformulación de problemas académicos) también se relacionan de manera significativa con el desempeño académico [9].

Este hallazgo coincide con investigaciones recientes en el campo de learning analytics, las cuales han mostrado que las métricas puramente cuantitativas de participación pueden resultar insuficientes para capturar la complejidad de los procesos de aprendizaje en entornos digitales. En este sentido, la literatura ha comenzado a enfatizar la importancia de considerar indicadores que reflejen la calidad de las interacciones académicas, así como la capacidad de los estudiantes para contribuir activamente a la construcción colectiva del conocimiento [14].

Asimismo, los resultados del modelo multinivel sugieren que la relación entre interacción digital y desempeño académico se mantiene incluso al considerar diferencias entre cursos o contextos pedagógicos. Este hallazgo es consistente con estudios que señalan que la participación estudiantil en entornos digitales constituye un factor relativamente robusto en los procesos de aprendizaje, independientemente de las variaciones específicas en el diseño pedagógico de los cursos [15].

Desde una perspectiva más amplia, estos resultados pueden interpretarse como evidencia de que los entornos digitales de aprendizaje no sólo funcionan como herramientas tecnológicas de apoyo, sino también como espacios en los que emergen dinámicas de agencia estudiantil y creatividad práctica. Las plataformas educativas facilitan contextos de interacción en los que los estudiantes pueden reinterpretar contenidos, generar nuevas conexiones conceptuales y participar activamente en procesos de aprendizaje colaborativo.

En este sentido, el análisis sugiere que el diseño pedagógico de los entornos digitales debería orientarse no únicamente a promover la participación, sino también a favorecer formas de interacción que estimulen procesos de creatividad práctica dentro del aprendizaje. Esto implica considerar estrategias didácticas que incentiven la discusión abierta, la resolución colaborativa de problemas y la construcción colectiva del conocimiento.

Robustez metodológica y limitaciones estadísticas

Con el objetivo de fortalecer la validez de los resultados, el estudio incorporó diferentes estrategias de verificación metodológica. En primer lugar, se realizaron análisis de multicolinealidad entre las variables independientes mediante el cálculo de factores de inflación de varianza (VIF), los cuales se mantuvieron dentro de rangos aceptables. Este resultado sugiere que las variables incluidas en los modelos estadísticos no presentan problemas significativos de redundancia explicativa.

En segundo lugar, se evaluaron los residuos de los modelos de regresión con el fin de verificar los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Los análisis exploratorios indicaron que los residuos presentan distribuciones cercanas a la normalidad, lo cual respalda la adecuación de los modelos estimados para el análisis de los datos.

Asimismo, la estimación de modelos multinivel permitió considerar la estructura jerárquica de los datos educativos, donde los estudiantes se encuentran agrupados dentro de diferentes cursos. Este enfoque metodológico contribuye a mejorar la validez interna del estudio al permitir separar efectos individuales de posibles variaciones contextuales entre entornos pedagógicos.

A pesar de estas fortalezas metodológicas, el estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el análisis se basa en datos observacionales derivados de plataformas educativas, lo que implica que las relaciones identificadas deben interpretarse principalmente en términos de asociación estadística y no necesariamente de causalidad directa [2].

En segundo lugar, las métricas utilizadas para aproximar la creatividad práctica se basan en indicadores derivados de patrones de interacción digital, lo que puede no capturar completamente la diversidad de formas en que la creatividad se manifiesta en los procesos educativos. Investigaciones futuras podrían complementar este enfoque con análisis cualitativos o métodos mixtos que permitan explorar con mayor profundidad las dinámicas de participación estudiantil.

Finalmente, los resultados se derivan de un conjunto específico de cursos y contextos institucionales, lo que sugiere la necesidad de replicar el análisis en diferentes entornos educativos para evaluar la generalización de los hallazgos.

Limitaciones metodológicas adicionales

Aun cuando los resultados muestran asociaciones consistentes entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico, no puede descartarse completamente la existencia de problemas de endogeneidad. Variables no observadas, tales como la motivación previa, las competencias digitales iniciales o el desempeño académico anterior de los participantes, podrían influir simultáneamente tanto en la intensidad de interacción como en los resultados de aprendizaje alcanzados.

En consecuencia, las relaciones identificadas deben interpretarse principalmente como asociaciones estadísticas observadas dentro del contexto estudiado y no como evidencia concluyente de causalidad. Investigaciones futuras podrían incorporar diseños longitudinales o cuasiexperimentales que permitan fortalecer las inferencias causales derivadas de este tipo de análisis.

16

V. CONCLUSIONES

El presente estudio analizó la relación entre interacción digital, creatividad práctica y desempeño académico en entornos de educación superior mediada por plataformas tecnológicas. Utilizando herramientas estadísticas propias del campo de learning analytics, el análisis permitió examinar patrones de participación estudiantil y su asociación con resultados de aprendizaje [5].

Los resultados muestran que la interacción en entornos digitales se asocia de manera positiva con el desempeño académico. Este efecto se mantiene incluso cuando se consideran variaciones entre cursos mediante modelos multinivel, lo que sugiere que la participación estudiantil constituye un factor relevante dentro de los procesos de aprendizaje en contextos educativos mediados por tecnología.

Además, el análisis indica que la creatividad práctica manifestada en las dinámicas de interacción también se relaciona significativamente con el desempeño académico. Este hallazgo sugiere que las intervenciones estudiantiles que contribuyen activamente a las discusiones académicas pueden favorecer procesos de aprendizaje más profundos.

En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de considerar no sólo la cantidad de participación en entornos digitales, sino también las formas en que los estudiantes intervienen creativamente en los procesos de aprendizaje. Desde la perspectiva de learning analytics, este enfoque abre nuevas posibilidades para analizar cómo las dinámicas de interacción digital contribuyen al desarrollo de prácticas pedagógicas más participativas y colaborativas.

Futuras investigaciones podrían ampliar este enfoque incorporando análisis longitudinales, técnicas más avanzadas de modelado estructural o métodos mixtos que integren datos cuantitativos y cualitativos. Este tipo de aproximaciones permitiría profundizar en la comprensión de cómo los entornos digitales pueden favorecer procesos educativos orientados a la participación activa y la construcción colectiva del conocimiento.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: NPFA (líder) y JDGH; Metodología: JDGH; Desarrollo de software y desarrollo tecnológico: NPFA; Investigación: NPFA, JDGH y JMP; Redacción y preparación del borrador original: NPFA; Redacción, revisión y edición: NPFA y JDGH; Supervisión: JDGH; Análisis formal: JDGH; Administración del proyecto: JMP; Transferencia tecnológica e implementación: NPFA y JDGH; Adquisición de fondos: NPFA. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Financiamiento: Los autores declaran que la presente investigación no recibió financiamiento externo específico de agencias del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Declaración de la disponibilidad de datos: Los datos que sustentan los hallazgos de este estudio se encuentran disponibles dentro del artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Fundación Carlos Slim, a través de su plataforma Académica, por el apoyo brindado en la difusión y fortalecimiento de competencias en el uso de tecnologías emergentes; asimismo, se reconoce a la Universidad Politécnica del Valle de México por el respaldo institucional y las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] D. Gašević, S. Joksimović, B. Eagan, D. W. Shaffer, “SENS: Network analytics to combine social and cognitive perspectives of collaborative learning,” *Computers in Human Behavior*, vol. 92, pp. 562–577, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.07.003>
- [2] D. Ifenthaler, J. Yau, “Utilising learning analytics for study success: Reflections on current empirical findings,” *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, vol. 15, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-64792-0_2
- [3] R. Luckin, *AI for Schoolteachers*. London, UK: Routledge, 2022.
- [4] A. Wise, D. W. Shaffer, “Why theory matters more than ever in the age of big data,” *Journal of Learning Analytics*, vol. 8, no. 2, pp. 1–5, 2021, doi: <https://doi.org/10.18608/jla.2015.22.2>
- [5] F. Martin, T. Sun, C. D. Westine, “A systematic review of research on online teaching and learning from 2009 to 2018,” *Computers & Education*, vol. 159, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104009>
- [6] B. Rienties, D. Tempelaar, Q. Nguyen, A. Littlejohn, “Unpacking the intertemporal impact of self-regulation in blended learning environments,” *The Internet and Higher Education*, vol. 45, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.07.007>
- [7] V. P. Glăveanu, “A sociocultural theory of creativity: Bridging the social, the material and the psychological,” *Creativity Research Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1089268020961763>
- [8] Z. Papamitsiou, A. Economides, “Learning analytics and educational data mining in practice: A systematic literature review,” *Educational Technology & Society*, vol. 24, no. 2, pp. 49–64, 2014, <https://eric.ed.gov/?id=EJ1045537>
- [9] OECD, *PISA 2022 Assessment and Analytical Framework: Creative Thinking*. Paris, France: OECD Publishing, 2023, available: https://www.oecd.org/en/publications/pisa-2022-assessment-and-analytical-framework_dfe0bf9c-en.html
- [10] O. Zawacki-Richter, V. Marín, M. Bond, F. Gouverneur, “Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education,” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 16, no. 39, 2019, doi: <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

- [11] D. Tempelaar, B. Rienties, Q. Nguyen, “Subjective data, objective data and the role of bias in predictive modelling,” *Computers in Human Behavior*, vol. 104, 2020, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233977>
- [12] R. A. Beghetto, “How Times of Crisis Serve as a Catalyst for Creative Action: An Agentic Perspective,” *Frontiers in Psychology*, vol. 12, 2021, doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.600685>
- [13] D. Henriksen, E. Creely, M. Henderson, P. Mishra, “Creativity and technology in teaching and learning: a literature review of the uneasy space of implementation,” *Educational Technology Research and Development*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09912-z>
- [14] S. Joksimović, V. Kovanović, S. Dawson, D. Gašević, G. Siemens, “The journey of learning analytics,” *HERDSA Review of Higher Education*, vol. 6, pp. 37–63, 2019, available: <https://hdl.handle.net/11541.2/142171>
- [15] N. Selwyn, *Education and Technology: Key Issues and Debates*, 3rd ed. London, U.K.: Bloomsbury Academic, 2023.

This article is featured in the Special Issue on TRIBOLOGY

Guest editors:

Ezequiel Alberto GALLARDO HERNÁNDEZ | Instituto Politecnico Nacional
Manuel VITE TORRES | Instituto Politecnico Nacional
Nelson Federico GARZA MONTES DE OCA | Universidad Autónoma de Nuevo León
César SEDANO DE LA ROSA | Universidad de Guadalajara

<https://cientifica.site>

Análisis en tiempo real de micropartículas de desgaste mediante
microabrasión por ball cratering: integración de captura óptica,
calibración de fuerza y cuantificación tribológica

*Real-time Analysis of Wear Microparticles by Microabrasion through Ball Cratering:
Integration of Optical Capture, Force Calibration, and
Tribological Quantification*

Mitzi Matias Matias

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Leonardo Martínez Marcelo

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Minerva Teresa Chimal Benhumea

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Tomas De la Mora Ramirez

Tecnológico Nacional de México | MÉXICO

Recibido 03/06/2026, aceptado 20/06/2026, publicado 25/06/2026.



Análisis en tiempo real de micropartículas de desgaste mediante microabrasión por ball cratering: integración de captura óptica, calibración de fuerza y cuantificación tribológica

Real-time Analysis of Wear Microparticles by Microabrasion through Ball Cratering: Integration of Optical Capture, Force Calibration, and Tribological Quantification

Mitzi Matias Matias ¹
Leonardo Martínez Marcelo ²
Minerva Teresa Chimal Benhumea ³
Tomas De la Mora Ramirez ^{4*}

Tecnológico Nacional de México,
Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán,
MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0003-2033-7567 / mitzi.matias4@outlook.es

² ORCID: 0009-0004-8011-2615 / martinez_marcelo@live.com

³ ORCID: 0009-0009-1856-2304 / minervachimal020202@gmail.com

^{4*} ORCID: 0000-0001-6594-2777 / tomas.delamora@tesjo.edu.mx

* Corresponding author

<https://cientifica.site>

Recibido 03/06/2026, aceptado 20/06/2026, publicado 25/06/2026.



Resumen

En este trabajo se estudió la evolución de la huella de desgaste generada en una probeta de policarbonato sólido durante ensayos de microabrasión en seco mediante la prueba de ball cratering. El análisis se realizó a partir de tres videos obtenidos por microscopía óptica a una magnificación de 500X, lo que permitió seguir la evolución del cráter durante la prueba. La probeta evaluada fue de 6 mm de espesor y 25 mm de diámetro, las pruebas se realizaron en seco bajo una velocidad de 200 rpm, a una carga normal de 200 g (1.961 N) y el uso de una esfera de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro. El material se seleccionó debido a la transparencia del policarbonato, lo que permitió la observación óptica del contacto y su modificación superficial. A partir de los videos experimentales se extrajeron secuencias temporales a tiempo determinados. La evidencia visual mostró que la huella se forma progresivamente, pasando por una etapa inicial de establecimiento del contacto, seguida por oscurecimiento central, definición del borde y acumulación o redistribución de partículas. La morfología se observa como un mecanismo dominante de abrasión por microarado, acompañado por la participación intermitente de partículas como tercer cuerpo. El análisis de las gráficas de señal fuerza-tiempo permitió distinguir corridas estables. El volumen del cráter obtuvo un valor central de 0.000245 mm³ para una huella promedio de 0.5 mm y un coeficiente de fricción (COF) promedio de 0.0702, 0.0640 y 0.0624. En conjunto, las imágenes, la señal de fuerza, el COF y el cálculo geométrico del volumen permitieron interpretar el desgaste con mayor cuidado, sin depender únicamente del diámetro final de la huella, así como el uso de datos para futuras simulaciones numéricas a niveles micrométricos.

Palabras clave: microdesgaste en seco, ball cratering, policarbonato, huella de desgaste, microscopía óptica, abrasión, microsurcado, tercer cuerpo.

2

Abstract

In this study, the evolution of the wear scar produced on a solid polycarbonate specimen during dry micro-abrasion tests was investigated using the ball-cratering technique. The analysis was based on three videos recorded by optical microscopy at 500× magnification, which made it possible to monitor the evolution of the crater during the test. The evaluated specimen was 6 mm thick and 25 mm in diameter. The tests were performed under dry conditions at a rotational speed of 200 rpm, with a normal load of 200 g, equivalent to 1.961 N, using a 25 mm-diameter AISI 52100 steel ball. Polycarbonate was selected because of its transparency, which enabled optical observation of the contact zone and the resulting surface modification.

Time-resolved image sequences were extracted from the experimental videos at selected intervals. The visual evidence showed that the wear scar developed progressively, beginning with the establishment of contact, followed by central darkening, edge definition, and the accumulation or redistribution of particles. The observed morphology suggests that micro-ploughing abrasion was the dominant wear mechanism, accompanied by the intermittent participation of particles acting as a third body. The analysis of the force–time signal plots made it possible to identify stable test runs. The crater volume showed a central value of 0.000245 mm³ for an average wear scar diameter of 0.5 mm, while the average coefficients of friction (COF) were 0.0702, 0.0640, and 0.0624.

Overall, the integration of optical images, force signals, COF measurements, and the geometric calculation of crater volume allowed a more careful interpretation of the wear process, without relying solely on the final wear scar diameter. This data also provide a useful basis for future numerical simulations at the micrometric scale.

Index terms: dry micro-wear, ball cratering, polycarbonate, wear scar, optical microscopy, abrasive wear, micro-ploughing, third body.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica de microabrasión por cráteres de bola ha sido ampliamente utilizada en el estudio del desgaste localizado de metales, polímeros y recubrimientos, ya que permite producir una marca relativamente pequeña y estimar el volumen del material removido mediante relaciones geométricas simples. Rutherford y Hutchings desarrollaron una de las bases más influyentes de este método, tanto desde la perspectiva experimental como teórica; que podría funcionar en tales sistemas con baja pérdida de material y un tamaño de cráter pequeño [1].

La prueba no debe limitarse al diámetro final de la marca. Trezona, Allsopp y Hutchings mostraron que la microabrasión puede cambiar entre abrasión de dos cuerpos y regiones impactadas por partículas dependiendo de la condición de contacto [2]. En la misma línea, Adachi y Hutchings propusieron mapas de modos de desgaste que ayudan a explicar la presencia relativa de ranurado, rodadura de partículas y abrasión mixta [3].

En pruebas en seco, la ausencia de lubricante o lodo hace que las partículas generadas por el contacto en sí sean más relevantes. Estas partículas pueden permanecer en la interfaz, compactarse o ser arrastradas y, si no son arrastradas, pueden actuar como un tercer cuerpo, cambiando la forma de la marca y el comportamiento dinámico del sistema. Gates advirtió que la separación de la abrasión de dos cuerpos de la abrasión de tres cuerpos debe considerarse cuidadosamente, y Cozza, Tanaka y Souza sugieren que en el caso de registrar fuerza o fricción es útil registrar la fuerza (o fricción) para medir cuándo cambia el régimen durante la prueba [4].

El material transparente de policarbonato, se capturan imágenes del proceso y se observa el proceso de contacto, cómo se modifica el centro del cráter y cómo las partículas se acumulan en el medio. Esto hace que la lectura tribológica sea más robusta para pruebas en seco donde la movilidad y permanencia de las partículas en la huella son importantes. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue investigar la evolución temporal de la marca de microdesgaste en una muestra sólida de policarbonato producida por la técnica de cráteres de bola en condiciones secas, en una bola de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro, girando a 200 rpm y 200 g. Para este propósito, las secuencias ópticas obtenidas a 500X de aumento se combinaron con la señal de fuerza dinámica para describir la formación progresiva del cráter y el mecanismo de desgaste dominante y para estimar preliminarmente el volumen. La evolución morfológica de la marca también se vinculó a la acumulación de partículas y la respuesta de fuerza-tiempo a la formación de la marca para proporcionar una mejor interpretación tribológica del proceso de microdesgaste en seco.

II. DESARROLLO

La figura 1, muestra la metodología del proceso para la obtención del video para el análisis de huellas de desgaste en tiempo real.

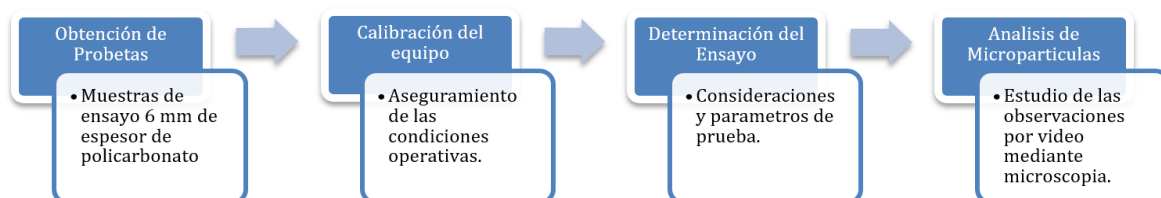


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo.

Material de estudio y condición de ensayo

El material evaluado fue una probeta circular de policarbonato sólido con 6 mm de espesor y 25 mm de diámetro. Una condición experimental fundamental fue que todas las pruebas se realizaron en seco, sin lubricante y sin suspensión abrasiva líquida. La transparencia del material permitió registrar el área de contacto mediante microscopía óptica a 500X en tiempo real de prueba.

Configuración experimental del ensayo de microdesgaste

El microdesgaste se evaluó mediante una configuración tipo ball cratering. Se empleó una esfera de acero AISI 52100 de 25 mm de diámetro en contacto con la probeta, una velocidad de rotación de 200 rpm y una carga normal de 200 g, equivalente a 1.961 N. La huella de desgaste reportada fue de 0.5 ± 0.1 mm de diámetro. Estas condiciones se utilizaron para la interpretación visual del proceso y para la estimación del volumen de desgaste.

La selección del acero AISI 52100 se consideró adecuada para este tipo de ensayo debido a su uso frecuente como acero de rodamientos y contraparte esférica en pruebas tribológicas, proporcionando una superficie rígida y resistente al desgaste frente al policarbonato evaluado.

Parámetros experimentales

La tabla 1 muestra los materiales y condiciones que se utilizaron durante la prueba de microabrasión.

TABLA 1
PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ENSAYO DE MICRODESgaste EN SECO Y GEOMETRÍA DEL SISTEMA.

Parámetro	Valor	Observación
Material de probeta	Policarbonato sólido	Probeta transparente para observación óptica
Condición de ensayo	En seco	Sin lubricante ni slurry
Dimensiones	6 mm de espesor; 25 mm de diámetro	Probeta circular
Aumento óptico	500X	Captura de video en formato mp4 del contacto entre superficies
Velocidad de rotación	200 rpm	Condición nominal de ensayo
Carga normal	200 g = 1.961 N	Carga aplicada
Bola de ensayo	acero AISI 52100; 25 mm de diámetro	Acero AISI 52100; R = 12.5 mm

Adquisición de video y extracción de secuencias temporales

Se examinaron tres videos con un microscopio óptico montado en la máquina para pruebas de microdesgaste bajo las mismas condiciones. El Video 1 se mostró a los 30, 90, 150, 270, 390, 510, 630 y 720 segundos, mientras que los Videos 2 y 3 se mostraron a los 30, 90, 150, 210, 270 y 299 segundos. En todos los casos, solo se recortó la región donde progresa la marca de desgaste.

Tratamiento de la señal dinámica

La respuesta del sistema se registró con una celda de carga conectada a un Arduino y se adquirió utilizando el software CoolTerm. Los archivos de texto se limpiaron para mantener las filas numéricas de lectura, tiempo, masa equivalente,

fuerza y señal en bruto. Para cada ejecución, se calcularon el tiempo de prueba, la distancia de deslizamiento, la fuerza dinámica aparente promedio en valor absoluto, la dispersión, la fuerza máxima, un índice de fricción aparente y un coeficiente preliminar de desgaste específico.

Estimación del volumen de desgaste

El volumen del cráter se estimó empleando la ecuación (1) para cráter esférico pequeño [5].

$$V = \frac{\pi b^4}{64R}$$

(1)

Donde:

- V, volumen de desgaste a microescala;
- b, diámetro de la huella;
- R, radio de la esfera;
- Para $b = 0.5\text{ mm}$ y $R = 12.5\text{ mm}$ se obtuvo un valor central de 0.000245 mm^3 .

Considerando la variación de $\pm 0.1\text{ mm}$ en el diámetro de la huella, el rango estimado del volumen fue de 0.000101 a 0.000509 mm^3 .

5

III. RESULTADOS

La tabla 2 muestra los resultados técnicos de las pruebas de microdesgaste, el diámetro de la huella de desgaste se obtuvo mediante el software de ImageJ, el volumen central de desgaste se calculó con la ecuación 1

TABLA 2
PARÁMETROS PRINCIPALES DEL ENSAYO DE MICRODESGASTE EN SECO Y ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE DESGASTE A MICROESCALA.

Parámetro	Valor	Observación
Huella de desgaste	$0.5 \pm 0.1\text{ mm}$	Diámetro promedio reportado
Volumen central	0.000245 mm^3	Estimado con $b = 0.5\text{ mm}$
Rango estimado de volumen	$0.000101\text{ a }0.000509\text{ mm}^3$	Estimado con $b = 0.4\text{--}0.6\text{ mm}$

Evolución temporal de la huella de desgaste

Los gráficos de las figuras muestran las imágenes actualizadas del área del cráter y el área local de la huella de desgaste. Las micrografías se han tomado a los 30 segundos para enfocarse en las etapas ligeramente posteriores del proceso y tener una mejor vista del contorno del cráter y la redistribución local de partículas.

En la Figura 2, a los 30 segundos, la primera marca de desgaste comienza a aparecer en el área de estudio, con una región central donde el contraste está cambiando y la uniformidad de la superficie en esta región se pierde parcialmente. Esta primera etapa es el comienzo del contacto entre la bola de acero y el policarbonato. Dado que es un polímero relativamente dúctil en comparación con un material metálico rígido, la primera reacción no significa que el material

se elimine inmediatamente, sino que solo se deforma y se alisa parcialmente y se mueve lentamente hacia los bordes del área de contacto.

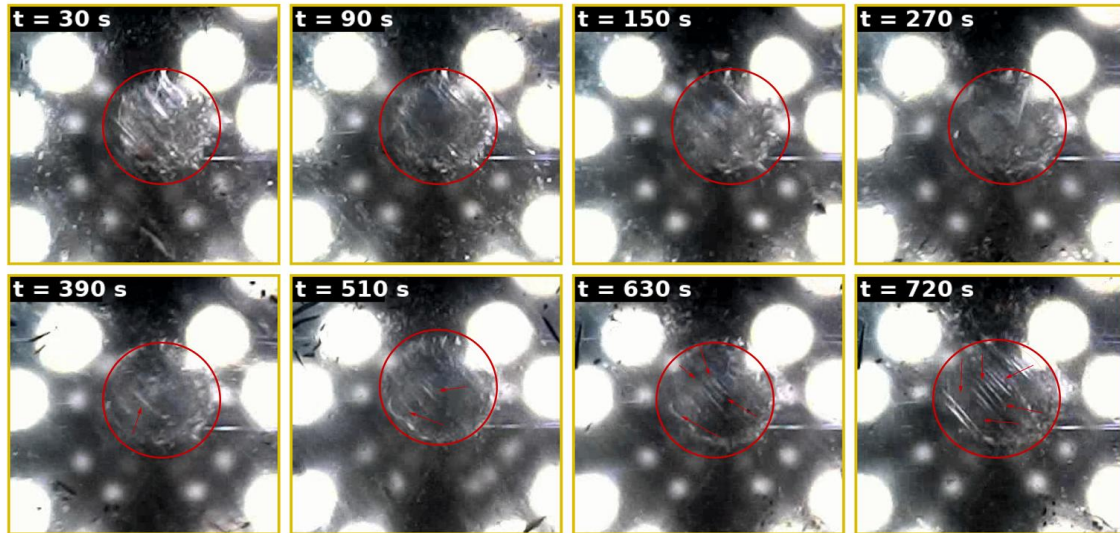


Fig. 2. Secuencia de desgaste de 30 s a 720 s. Zona de la huella de desgaste a 500X.

6

De 90 a 150 segundos, la huella es más visible, con un área central más prominente y una mayor heterogeneidad de contraste. Este cambio sugiere que el contacto no comenzó como un asentamiento inicial, sino que comenzó a desarrollarse en un cráter de desgaste. En este punto, pueden existir la deformación plástica de la superficie del polímero, la compactación de partículas finas y el arrastre de material por la trayectoria relativa de la esfera.

Cuando el tiempo se escala de 210 a 299 segundos, comenzamos a ver surcos que van en la dirección del deslizamiento (flechas en la secuencia). Aunque los tiempos mostrados en la figura más adelante aumentan a 270, 390, 510, 630 y 720 segundos, la progresión de las líneas orientadas permite identificar el inicio del mecanismo abrasivo por arado. En este mecanismo, la contraparte o las partículas atrapadas no cortan completamente el material desde el primer contacto, sino que lo empujan lateralmente (de modo que pueden crear canales, crestas u otros depósitos periféricos). Tal comportamiento se vuelve característico para el contacto abrasivo en seco de polímeros, ya que la fricción puede causar deformación localizada antes de que el material se desprenda completamente. La morfología no corresponde a un pulido homogéneo porque hay trazas lineales, desplazamiento de material y zonas de acumulación. No tiene las mismas características que el microcorte puro, y es difícil decir si es microcorte puro, ya que la evidencia óptica es de material empujado y redistribuido, en lugar de una eliminación limpia y continua del material. Así, la Figura 2 muestra un régimen de desgaste abrasivo principalmente de dos cuerpos, con partículas actuando como un tercer cuerpo cuando el material desprendido queda temporalmente atrapado en la pista.

En la Figura 3, las manchas negras observadas en la huella y alrededor de la huella deben verse principalmente como las capas de acumulación, atrapamiento o compactación de partículas de desgaste, junto con efectos ópticos (ya que son causadas por el relieve del cráter). En una prueba en seco, el material que ha sido removido del policarbonato no tiene que ser lavado por el lubricante o la lechada, por lo que permanece en la interfaz y forma una película de tercer cuerpo discontinua o es compacto en áreas con alta presión local. El color oscuro también puede intensificarse por sombras locales (falta de transparencia del polímero en el área dañada, rugosidad y cambio de reflexión de la luz).

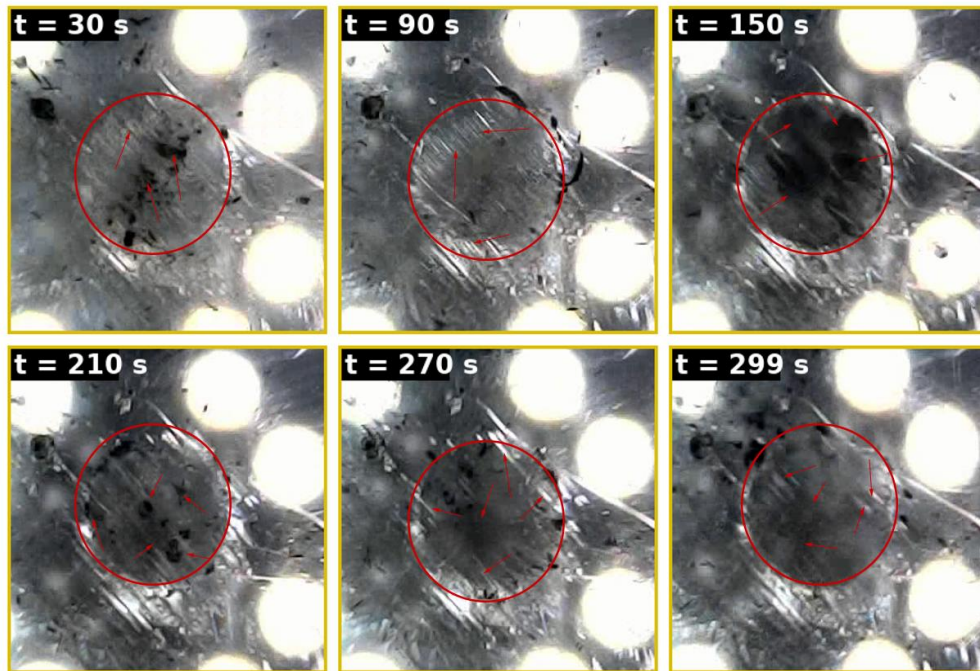


Fig. 3. Secuencia de 30n s a 299 s- La secuencia evidencia la progresión local del cráter, el oscurecimiento central y la definición paulatina del borde de la huella.

Vemos que a los 30 segundos el centro de la huella no está bien definido, pero ya hay contacto al final de la huella. A los 90 y 150 segundos hay más contraste que vemos a la izquierda (con trazas más finas) y una distribución más amplia de material oscuro, lo que significa que estamos empezando a ver las partículas involucrarse en el contacto. El borde del cráter está claramente definido entre los 210 y 270 segundos y hay acumulación periférica debido al desplazamiento lateral del polímero y la compactación de partículas finas desprendidas.

A los 299 segundos, las marcas en las líneas direccionales, surcos y áreas de material desplazado hacia los bordes dominan, en lugar de una superficie uniformemente pulida o remoción por corte limpio. El desprendimiento de material y la formación de surcos ocurre cuando la esfera rígida, las asperezas de contacto o las partículas atrapadas aran la superficie del polímero. Sin embargo, en este último caso, el material se mueve lateralmente y forma canales o crestas y una porción de material se elimina y otra se redistribuye. Los residuos en contacto seco pueden quedar atrás o ser arrastrados y fomentar aún más la formación de surcos y la heterogeneidad de la huella.

Por lo anterior, la Figura 3 se interpreta como un caso de desgaste abrasivo mixto. El mecanismo dominante es microabrasión, pero la presencia de manchas oscuras y material acumulado indica intervención de tercer cuerpo. Esta combinación de microabrasión, donde el contacto puede alternar entre la abrasión de dos cuerpos, cuando domina la acción directa de la contraparte rígida, y abrasión de tres cuerpos, cuando las partículas atrapadas participan activamente en el daño superficial.

Como se muestra en la Figura 4, las áreas oscuras corresponden a regiones donde la superficie ha cambiado significativamente durante el contacto (las partículas se mueven, las piezas de material caído se presionan juntas y se dañan) y el color en la superficie se ve afectado por la curvatura local del cráter. Como el policarbonato no es

completamente transparente y la luz del microscopio no es brillante, las áreas más oscuras son más irregulares y delgadas o la superficie parece aparecer con una intensidad de luz más baja. Por lo tanto, el oscurecimiento no debe interpretarse como una nueva fase química sin ningún análisis, sino como un signo óptico de cambio de superficie y material desprendido o redistribuido.

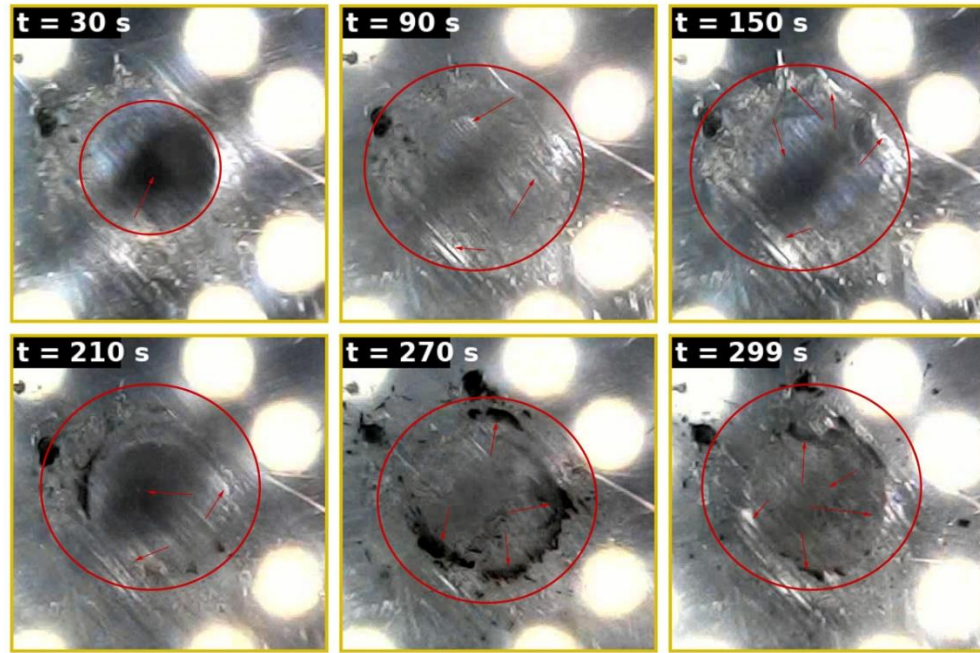


Fig. 4. Secuencia temporal actualizada del Video C. Se observa la evolución del cráter, la acumulación periférica de material y la morfología asociada al desgaste en seco.

Entre 30 y 150 segundos, el material se desplaza en la zona de contacto al cambiar la forma de la región oscura, el color de las líneas y el contraste. El fenómeno es compatible con la deformación plástica superficial del polímero y la acción de arado por la bola o partículas atrapadas. En esos momentos, el contacto sigue evolucionando y la huella se vuelve más prominente y el material desplazado en el borde o en el cráter comienza a organizarse.

Las áreas negras en la Figura 4 pueden asociarse con materiales compactados o material transferido o material polimérico altamente deformado atrapado en la interfaz. En condiciones secas, es probable que estas partículas permanezcan en contacto y también formen una capa de tercer cuerpo. Esta parte puede romperse, compactarse, ser expulsada al borde o de regreso al contacto. Este comportamiento explica por qué la huella muestra regiones oscuras no uniformes, bordes que se acentúan con acumulación y regiones internas con contraste variable.

El tipo de desgaste visto en la Figura 4 es abrasión por surcos donde están presentes materiales desprendidos. Se forma por la bola de acero AISI 52100 actuando como contraparte rígida contra el policarbonato y creando presión de contacto para ellos. A medida que avanza el deslizamiento, las asperezas y partículas deforman el polímero y empujan el material hacia los lados produciendo surcos y acumulación. Cuando el nivel local de desgaste empeora, parte de este material desplazado se desprende y se queda atrapado en la huella. La evolución de 210 a 299 segundos muestra una

huella más estabilizada, con un cráter más claro y áreas oscuras que persisten por partículas compactadas y daño superficial.

La Figura 5 muestra el coeficiente de fricción aparente promedio (COF) obtenido en los tres videos en términos de la relación entre la fuerza dinámica registrada y la carga normal fija aplicada durante la prueba. Los valores provienen de pruebas de microdesgaste en seco, como antes, bajo las mismas condiciones nominales de operación. El COF promedio más alto registrado por el Video 1 fue de 0.0702, mientras que el más bajo fue el Video 2 con 0.0640 y el Video 3 con 0.0624. Aunque las diferencias entre los valores promedio son pequeñas, la barra de error para el Video 1 muestra más variación durante la prueba. Esto podría deberse a la acumulación de residuos y pequeños alineamientos o cambios locales en el área de contacto.

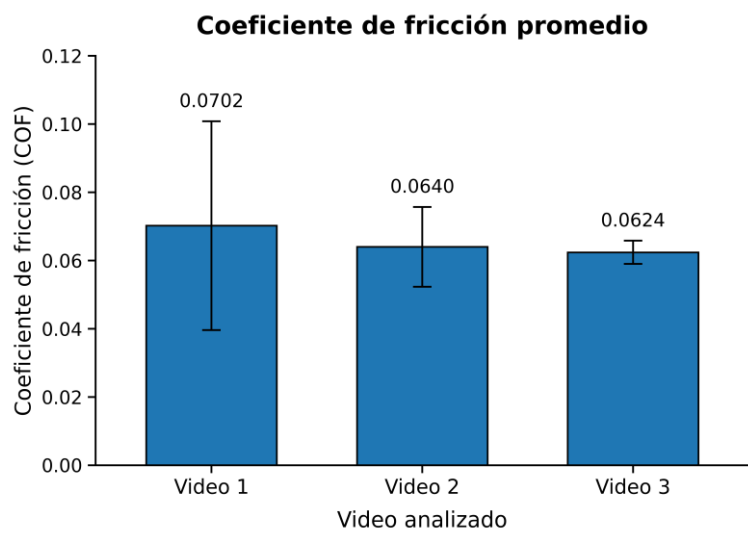


Fig. 5. Gráfica de coeficiente de fricción promedio de los videos analizados durante las pruebas de microdesgaste en seco.

La Tabla 3 resume los resultados cuantitativos de las pruebas de microdesgaste en seco. El número de prueba, el tiempo de adquisición, la distancia de deslizamiento estimada, la fuerza dinámica promedio, la fuerza máxima, el coeficiente de fricción y el coeficiente de desgaste específico preliminar se muestran en la tabla. Los tres videos muestran los valores del COF muy cercanos entre sí en el rango de 0.0624 a 0.0702. El Video 1 muestra la mayor fuerza dinámica promedio y el COF más alto, mientras que el Video 3 presenta la menor dispersión de fuerza y un contacto más estable en la prueba. El coeficiente de desgaste específico estimado está en el orden de $10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, con valores de 0.499, 0.624 y $0.613 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ para los Videos 1, 2 y 3, respectivamente.

TABLA 3
RESULTADOS CUANTITATIVOS OBTENIDOS DEL CONJUNTO DE PRUEBAS DE MICRODESgaste EN SECO.

Prueba	Tiempo (s)	s (mm)	F media ± DE (N)	F max (N)	COF	K × 10 ⁻⁹ (mm ³ /N·mm)
Video 1	958.19	250854	0.1377 ± 0.0600	0.22	0.0702	0.499
Video 2	766.16	200580	0.1255 ± 0.0229	0.16	0.064	0.624
Video 3	780.18	204251	0.1224 ± 0.0067	0.14	0.0624	0.613

IV. DISCUSIÓN

Las micrografías oportunas indican que la huella de desgaste no se desarrolla instantáneamente, sino más bien a través de una secuencia progresiva de contacto, deformación de la superficie, formación de surcos y acumulación local de partículas. Este comportamiento es consistente con la interpretación clásica de la prueba de microabrasión con bola rotativa, donde la morfología del cráter y su evolución temporal son criterios importantes para identificar el régimen de desgaste, así como el diámetro final de la huella [1].

En la Figura 2, a los 30 segundos ya se ha identificado una marca de desgaste inicial, como una zona de contraste irregular en el área de contacto. Este es el inicio del asentamiento de la bola de acero AISI 52100 y el policarbonato, con deformación localizada y suavizado de asperezas (y en tiempos más largos se observa una tendencia hacia surcos orientados). Las líneas direccionales y el material empujado hacia los bordes indican un proceso abrasivo dominante, ya que la evidencia óptica sugiere empuje y redistribución del polímero antes de que se rompa. Esto es consistente con los mapas de Adachi y Hutchings, donde el surcado se asocia con la dirección y orientación producidas por el contacto abrasivo efectivo [3].

En la Figura 3, vemos manchas negras como áreas de acumulación o compactación de partículas y sombreado óptico como resultado del relieve, rugosidad y pérdida local de transparencia del policarbonato. En condiciones secas, donde no hay lubricante o lodo para eliminar el material de la superficie, las partículas pueden permanecer en la interfaz y a veces actuar como un tercer cuerpo. Como consecuencia, la huella no parece homogénea y hay partes oscuras, bordes con material acumulado y trazas lineales. A los 299 segundos, los surcos y el desplazamiento lateral del material son los procesos dominantes y pueden entenderse como la transición del desgaste de dos cuerpos al desgaste de tres cuerpos discutido por Trezona, Allsopp, Hutchings y Gates [2].

Las regiones oscuras en la Figura 4 también deben entenderse como áreas de mayor modificación superficial: partículas compactadas, material polimérico deformado, material de transferencia y efectos de contraste debido a la curvatura del cráter. De 30 a 150 segundos, el material se desplaza gradualmente de la zona de contacto, lo que es una indicación de deformación superficial por arado. La evolución subsiguiente hacia una huella más definida con manchas oscuras y marcas de dirección muestra un desgaste abrasivo mixto: los surcos son los dominantes y las partículas atrapadas están involucradas en él. Esto último está en línea con Gates, quien dice que una separación muy estrecha entre la abrasión de dos cuerpos y de tres cuerpos no es posible si las partículas están atrapadas y compactadas o vuelven a entrar en contacto [6].

La comparación de las tres secuencias muestra que el mecanismo principal no cambia mucho entre los videos: en todos los casos se observa una formación progresiva del cráter, oscurecimiento localizado, surcos y material redistribuido. La principal diferencia está en la severidad visual y la estabilidad de la huella. La Figura 2 muestra la evolución más larga hasta los 720 segundos cuando los surcos pueden verse más claramente. Las Figuras 3 y 4, donde el video termina a los 299 segundos, muestran más claramente la acumulación de partículas y el contraste oscuro dentro del cráter. Las micrografías sugieren que la abrasión por micro-arado puede explicarse como resultado de la eliminación intermitente de residuos de material, así como por abrasión de corte. Los resultados cuantitativos también están en línea con esto, ya que la Tabla 3 muestra que la Prueba 5 fue la más estable, con una fuerza dinámica de 0.1224 ± 0.0067 N y un índice de fricción claro de 0.0624. En contraste con esto, la Prueba 4 tuvo una fuerza muy alta de 1.0052 ± 0.3337 N y una fricción clara de 0.5125, por lo que debe considerarse como una ejecución inusual que es más severa. Esto se debe a que Cozza Tanaka y Souza mostraron que la fricción y la respuesta dinámica son sensibles al cambio de régimen de desgaste en microabrasión. Por lo tanto, la señal más alta de la Prueba 4 podría ser una condición local menos estable debido a la captura de partículas o solo un pequeño aumento de la resistencia al deslizamiento, pero tampoco debe atribuirse a una sola causa [4].

El volumen para la huella promedio fue de 0.000245 mm^3 calculado en términos de la aproximación geométrica de un pequeño cráter esférico con un valor de $0.000101\text{-}0.000509 \text{ mm}^3$ para un diámetro de $0.4\text{-}0.6 \text{ mm}$. Esto es consistente con el enfoque de cráter de bola dado por Rutherford y Hutchings en el que la geometría del cráter nos permite estimar el volumen removido cuando la huella es pequeña en relación con el radio de la esfera. Sin embargo, no debemos interpretar el desgaste solo en términos de volumen, ya que las micrografías muestran que parte del material puede haber sido desplazado, compactado o redistribuido en el cráter [1].

En general, la prueba en seco indica que la huella tiene una abrasión por microarado dominante y partículas secundarias. Las micrografías ópticas nos permiten identificar la morfología, la dirección de los surcos y la acumulación de material, pero no nos permiten verificar la composición química u oxidación de las zonas negras. Para entender más claramente la naturaleza de estas zonas, se requeriría SEM/EDS, perfilometría o medición de cráter en 3D para completar el análisis.

El bajo COF puede atribuirse a la naturaleza localizada del contacto en el cráter de bola, al hecho de que la fuerza dinámica no es necesariamente puramente tangencial, al pequeño tamaño de la huella y a la posibilidad de que los desechos compactados estén presentes como un tercer cuerpo durante la prueba en seco. Como prueba en seco sobre policarbonato, los desechos pueden acumularse, compactarse o actuar como un tercer cuerpo. Esto puede aumentar la fricción a veces, pero también agregar una capa intermedia de material que reduce significativamente la resistencia al deslizamiento y, por lo tanto, el COF. Gee y Wicks encontraron que el cráter de bola puede ser un proceso no lubricado y que registrar la fricción en la prueba puede ayudar a explicar estos cambios de contacto [7].

11

V. CONCLUSIONES

- La huella de microdesgaste se formó de manera progresiva; a los 30 s ya se observa el inicio de la marca de desgaste y, conforme aumenta el tiempo, se definen el cráter, los bordes y los surcos.
- El mecanismo dominante observado en las Figuras 2, 3 y 4 corresponden a una deformación plástica, evidenciándose con desplazamiento del material y el desprendimiento, debido a la presencia de surcos direccionales y desplazamiento lateral del material.
- Las manchas o regiones negras no deben interpretarse como una fase química específica con la evidencia disponible; se asocian de forma más prudente con partículas compactadas, material deformado, cambios de rugosidad y efectos ópticos del relieve del cráter.
- La condición de ensayo en seco favoreció a que las partículas permanecieran en la interfase y actuaran de forma intermitente como tercer cuerpo, generando una condición de desgaste abrasivo mixto.
- La Prueba 5 presentó la respuesta dinámica más estable, mientras que la Prueba 4 mostró una condición atípica de mayor severidad; esta diferencia apoya la conveniencia de analizar simultáneamente micrografías, fuerza-tiempo y geometría del cráter.
- El volumen estimado de 0.000245 mm^3 es útil como indicador geométrico de desgaste, pero no describe por sí solo el mecanismo, ya que parte del material observado parece estar desplazado o compactado dentro y alrededor de la huella.
- Para fortalecer el artículo, se recomienda presentar esta interpretación como evidencia óptica de mecanismo de desgaste y evitar afirmaciones de composición o reacción química sin SEM/EDS o perfilometría 3D.
- Los tres videos evaluados presentaron valores de coeficiente de fricción aparente cercanos entre sí, con COF promedio de 0.0702, 0.0640 y 0.0624 para los Videos 1, 2 y 3, respectivamente.

- Los coeficientes específicos de desgaste estimados fueron del orden de 10^{-9} mm³/N·mm, lo que indica una remoción de material baja bajo las condiciones de ensayo utilizadas; sin embargo, estos valores deben considerarse preliminares porque se calcularon con una huella promedio de 0.5 ± 0.1 mm.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **TMR** (líder); Metodología: **TMR**; Desarrollo de software y desarrollo tecnológico: **MMM, LMM**; Investigación: **MMM, LMM, MTCB**; Redacción y preparación del borrador original: **MMM, LMM, MTCB, TMR**; Redacción, revisión y edición: **TMR**; Supervisión: **TMR**; Análisis formal: **TMR**; Administración del proyecto: **LMM, MTCB**; Transferencia tecnológica e implementación: **MMM, LMM**; Adquisición de fondos: **TMR**. Todos los autores han leído y aprobado la versión final del manuscrito.

Financiamiento: Los autores declaran que la presente investigación no recibió financiamiento externo específico de agencias del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Declaración de la disponibilidad de datos: Los datos que sustentan los hallazgos de este estudio se encuentran disponibles dentro del artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo al Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán por el respaldo institucional y las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] K. L. Rutherford, I. M. Hutchings, “A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 3, no. 79, pp. 231-239, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)
- [2] R. I. Trezona, D. N. Allsopp, I. M. Hutchings, “Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test,” *Wear*, vols. 225-229, part 1, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)
- [3] K. Adachi, I. M. Hutchings, “Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test,” *Wear*, vol. 255, no. 1-6, pp. 23-29, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00073-5)
- [4] R. C. Cozza, “Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests,” *Tribology International*, vol. 44, no. 12, pp. 1878-1889, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.08.006>
- [5] J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces,” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 981-988, 1953, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- [6] Gates, J. D., “Two-body and three-body abrasion: A critical discussion,” *Wear*, vol. 214, no. 1, pp. 139-146, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00188-9)
- [7] M.G Gee, M.J Wicks, “Ball crater testing for the measurement of the unlubricated sliding wear of wear-resistant coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vols. 133-134, no. 2000, pp. 376-382, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00966-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00966-X)

FOOTGGY: Diseño de un dispositivo inteligente para entrenamiento futbolístico

FOOTGGY: Design of a smart football training device

<https://cientifica.site>

Adriana Paola **Bueno Hernández** ¹
Luis Adrián **Zúñiga Avilés** ²
Juana Mariel **Dávila Vilchis** ³
Karla **Flores Sánchez** ⁴
Mariana **Cuenca Chávez** ⁵

Universidad Autónoma del Estado de México,
Facultad de Medicina,
Toluca, Estado de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0008-5870-2300 / abuenoh01@alumno.uaemex.mx

² ORCID: 0000-0002-4365-8537 / lazunigaa@uaemex.mx

⁴ ORCID: 0009-0003-5047-1062 / kfloress013@alumno.uaemex.mx

⁵ ORCID: 0009-0006-5185-020X / mcuencac001@alumno.uaemex.mx

Universidad Autónoma del Estado de México,
Facultad de Ingeniería,
Toluca, Estado de México, MÉXICO

³ ORCID: 0000-0002-2278-1296 / mdavilav@uaemex.mx

Recibido 10/05/2026, aceptado 25/06/2026, publicado 30/06/2026.



Resumen

Este artículo presenta el concepto de diseño para FOOTGGY, un dispositivo inteligente de entrenamiento futbolístico. A partir de una revisión sistemática previa, se construyó una matriz semicuantitativa aplicada a ocho patentes seleccionadas, evaluando velocidad, ángulo, precisión, control, tiempo de reacción, variables biomecánicas, parámetros espaciales 3D e imprevisibilidad. Los resultados muestran mayor cobertura en el control físico del sistema y menor integración de variables biomecánicas y cognitivas. Se propone FOOTGGY como dispositivo con módulo lanzador, estímulos LED, sensores, retroalimentación en tiempo real e integración IoT/IA. La métrica central es un error de precisión máximo del 2%, orientado a evaluar exactitud, variabilidad y repetibilidad del desempeño técnico del jugador.

Palabras clave: fútbol, revisión sistemática, dispositivos de entrenamiento, criterios de diseño, requerimientos del usuario.

2

Abstract

This article introduces the design concept for FOOTGGY, a smart football training device. Based on a previous systematic review, a semi-quantitative matrix was constructed and applied to eight selected patents, evaluating speed, angle, accuracy, control, reaction time, biomechanical variables, 3D spatial parameters, and unpredictability. The results show greater coverage in the physical control of the system and less integration of biomechanical and cognitive variables. FOOTGGY is proposed as a device with launcher module, LED stimuli, sensors, real-time feedback and IoT/AI integration. The core metric is a maximum accuracy error of 2%, aimed at assessing the player's technical performance, accuracy, variability, and repeatability.

Index terms: soccer, systematic review, training devices, design criteria, user requirements.

I. INTRODUCCIÓN

El entrenamiento fútbolístico contemporáneo demanda herramientas capaces de medir y mejorar la ejecución técnica bajo condiciones cercanas al juego real. Aunque existen lanzadores automáticos, wearables, sistemas ópticos y plataformas de simulación, muchas soluciones permanecen fragmentadas: unas controlan el balón, otras registran datos del jugador y otras generan análisis visual o táctico. Esta fragmentación dificulta la creación de dispositivos integrales, accesibles y adaptables a academias, clubes y procesos de formación deportiva.

Se identificaron ocho criterios de diseño y una lista de requerimientos del usuario para dispositivos de entrenamiento fútbolístico. A partir de estos, el presente trabajo desarrolla el diseño conceptual de FOOTGGY, un dispositivo inteligente para evaluar precisión, tiempo de reacción, repetibilidad, desempeño biomecánico y toma de decisiones mediante estímulos controlados. Los criterios de diseño y requerimientos del usuario empleados como entrada metodológica fueron derivados de una revisión sistemática previa sobre dispositivos de entrenamiento fútbolístico hacia la Copa Mundial 2026 [1].

Las limitaciones del estado del arte y de la técnica se agrupan en cuatro dimensiones: limitada integración entre lanzamiento y medición del usuario; escasa retroalimentación inmediata; bajo uso de modelos de error para cuantificar precisión; y brecha entre invención patentada e implementación real en entrenamiento. Además, los sistemas comerciales de alto desempeño suelen ser costosos y de difícil acceso para academias pequeñas o instituciones en contextos latinoamericanos [2], [3], [4], [5].

3

La contribución científica de este trabajo consiste en transformar criterios de diseño derivados de una revisión sistemática en una priorización técnica mediante matriz semicuantitativa, y utilizarla como base para formular el diseño conceptual y matemático de FOOTGGY. Asimismo, se establece una estrategia de propiedad intelectual orientada a proteger la arquitectura funcional del dispositivo.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La primera sección presenta la metodología de diseño. La sección dos desarrolla el diseño conceptual de FOOTGGY, incluyendo modelo matemático, evaluaciones y priorización. La sección tres aborda el diseño del dispositivo, dando a conocer métricas, rangos funcionales y sensores propuestos para incorporar al dispositivo. Finalmente, la sección cuatro presenta la estrategia de propiedad intelectual y conclusiones.

II. METODOLOGÍA DE DISEÑO

A. Entrada metodológica

En un estudio previo se revisó el estado de la técnica y del arte, en esta revisión de los documentos de patente seleccionados se establecieron dos tablas: una tabla con ocho criterios de diseño y una de nueve requerimientos del usuario [6]. Estos elementos se utilizaron como base para evaluar la cobertura técnica de los dispositivos de entrenamiento de fútbol.

B. Selección de patentes

Se analizaron ocho patentes relacionadas con dispositivos de entrenamiento fútbolístico, clasificadas en cuatro grupos:

Clase A: lanzadores automáticos de balón.

Clase B: sistemas de simulación, inteligencia artificial o reconstrucción espacial.

Clase C: wearables deportivos.

Clase D: sistemas interactivos o de rebote.

Las patentes fueron seleccionadas con base en su relación directa con fútbol, presencia de métricas técnicas y pertenencia a clasificaciones IPC, principalmente A63B [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

C. Matriz semicuantitativa de cobertura técnica

Para cada patente se evaluó la presencia de los ocho criterios de diseño mediante una escala semicuantitativa:

0: criterio ausente.

0.5: criterio presente de forma indirecta, parcial o inferida.

1: criterio explícitamente descrito o funcionalmente integrado.

La matriz no representa datos experimentales de campo, sino una extracción estructurada del estado de la técnica. Su objetivo es identificar tendencias, vacíos y oportunidades de diseño.

D. Criterios evaluados

Los criterios evaluados fueron:

1. Velocidad de lanzamiento.
2. Ángulo de salida.
3. Precisión / error.
4. Control.
5. Tiempo de reacción.
6. Variables biomecánicas.
7. Parámetros espaciales 3D.
8. Imprevisibilidad / variabilidad.

FOOTGGY se concibe como un dispositivo inteligente de entrenamiento fútbolístico capaz de lanzar, recibir, medir y retroalimentar acciones técnicas del jugador [15]. Su objetivo es integrar en una sola arquitectura el control físico del balón, la medición del desempeño del usuario y la adaptación de la dificultad. Tomando como base los requerimientos del usuario y criterios de diseño previamente establecidos en la revisión patentométrica, tal como se muestra en la Fig. 1.

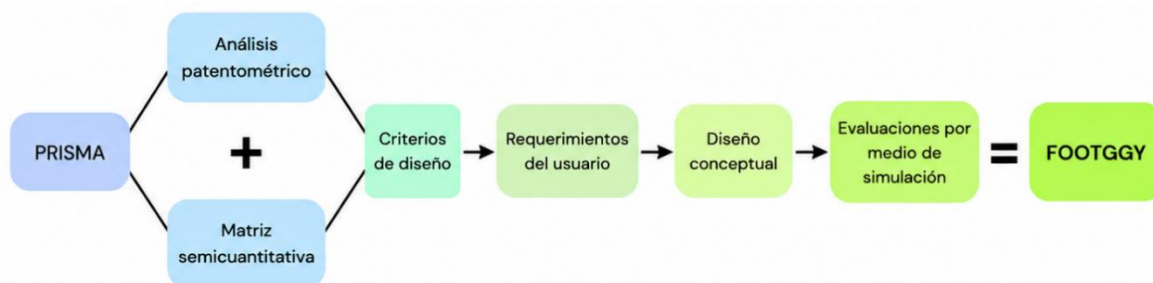


Fig. 1. Esquema metodológico para la definición de los requerimientos de diseño de FOOTGGY.

III. CONCEPTO DE DISEÑO DE FOOTGGY

El diseño basado en el análisis patentométrico incorpora sensores y retroalimentación en tiempo real, permitiendo medir precisión, tiempo de reacción y fuerza de impacto, apoyado por luces LED que dan la señal para que el usuario sepa dónde debe apuntar el balón. El dispositivo integra una interfaz digital con conectividad IoT e inteligencia artificial, lo que permite personalizar entrenamientos, programar sesiones y analizar datos desde una aplicación o plataforma web. Su enfoque escalable permite utilizarla desde academias juveniles pequeñas hasta clubes profesionales, ofreciendo un modelo adaptable para futuros desarrollos comerciales

A. Priorización para FOOTGGY

La priorización no debe limitarse a los criterios con mayor cobertura en patentes, ya que los criterios menos representados pueden constituir oportunidades de innovación. En este sentido, FOOTGGY debe integrar dos grupos de variables:

Grupo 1: Control físico del sistema: velocidad, ángulo, precisión y control. Estos criterios garantizan repetibilidad mecánica y programación objetiva del entrenamiento.

Grupo 2: Interacción biomecánica y cognitiva: tiempo de reacción, variables biomecánicas, parámetros 3D e imprevisibilidad. Estos criterios diferencian a FOOTGGY de lanzadores convencionales y permiten evaluar la respuesta integral del jugador.

B. Arquitectura propuesta

La arquitectura de FOOTGGY puede organizarse en cinco subsistemas:

- 1) Lanzamiento: Su función es generar estímulos físicos controlados como la velocidad, ángulo, frecuencia, giro.
- 2) Estímulo: Su función es señalar el objetivo o la condición que debe generar la respuesta del jugador.
- 3) Medición: Se encarga de registrar la respuesta del jugador, considerando variables como impacto, trayectoria, tiempo y posición.
- 4) Análisis: Su propósito es calcular métricas de desempeño, incluyendo error, precisión global, variabilidad y tiempo de reacción.
- 5) Retroalimentación: Tiene como función informar sobre el desempeño y ajustar la dificultad mediante reportes, alertas, niveles y progresión.

C. Modelo matemático

Tiempo de reacción: El tiempo de reacción mide el intervalo entre la presentación del estímulo y la ejecución observable de la respuesta:

$$t_{reaccion} = t_{respuesta} - t_{estimulo} \quad (1)$$

Error de precisión: evalúa qué tan bien se ejecuta el gesto técnico (como se muestra en las Figuras 6 y 7, donde se presenta una simulación de las ejecuciones del jugador y el valor del error respecto a cada intento).

$$E_p = \sqrt{(x_{target} - x_{real})^2 + (y_{target} - y_{real})^2} \quad (2)$$

Donde:

(x_{target}, y_{target}) : objetivo

(x_{real}, y_{real}) : posición del impacto

Precisión global: muestra un porcentaje para saber qué tan cerca o lejos llega el balón al objetivo.

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (3)$$

Donde:

$\bar{e}$: error medio de precisión

e_i : error de cada intento

N : número total de intentos

Variabilidad: identifica cuántas veces el balón llegó al mismo punto (repetibilidad).

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (e_i - \bar{e})^2} \quad (4)$$

Donde:

σ_e : desviación estándar del error

e_i : error de cada intento

$\bar{e}$: error medio de precisión

N : número total de intentos

Error biomecánico: cuantifica errores de la técnica (mala postura, riesgo de lesión o ineficiencia mecánica), mide el resultado así como se ejecuta.

$$E_{bio} = \sum_{j=1}^n (\theta_j - \theta_j^{ideal})^2 \quad (5)$$

Donde

θ_j : ángulos articulares medidos

θ_j^{ideal} : patrón ideal

D. Resultados de la matriz semicuantitativa

Con base en los ocho documentos de patente utilizados en la revisión patentométrica se propone una matriz semicuantitativa de cobertura técnica expresada en la Tabla 1. asignando a cada patente/dispositivo valores 0, 0.5 o 1 según presencia del criterio.

TABLA 1
MATRIZ SEMICUANTITATIVA DE COBERTURA TÉCNICA

Disp.	Velocidad de lanzamiento	Angulo de salida	Precisión	Control	Tiempo de reacción	Variables biomecánicas	Parámetros 3D	Imprevisibilidad / variabilidad
1	1	1	1	0.5	0	0.5	0.5	0.5
2	1	1	0	1	0	0	0.5	0.5
3	0	1	0	0.5	0	1	0.5	0
4	1	0	1	1	0	0	0.5	1
5	0.5	1	1	1	1	0.5	1	0.5
6	0.5	1	0.5	1	0	0.5	0	1
7	0.5	1	1	0.5	1	0.5	0.5	0.5
8	1	0	0	0.5	1	0	1	0.5

La matriz de cobertura técnica permitió calcular medias, medianas y rangos de implementación para cada criterio, estas estadísticas se muestran en la Tabla 2. Los criterios con mayor cobertura fueron ángulo de salida y control, ambos con media de 0.75. La velocidad de lanzamiento presentó media de 0.6875. Precisión, parámetros 3D e imprevisibilidad alcanzaron media de 0.5625. En contraste, tiempo de reacción y variables biomecánicas obtuvieron media de 0.375, evidenciando menor integración en las patentes analizadas.

TABLA 2
ESTADÍSTICAS USANDO LA MATRIZ SEMICUANTITATIVA DE COBERTURA TÉCNICA.

Criterio	Media	Mediana	Q1	Q2
Velocidad de lanzamiento	0.6875	0.75	0.5	1
Ángulo de salida	0.75	1	0.75	1
Precisión / error	0.5625	0.75	0	1
Control	0.75	0.75	0.5	1
Tiempo de reacción	0.375	0	0	1
Variables biomecánicas	0.375	0.5	0	0.5
Parámetros 3D	0.5625	0.5	0.5	0.625
Imprevisibilidad / variabilidad	0.5625	0.5	0.5	0.625

La matriz semicuantitativa permite identificar no solo la frecuencia con que aparece cada criterio de diseño en los documentos analizados, sino también su grado de consolidación tecnológica dentro del estado de la técnica. En este sentido, los valores de media, mediana y cuartiles permiten diferenciar entre criterios ampliamente incorporados en dispositivos existentes y criterios emergentes que aún presentan baja integración. La Tabla 3 interpreta estos resultados y permite establecer cuáles variables deben conservarse como requisitos funcionales básicos y cuáles representan oportunidades de innovación para el diseño de FOOTGGY.

TABLA 3
INTERPRETACIÓN TÉCNICA DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO A PARTIR DE LA MATRIZ SEMICUANTITATIVA DE COBERTURA TECNOLÓGICA.

Criterio	Interpretación
Velocidad de lanzamiento	La velocidad de lanzamiento presenta una media de 0.6875 y una mediana de 0.75, lo que indica una presencia alta en los dispositivos analizados, principalmente en lanzadores mecánicos, máquinas de servicio y sistemas de proyección de balón. Este criterio se encuentra relativamente consolidado, ya que la mayoría de las tecnologías consideran algún mecanismo para controlar la velocidad inicial, velocidad de retorno o intensidad del estímulo.
Ángulo de salida	El ángulo de salida obtuvo una media de 0.75 y una mediana de 1, con valores altos en los cuartiles, lo que demuestra que es uno de los criterios más consolidados dentro del estado de la técnica. Este criterio es esencial porque permite reproducir condiciones variables de juego, modificar la dirección del estímulo y entrenar la adaptación del jugador ante trayectorias cambiantes.
Precisión / error	La precisión presenta una media de 0.5625 y una mediana de 0.75, pero con un Q1 de 0, lo que refleja una integración desigual entre los documentos analizados. Aunque varios dispositivos mencionan precisión, zona objetivo o trayectoria, no todos incorporan un modelo matemático explícito para calcular el error.
Control	El control obtuvo una media de 0.75 y una mediana de 0.75, lo que indica una presencia alta y consistente en el estado de la técnica. Este criterio se relaciona con la capacidad de programar velocidad, ángulo, frecuencia, secuencia de lanzamiento, dificultad y condiciones de entrenamiento. Su importancia radica en que transforma el dispositivo de una máquina mecánica simple a una plataforma programable de entrenamiento.
Tiempo de reacción	El tiempo de reacción presenta una media de 0.375 y una mediana de 0, lo que evidencia una baja integración en las tecnologías analizadas. Este resultado muestra que la mayoría de los dispositivos se enfocan en lanzar o devolver balones, pero no cuantifican de manera sistemática la respuesta perceptivo-motora del jugador.
Variables biomecánicas	Las variables biomecánicas obtuvieron una media de 0.375 y una mediana de 0.5, lo que indica una presencia parcial, principalmente asociada a wearables, sensores de presión, acelerómetros o dispositivos de monitoreo corporal. La baja cobertura refleja que los lanzadores tradicionales no suelen integrar información del cuerpo del jugador.
Parámetros 3D	Los parámetros espaciales 3D presentan una media de 0.5625 y una mediana de 0.5, lo que indica una presencia intermedia y emergente. Este criterio aparece principalmente en sistemas de visión por computadora, reconstrucción espacial y análisis de trayectoria. Su integración permite pasar de una evaluación bidimensional del impacto a una comprensión más completa de la relación entre jugador, balón y entorno.
Imprevisibilidad / variabilidad	La imprevisibilidad presenta una media de 0.5625 y una mediana de 0.5, esto indica una presencia intermedia en el estado de la técnica. Aunque algunos dispositivos permiten variar ángulos, trayectorias o secuencias, pocos integran la variabilidad como criterio formal de diseño. Su incorporación permitiría generar rutinas aleatorias o adaptativas que mejoren la toma de decisiones, la reacción y la transferencia del entrenamiento a situaciones reales de juego.

En la Figura 2, se observa que variables como el ángulo de salida y el control presentan medianas elevadas y baja dispersión, lo que indica una implementación consistente en la mayoría de los sistemas analizados. En contraste, el tiempo de reacción y las variables biomecánicas muestran medianas más bajas y mayor variabilidad, evidenciando una menor integración de estos parámetros en el diseño de los dispositivos.

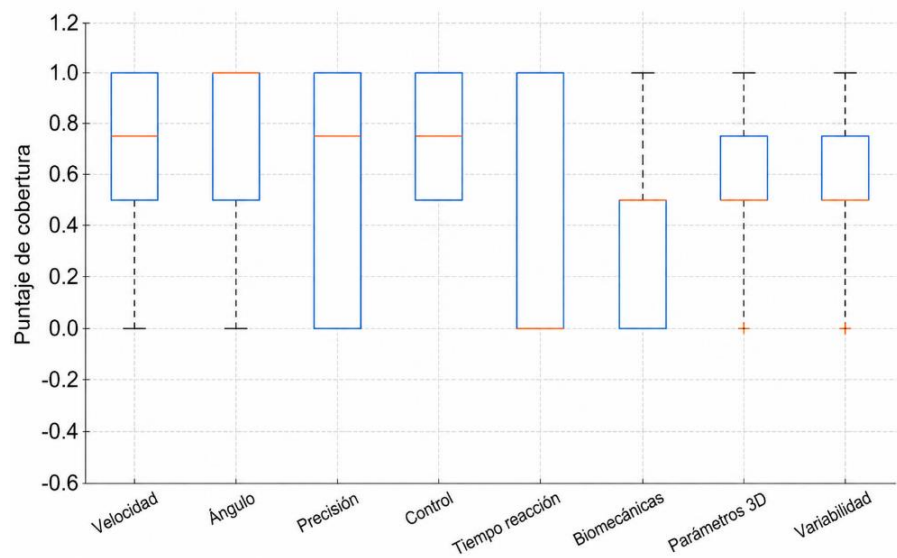


Fig. 2. Diagrama de cajas de los ocho criterios de diseño.

Por otra parte, la Figura 3 muestra una comparación entre dos grupos: control físico del sistema (velocidad, ángulo, precisión y control) e interacción biomecánica (tiempo de reacción, variables biomecánicas, parámetros espaciales 3D y variabilidad). Los resultados muestran una mayor concentración de valores altos en el grupo de control físico, indicando que las soluciones actuales priorizan el desempeño mecánico del lanzamiento.

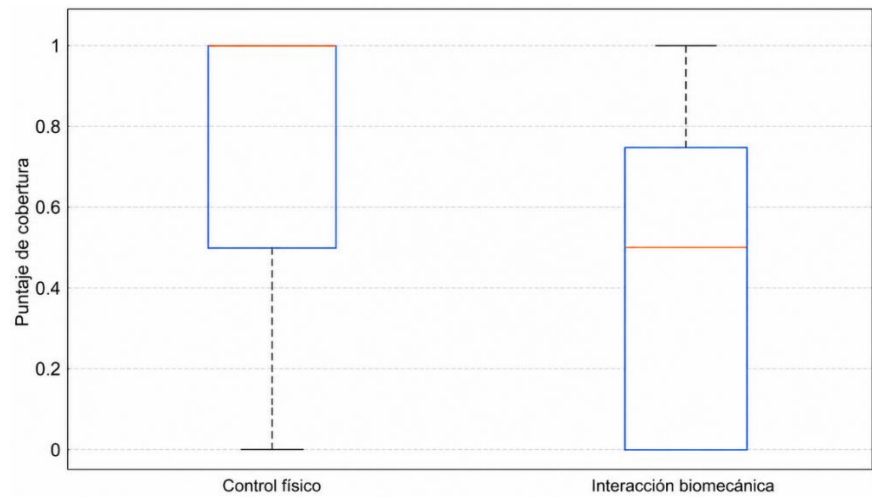


Fig. 3. Diagrama de cajas comparando el control físico del sistema contra la interacción biomecánica.

La estrategia de diseño consiste en mantener el control físico como núcleo funcional y utilizar las variables biomecánicas/cognitivas como diferenciadores tecnológicos.

E. Simulaciones

Con base en la priorización realizada, la precisión/error se considera una métrica central para el diseño de FOOTGGY, ya que permite cuantificar objetivamente la diferencia entre el punto objetivo y el punto real de impacto del balón. La Figura 4 ilustra esta métrica, se realizó una simulación en MATLAB® en la que se representan diferentes ejecuciones del jugador respecto a una zona objetivo. La dispersión de los puntos permite observar la variabilidad espacial de los intentos y estimar la consistencia técnica del usuario.

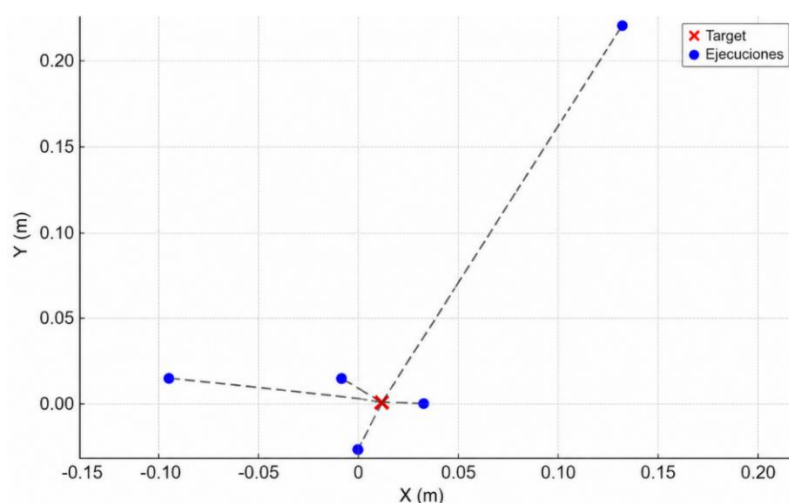


Fig. 4. Error de precisión.

Además de representar espacialmente la dispersión de los impactos, resulta necesario analizar el comportamiento del error en cada intento. Esta visualización, expresada en la Figura 5, permite identificar tendencias de mejora, estabilidad o variabilidad durante la sesión de entrenamiento. En el contexto de FOOTGGY, el análisis del error por intento puede utilizarse para generar retroalimentación inmediata, ajustar la dificultad del ejercicio y evaluar si el jugador mantiene el desempeño dentro de una tolerancia máxima de error del 2%.

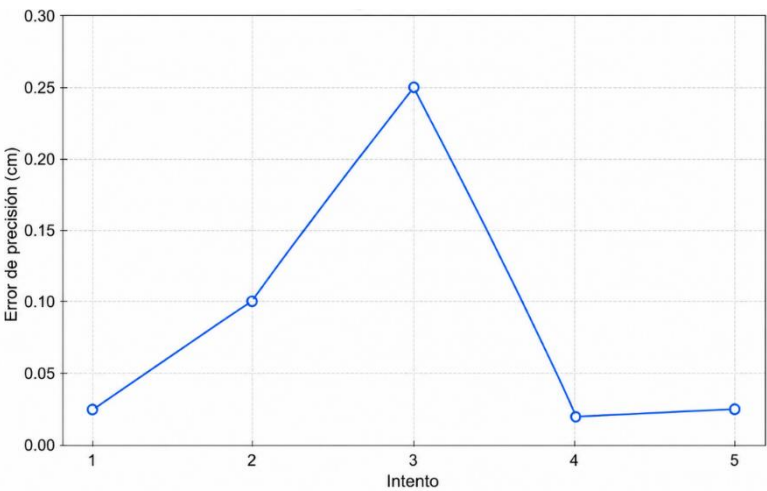


Fig. 5. Error de precisión por intento.

IV. DISEÑO DE FOOTGGY

En la Figura 6 se presenta el diseño conceptual de FOOTGGY, desarrollado a partir del análisis patentométrico, las simulaciones del error de precisión y los resultados estadísticos derivados de la matriz semicuantitativa [16]. El sistema incorpora sensores y retroalimentación en tiempo real para medir precisión, tiempo de reacción y fuerza de impacto. Además, integra señales luminosas mediante luces LED, las cuales indican al usuario la zona objetivo hacia donde debe dirigir el balón. El dispositivo contempla una interfaz digital con conectividad IoT e inteligencia artificial, lo que permite personalizar entrenamientos, programar sesiones, registrar métricas de desempeño y analizar la evolución del jugador desde una aplicación o plataforma web. Su enfoque modular y escalable permite su uso tanto en academias juveniles como en clubes profesionales, ofreciendo un modelo adaptable para futuros desarrollos comerciales. Asimismo, en la Tabla 4 se presentan las métricas funcionales y los sensores propuestos para la integración tecnológica de FOOTGGY.



Fig. 6. Diseño realizado con base en el análisis patentométrico.

TABLA 4
MÉTRICAS, RANGOS FUNCIONALES Y SENSORES PROPUESTOS PARA INCORPORAR AL DISPOSITIVO FOOTGGY

Criterio / Función	Métricas	Sensor / Componente	Propósito
Velocidad de lanzamiento	18-120 km/hr 5-35 m/s	Sensor Hall; radar Doppler compacto; cámara de alta velocidad.	Controlar la intensidad del pase, centro o tiro.
Pase largo /centro	70-100 km/hr	Encoder + radar Doppler / cámara	Simulación de centros, despejes y pases largos.
Pase corto	18-43 km/hr	Encoder + control PWM de motor DC/BLDC.	Entrenamiento de recepción, pase corto y control orientado.
Ángulo vertical de salida	-5° a 45°	Servomotor con encoder absoluto; inclinómetro IMU; potenciómetro angular	Ajustar trayectoria baja, media o elevada.
Ángulo de llegada de balón	0° a 60°	Cámara RGB/depth; IMU del módulo lanzador; sensor angular.	Simular trayectorias realistas de juego.
Altura de llegada de balón	0.05-2.5 m	Cámara RGB-D; sensor ToF; LiDAR corto alcance.	Evaluar control con pie, muslo, pecho o recepción aérea.
Frecuencia de lanzamiento	0.05–0.25 Hz, equivalente a 1 balón cada 4–20 s	Sensor óptico de presencia de balón; temporizador interno.	Programar ritmo de entrenamiento.
Distancia jugador máquina	5-30 m	Cámara RGB-D; LiDAR; sensor ultrasónico; configuración manual en software.	Adaptar dificultad y calcular error relativo.
Error relativo objetivo	≤2% de la distancia de ejecución	Visión por computadora + cálculo euclidiano.	Definir tolerancia central de desempeño.
Precisión avanzada	≥80% de aciertos en zona objetivo	Cámara + algoritmo de clasificación de acierto.	Clasificar nivel avanzado del usuario.
Tiempo de estímulo-primer movimiento	0.15–0.80 s	Cámara RGB; IMU corporal; sensor de presión plantar; acelerómetro.	Medir reacción inicial del jugador.
Tiempo estímulo-contacto con el balón	0.30–1.50 s	IMU en pie; sensor de contacto; cámara de alta velocidad.	Medir respuesta completa ante estímulo.
Tiempo de decisión	0.50–3.00 s	Botón/trigger visual; cámara; software de eventos.	Evaluar la toma de decisión.
Puntuación de desempeño	0-100 puntos	Software de evaluación.	Índice global para comparar sesiones.
Variación de velocidad entre lanzamientos	±10–30%	Algoritmo aleatorio / adaptativo + control de motor	Generar imprevisibilidad
Zonas objetivo	6–20 zonas	Panel LED; matriz de sensores; cámara	Entrenar dirección de pase o tiro.
Fuerza de impacto	0–3000 N	Celda de carga; sensor piezoeléctrico; FSR de alta capacidad.	Medir intensidad de golpeo o recepción.
Sincronización entre sensores	≤0.05 s	Timestamp común; NTP local; reloj de microcontrolador.	Sincronizar cámara, IMU, LEDs y lanzamiento.
Sesiones para análisis longitudinal	≥10 sesiones	Dashboard de desempeño.	Comparación robusta entre sesiones.

A. Composición general del sistema

En la Tabla 5 se muestran los componentes principales de este nuevo dispositivo, organizados de acuerdo con su función dentro de la arquitectura general de FOOTGGY. La propuesta integra módulos mecánicos de lanzamiento, paneles de contacto, sensores de medición, elementos de retroalimentación visual y una unidad electrónica de control. Esta organización permite visualizar cómo cada componente contribuye a la generación del estímulo, la detección del impacto, el registro de métricas y la retroalimentación al usuario durante la sesión de entrenamiento.

TABLA 5
DIAGRAMA ESTRUCTURAL DE FOOTGGY.

Subsistema	Cantidad	Función principal
Módulos de lanzamiento	2	Lanzar balones desde diferentes trayectorias.
Paneles de contacto	15-20	Detectar impacto y precisión.
LEDs	20 o más	Señalar objetivos y retroalimentar al usuario.
Sensores de impacto	20	Medir zona de contacto y fuerza.
Sensores de velocidad	2-4	Medir RPM o velocidad del balón.
Sensores angulares	2-4	Medir inclinación y orientación de lanzamiento.
Cámara RGB-D	2	Registrar trayectoria, jugador y balón.
Unidad de control	1	Coordinar sensores, motores y datos.
Interfaz digital	1	Programar sesiones y visualizar resultados.
Módulo IoT/ IA	1	Conectividad, análisis y personalización.

B. Desempeño esperado

El dispositivo se orienta a medir cuatro indicadores principales:

- 1) Precisión técnica: distancia entre objetivo e impacto.
- 2) Consistencia: variabilidad de la precisión entre intentos.
- 3) Velocidad de respuesta: tiempo entre estímulo y ejecución.
- 4) Calidad biomecánica: desviación respecto a patrones técnicos seguros o eficientes.

Con estos indicadores, FOOTGGY puede generar reportes por sesión, evolución longitudinal del jugador y niveles de dificultad progresiva.

C. Protección intelectual

El análisis patentométrico muestra que existen documentos relacionados con lanzadores, simuladores, wearables y sistemas inteligentes. Sin embargo, la combinación específica de lanzamiento controlado, estímulos LED, medición de error de precisión, tiempo de reacción, retroalimentación en tiempo real y adaptación inteligente constituye una oportunidad para formular una invención con enfoque integrador.

Como parte de la estrategia de protección intelectual del dispositivo FOOTGGY, se realizó la solicitud de registro de diseño industrial ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), con el propósito de proteger la configuración ornamental y la apariencia externa del dispositivo. Esta solicitud quedó registrada con el número

MX/f/2026/001484, lo que constituye un primer mecanismo de protección formal asociado al desarrollo tecnológico propuesto. La protección mediante diseño industrial complementa la estrategia de patentamiento funcional, ya que resguarda los elementos visuales, morfológicos y configuracionales del dispositivo, mientras que una eventual solicitud de patente o modelo de utilidad permitiría proteger sus componentes técnicos, mecanismos de operación, sistema de medición y método de retroalimentación inteligente.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolló el diseño de un FOOTGGY, un dispositivo inteligente para entrenamiento de fútbol, a partir de ocho criterios de diseño establecidos en una revisión sistemática previa realizada por los autores. El dispositivo está orientado a la medición objetiva del desempeño técnico del jugador. A partir de una matriz semicuantitativa aplicada a patentes seleccionadas, se identificó que los criterios con mayor cobertura tecnológica son el ángulo de salida, el control y la velocidad de lanzamiento, lo que evidencia que el estado de la técnica ha priorizado principalmente el control físico del balón y la repetibilidad mecánica del entrenamiento.

En contraste, los criterios relacionados con el tiempo de reacción y las variables biomecánicas mostraron menor cobertura, lo que revela una oportunidad de innovación para el desarrollo de dispositivos que no solo proyecten o devuelvan balones, sino que también evalúen la respuesta perceptivo-motora, la precisión, la variabilidad y la calidad técnica del usuario. En este sentido, FOOTGGY se plantea como una propuesta integradora que combina lanzamiento controlado, estímulos visuales, medición del error de precisión, retroalimentación en tiempo real.

La métrica de error de precisión máximo del 2% se establece como un parámetro central para evaluar la exactitud, repetibilidad y consistencia del desempeño técnico. Esta métrica permite transformar la ejecución del jugador en datos cuantificables, facilitando el seguimiento longitudinal, la comparación entre sesiones y la adaptación progresiva de la dificultad del entrenamiento.

Finalmente, como resultado del proceso de diseño y desarrollo conceptual, se realizó la solicitud de registro de diseño industrial ante el IMPI. Este registro constituye un avance formal en la protección intelectual de FOOTGGY y fortalece su potencial de transferencia tecnológica, escalamiento y futura validación experimental en academias, clubes deportivos y entornos de entrenamiento futbolístico.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Metodología, Investigación, Redacción y preparación del borrador original, Redacción, revisión y edición, Supervisión, Análisis formal, Administración del proyecto: **APBH, LAZA, JMDV, KFS, MCC.**

Financiamiento: Los autores declaran no haber recibido financiación externa.

Declaración de la disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo y pueden ser solicitado datos adicionales al email: lazunigaa@uaemex.mx.

Agradecimientos: Los autores agradecen las facilidades otorgadas para utilizar los laboratorios de Bioingeniería Biomédica de la UAEMEX.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] A. P. Bueno Hernández, L. A. Zúñiga Avilés, J. M. Dávila Vilchis, "Criterios de diseño y requerimientos del usuario para dispositivos de entrenamiento de fútbol: Hacia la Copa Mundial 2026." 30 de abril del 2026.
- [2] D. Eager, K. Ishac, S. Zhou, I. Hossain, "Investigating the knuckleball effect in soccer using a smart ball and training machine," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 11, p. 3984, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22113984>
- [3] A. Gascón, et al., "A diagnostic and performance system for soccer: Technical design and development," *Sports (Basel)*, vol. 13, no. 1, p. 10, 2025, <https://doi.org/10.3390/sports13010010>
- [4] B. Hollaus, C. Raschner, A. Mehrle, "Development and verification of a highly accurate and precise passing machine for American football," in the 13th Conference of the International Sports Engineering Association, 2020, p. 94, <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049094>
- [5] J. Susila, et al., "Automatic ball launcher machine for goalkeeper training using YOLO deep learning algorithm," in 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), 2023, pp. 965-971, <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427805>
- [6] J. R. Meda-Gutiérrez, L. A. Zúñiga-Avilés, A. H. Vilchis-González, J. C. Ávila-Vilchis, "Knee exoskeletons design approaches to boost strength capability: A review," *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 11, no. 21, p. 9990, 2021, <https://doi.org/10.3390/app11219990>
- [7] D. S. Lee, et al., "Mechanical multifunctional football training machine," CN Patent CN112973075A, 2021, <https://patents.google.com/patent/CN112973075A/en>
- [8] J. M. Lozano Carvajal, "Espinillera inteligente," WO Patent WO2021/074468 A1, Apr. 22, 2021, <https://patents.google.com/patent/WO2021074468A1/es>
- [9] J. H. Na, "Automatic ball launching device," KR Patent KR1020220022221, Feb. 25, 2022.
- [10] B. T. Naik, M. F. Hashmi, N. D. Bokde, "A comprehensive review of computer vision in sports: Open issues, future trends and research directions," *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 12, no. 9, p. 4429, 2022, <https://doi.org/10.3390/app12094429>
- [11] C. Spiteri, "Generating a three-dimensional topography of a training environment," US12394072B1, Aug. 19, 2025, <https://patents.google.com/patent/US12394072B1/>
- [12] K. A. Tsotsos, "Soccer training wall," GR1010187B, 2022, <https://patents.google.com/patent/GR1010187B/en>
- [13] N. Xu, et al., "Artificial intelligence-based soccer training service device and method," KR102693018B1, 08-Aug-2024, <https://patents.google.com/patent/KR102693018B1/en>
- [14] N. Z. Z. P. Yang, "Football training equipment with collect and launch function," CN113730891A, 03-Dec-2021, <https://patents.google.com/patent/CN113730891A/en>
- [15] M. J. Page, et al., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, p. n71, 2021, <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [16] L. A. Zúñiga Avilés, et al., "MOPAREM: movilizador pasivo de muñeca implementado en tres casos de estudio," *CIENCIA ergo-sum*, 2020, <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/14608>

Hacia un currículo de ingeniería basado en microcredenciales para la era de la inteligencia artificial

Towards a Micro-credential-based Engineering Curriculum
for the Age of Artificial Intelligence

Juan Carlos Jáuregui Correa ¹
Mihir Sen ²

¹ Universidad Autónoma de Querétaro,
Facultad de Ingeniería,
MÉXICO
ORCID: 0000-0002-8961-103X
jc.jauregui@uaq.mx

² University of Notre Dame,
ESTADOS UNIDOS
ORCID: 0000-0002-5136-7940
Mihir.Sen.1@nd.edu

<https://cientifica.site>

Recibido 20/05/2026, aceptado 28/06/2026, publicado 30/06/2026.



Resumen

La educación superior en ingeniería enfrenta una transformación sin precedentes, impulsada por la rápida evolución de las tecnologías digitales, la disponibilidad masiva de información y la incorporación creciente de sistemas de inteligencia artificial (IA) en prácticamente todos los ámbitos del conocimiento. Los modelos curriculares tradicionales, estructurados mediante asignaturas de duración fija y secuencias rígidas de aprendizaje, muestran dificultades para adaptarse a la velocidad con la que evolucionan las competencias requeridas por la industria y la sociedad. En este trabajo se analiza críticamente la estructura actual de los programas de ingeniería y se propone un nuevo paradigma educativo basado en nodos de conocimiento y certificación de competencias. El modelo sustituye la organización tradicional por asignaturas por una red de certificaciones teóricas, prácticas y de proyectos que los estudiantes pueden completar de acuerdo con su ritmo de aprendizaje. Asimismo, se propone la microcredencialización como mecanismo natural para implementar esta estructura, permitiendo la acumulación progresiva de competencias verificables y favoreciendo el aprendizaje permanente. Se discute el papel de la inteligencia artificial como herramienta de apoyo al aprendizaje autónomo y se analizan las implicaciones de esta propuesta para la formación de ingenieros en el siglo XXI.

2

Palabras clave: educación en ingeniería, inteligencia artificial, currículo basado en competencias, microcredenciales, aprendizaje permanente.

Abstract

Engineering higher education is currently experiencing an unprecedented transformation driven by the rapid evolution of digital technologies, the widespread availability of information, and the growing incorporation of artificial intelligence (AI) systems into nearly every domain of knowledge. Traditional curricula, organized into fixed-duration courses and rigid learning sequences, face increasing difficulties adapting to the pace at which industry and society require new competencies. This paper critically analyzes the current structure of engineering programs and proposes a new educational paradigm based on competency certification nodes. The proposed model replaces traditional course-based structures with a network of theoretical, practical, and project certifications that students may complete at their own pace. Furthermore, micro-credentialing is proposed as the natural implementation mechanism for this framework, enabling the accumulation of verifiable competencies and supporting lifelong learning. The role of artificial intelligence as a tool for self-directed learning is discussed, and the implications of this proposal for engineering education in the twenty-first century are analyzed.

Index terms: engineering education, artificial intelligence, competency-based curriculum, micro-credentials, lifelong learning.

I. INTRODUCCIÓN

La educación universitaria ha permanecido relativamente estable durante más de un siglo. A pesar de las profundas transformaciones tecnológicas ocurridas desde la segunda mitad del siglo XX, la estructura fundamental de los programas académicos continúa organizada alrededor de asignaturas independientes impartidas durante períodos semestrales o trimestrales, evaluadas mediante sistemas de calificación y agrupadas en planes de estudio rígidos.

Se han escrito numerosos libros sobre el desperdicio de tiempo y dinero que supone cursar estudios universitarios [1]. No obstante, a veces se tiene la errónea impresión de que este fenómeno se da en disciplinas que podrían denominarse, en términos generales, «ciencias sociales», pero no necesariamente en las «ciencias exactas» (incluida la ingeniería). Los autores temen que la tendencia actual de reducción de la matrícula de pregrado continúe y conduzca a una situación drástica que nadie desea [2], [3]. La reforma curricular en las universidades debe surgir desde dentro; de lo contrario, será impuesta por otros factores [4], como la elección de carreras [5] y otras posibles características. Por lo tanto, es importante actuar de inmediato para remediar la situación y hacer planteamientos disruptivos que se adapten al nuevo orden social y la disponibilidad de las nuevas tecnologías.

Las ideas sobre el proceso educativo han cambiado en los últimos años, y la mayoría de las modificaciones provienen de teorías como la formación por competencias y el constructivismo, entre otras. Todas proponen nuevas interacciones entre docente y estudiante para mejorar el proceso de aprendizaje, pero no ofrecen recomendaciones específicas para una perspectiva diferente. Independientemente de la pedagogía o el modelo educativo, los estudiantes siempre construyen su base de conocimientos y habilidades de forma individual y se adaptan al entorno por sí mismos. La pandemia por COVID-19 evidenció muchas de las limitaciones del modelo educativo actual. La rápida transición hacia modalidades remotas demostró que la transmisión de contenidos puede realizarse mediante múltiples medios digitales sin requerir necesariamente la presencia física simultánea de profesores y estudiantes. Paralelamente, el desarrollo reciente de sistemas de inteligencia artificial generativa ha modificado radicalmente los mecanismos de acceso, búsqueda y organización del conocimiento.

La pregunta fundamental se centra en entender si los modelos curriculares actuales siguen siendo adecuados para formar a los ingenieros que demandará la sociedad durante las próximas décadas. Hasta ahora, el conocimiento y las habilidades que debe tener un estudiante al terminar sus estudios de ingeniería se ha dividido en un número finito de cursos, estructurados intercaladamente en semestres, con un número fijo de horas por semana. Sin embargo, este modelo deja de tener un fundamento sostenible en las estructuras sociales y las herramientas tecnológicas del presente [6].

Los programas tradicionales presentan ventajas evidentes. El conjunto fijo y finito de asignaturas y la duración específica de cada curso han demostrado tener un marco de aprendizaje progresivo, cierto nivel de calidad y coherencia en la educación, un cronograma explícito para cubrir el material y el cumplimiento de los plazos académicos. Un currículo estructurado garantiza que los estudiantes se familiaricen con los fundamentos teóricos y las aplicaciones prácticas, preparándolos para los desafíos de la ingeniería en el mundo real y la práctica profesional:

- Organización progresiva del aprendizaje.
- Estandarización de contenidos.
- Control institucional de la calidad.
- Procesos de acreditación consolidados.

Últimamente, se han producido cambios significativos en las tecnologías de la información que también deben tenerse en cuenta. Internet ha redefinido los canales de comunicación, el almacenamiento de información y la búsqueda. La

inteligencia artificial (IA) se centra en la búsqueda de información, y su fácil acceso genera la necesidad de un cambio en el proceso educativo formal. Esto pone de manifiesto que los programas tradicionales presentan limitaciones importantes que se discuten a continuación:

A. Limitantes de los currículos tradicionales

A continuación se listan algunas de las deficiencias que tiene el sistema educativo actual. La mayoría se ha tratado de subsanar aplicando nuevas técnicas pedagógicas o modelos educativos, pero no han desaparecido y están vigentes desde hace más de cincuenta años.

- Fragmentación del conocimiento

La división en asignaturas genera barreras artificiales entre disciplinas que en la práctica profesional aparecen profundamente interconectadas.

- Ritmos de aprendizaje uniformes

Todos los estudiantes deben avanzar a la misma velocidad independientemente de sus capacidades, experiencia previa o intereses particulares.

- Obsolescencia curricular

Los procesos de actualización curricular suelen requerir varios años, mientras que tecnologías como IA, manufactura avanzada, gemelos digitales o ciberseguridad evolucionan en cuestión de meses.

- Evaluación basada en tiempo y no en competencia y conocimiento

La aprobación de una asignatura frecuentemente refleja la permanencia durante un período académico más que la demostración efectiva de competencias profesionales y la adquisición del conocimiento.

- Formación en un lugar fijo que y con profesores asignados sin que los estudiantes puedan escoger las mejores opciones a nivel nacional o internacional.

Además, en la formación global de un ingeniero, la ausencia de un tema o la falta de desarrollo de una habilidad de pensamiento no se subsanan en los cursos siguientes. Así por ejemplo, si un profesor no se aseguró que todos los alumnos construyeran el conocimiento necesario para los cursos subsiguientes, se forman lagunas en la evolución constructiva que cuestan mucho trabajo remediar.

Ante estas condiciones, la pregunta fundamental se hace más evidente con la masificación del uso de la inteligencia artificial. A pesar de que su uso generalizado tiene muy poco tiempo, el impacto en la transformación de la sociedad ha sido abismal. Los sistemas educativos, además de los procesos productivos y empresariales, han tenido que replantear nuevos esquemas de enseñanza y evaluación del aprendizaje, además de tener que definir procedimientos para garantizar que los procesos fundamentales de las universidades e instituciones de educación superior se lleven a cabo dentro de los marcos de la ética. Por tanto, es importante referenciar el impacto de las nuevas herramientas de la inteligencia artificial que están al alcance de todas las personas que tienen acceso a internet.

Existen muchas maneras de responder a estas y otras preguntas relacionadas. Para empezar, el sistema educativo debe definir primero los conocimientos y las habilidades que una persona debe poseer para ser ingeniero. Nos referimos al sistema universitario a nivel mundial; todos los estudiantes de ingeniería son similares o aspiran a serlo en cualquier parte del mundo.

B. La inteligencia artificial como catalizador del cambio

Sin embargo, los planes tradicionales enfrentan muchas limitaciones, sobre todo en el contexto de las nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA) y la abundancia de información en internet. La IA y otras tecnologías emergentes avanzan rápidamente, a menudo superando los ciclos tradicionales de desarrollo curricular. Esta rápida evolución puede dificultar que los marcos estructurados se mantengan actualizados con los últimos avances tecnológicos y sus implicaciones para la práctica de la ingeniería. Muchos problemas de ingeniería actuales requieren conocimientos y habilidades interdisciplinarios que pueden no encajar fácilmente en los límites tradicionales de las asignaturas. Por ejemplo, las aplicaciones de IA en ingeniería a menudo requieren conocimientos de informática, matemáticas y disciplinas específicas de ingeniería, lo que exige un enfoque más integrado que los marcos tradicionales pueden tener dificultades para abarcar. La formación en ingeniería está evolucionando hacia modelos más flexibles y adaptables en respuesta a estos desafíos. La inteligencia artificial modifica profundamente el proceso educativo y se convierte en una herramienta que permite a los estudiantes y profesores [7]:

- Obtener explicaciones personalizadas
- Resolver problemas complejos
- Generar simulaciones
- Acceder a bibliotecas virtuales
- Traducir documentación técnica
- Desarrollar prototipos de software

Todo ello sin necesidad de esperar la intervención directa de un instructor o una guía. Ha sido notorio, desde hace varios años, que los estudiantes, cuando tienen que resolver alguna duda, prefieren revisar videos de corta duración, que recurrir a las fuentes originales de información (tradicionalmente publicada en libros) o consultar a un profesor. Este nuevo esquema de consulta, se fortalece cuando las herramientas de búsqueda son más ágiles y no sólo resuelven la duda, sino que producen material con las respuestas (documentos de texto, videos, presentaciones, entre muchos formatos).

Desde el punto de vista del aprendizaje, los planes de estudio de ingeniería actuales presentan varias limitaciones e inconvenientes. Impone plazos rígidos para el aprendizaje de temas específicos, lo que conduce a una comprensión superficial o a la memorización en lugar de un aprendizaje profundo y un dominio conceptual. Los estudiantes pueden sentirse limitados en su capacidad para profundizar en temas que les interesan o que son cruciales para sus aspiraciones profesionales. Necesitan ayuda para conectar conocimientos que representan diferentes aspectos de la ingeniería con fundamentos y modelos matemáticos similares, por ejemplo. La ingeniería es un campo donde el aprendizaje permanente es esencial debido a los rápidos avances tecnológicos; por lo tanto, los planes de estudio de ingeniería actuales pueden no preparar adecuadamente a los estudiantes para el aprendizaje continuo y la adaptación a lo largo de sus vidas profesionales, ya que podrían centrarse más en completar programas predefinidos en lugar de desarrollar habilidades para el aprendizaje auto-dirigido, o podrían limitar las oportunidades para que los estudiantes exploren soluciones creativas e innoven en sus cursos. Existe un movimiento creciente hacia modelos educativos más flexibles en ingeniería, como cursos modulares, aprendizaje basado en competencias, aprendizaje basado en proyectos y programas interdisciplinarios. Estos enfoques buscan brindar a los estudiantes mayor autonomía en sus trayectorias de aprendizaje, adaptarse a diversos estilos y ritmos de aprendizaje, fomentar una comprensión más profunda y el

pensamiento crítico, y prepararlos mejor para los desafíos dinámicos y complejos que enfrentarán en sus carreras de ingeniería. [8], [9], [10], [11].

Sin embargo, la IA no reemplaza la capacidad de razonamiento ingenieril. Por el contrario, lo limita y es por ello que se crea la necesidad de generar nuevas estrategias para que los ingenieros aumenten su capacidad de desarrollar pensamiento crítico, modelado matemático, validación experimental y capacidad de síntesis.

La educación debe evolucionar desde la transmisión de información y la capacidad de realización evaluación hacia la certificación de capacidades.

II. NUEVO PARADIGMA CURRICULAR BASADO EN NODOS DE CERTIFICACIÓN

En esencia, las actividades educativas siguen un ciclo evolutivo, como se muestra en la Figura 1. Este ciclo comienza con deducciones basadas en conocimientos previos, utiliza analogías para comprender modelos físicos con matemáticas similares y refuerza el conocimiento mediante repeticiones. Por ejemplo, en el caso específico de la industria minera en México, el Real Tribunal de Minas designó expertos y el Colegio de Minería inició cursos formales para la formación de futuros expertos en minería. El proceso de designación de expertos finalizó cuando un jurado académico examinó a cada candidato y decidió nominar a uno o más. Con el paso de los años, el procedimiento para nombrar a los expertos ha cambiado, pero este es el origen de los títulos de ingeniería actuales.

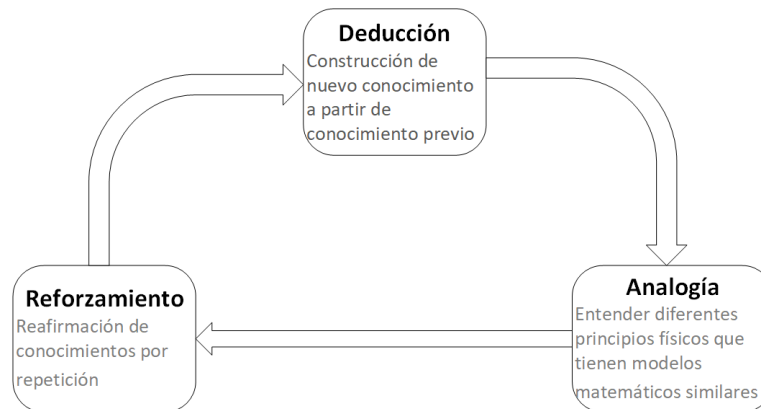


Fig. 1. Esquema conceptual de ciclos de aprendizaje [12].

Tras la Segunda Guerra Mundial, se produjo una importante «revolución» (por llamarla de alguna manera) en la enseñanza de la ingeniería. El currículo pasó de centrarse en geometría, medición, topografía y topología a incorporar cálculo y mecánica basada en la física. Este enfoque ha sido útil durante las décadas siguientes, pero es hora de otra revolución. Lattuca et al. [13] afirman que «en la década de 1980... los recién graduados estaban bien preparados técnicamente, pero carecían de las habilidades profesionales necesarias para el éxito». Por otro lado, la tecnología impulsa cambios sociales, o quizás sea al revés; en cualquier caso, están estrechamente relacionadas.

Para impulsar una mejora en el proceso formativo de los ingenieros, es importante establecer un vínculo más sólido entre la formación en ingeniería y la actividad profesional del egresado. Rara vez un egresado de un programa de este tipo, después de, digamos, 20 años de trabajo, afirma: «Realmente he utilizado toda mi formación en algún momento de mi carrera». Y si no ha utilizado un curso en particular, parece que se puede eliminar sin mucha discusión. ¿Por qué está ahí? Sin embargo, el problema no es tan simple: nos parece que cierta madurez intelectual está asociada con el tiempo dedicado a asistir a clases y seguir un hilo argumental, sin mencionar otros beneficios como realizar exámenes con regularidad o hacer las tareas asignadas, que forman habilidades de pensamiento que un ingeniero necesitará toda su vida profesional. Sin embargo, gran parte de esto se puede asimilar sin hacer hincapié en, por ejemplo, las Leyes del Movimiento de Newton. De hecho, el estudiante llega a creer que lo que enseñamos son las leyes de Newton y su aplicación, cuando en realidad se trata de pensar con claridad sobre los procesos mecánicos y relacionar causa y efecto. Lo cierto es que los ingenieros en formación aprenden a usar la ecuación de Newton sin comprender todo su significado físico. Más aún, deberían comprender que cualquier fuerza produce una aceleración, independientemente de la relación cuantitativa entre ellas. La estática es, por supuesto, un caso especial de esta dinámica. Si realizar pequeños ajustes o cambios en el currículo no mejora el sistema educativo, ¿qué lo hará? Si cada uno de nosotros tuviera una hoja en blanco para escribir la base de conocimientos que creemos que debería tener un graduado en ingeniería mecánica, seguramente todas serían diferentes, y la mayoría diferirían de lo que se enseña actualmente. Para un enfoque novedoso de la educación, hay que empezar por preguntarse qué utilizan los estudiantes en su trabajo. Sin embargo, también existen muchas dificultades con el cambio curricular. A los docentes les gusta enseñar lo que aprendieron como estudiantes y lo que ya han enseñado. Por lo general, sus preferencias se forman al inicio de su carrera y no cambian a lo largo de su trayectoria profesional. Por diversas razones, no se puede esperar que los docentes que actualmente forman parte del sistema educativo lo transformen radicalmente, y resulta más fácil para quienes están fuera hacer sugerencias que, lamentablemente, pueden resultar hirientes.

7

Lo primero que hay que averiguar es qué necesitan saber realmente los estudiantes. Es lógico que los ingenieros deban tener los conocimientos y las habilidades suficientes para resolver problemas en su campo. Sin embargo, ¿qué se les debe enseñar para lograrlo? Muchos estudiantes se enorgullecen de no utilizar todas las matemáticas que se les enseñan («Soy hábil con las manos, pero no con las matemáticas», pueden decir, «por eso estudio ingeniería»). Entonces, ¿deberían eliminarse las matemáticas del currículo? Es más fácil decir qué es superfluo en el currículo que qué debería incluirse. Algunos aspectos, sin embargo, son obvios. Los estudiantes necesitan saber pensar racionalmente, lo cual es realmente difícil de enseñar. Sin embargo, eso es lo que se asume cuando se enseña en los cursos tradicionales, aunque el mensaje principal para el estudiante sea más bien un método práctico, es decir, cómo resolver problemas específicos que se les plantean en las tareas o los exámenes. Los ingenieros deben desarrollar la capacidad de resolver problemas con las herramientas disponibles en un tiempo limitado. Las matemáticas desempeñan un papel crucial en el desarrollo de esta habilidad. Lo sucedido en el pasado sirve de base para predecir el futuro. En cambio, los estudiantes de ingeniería no tienen conocimientos previos sobre lo que les espera. Por lo tanto, para el estudiante, cualquier respuesta será correcta, incluso si ha introducido una función errónea en un sistema de búsqueda de la IA.

Otras técnicas han intentado resolver problemas de aprendizaje modificando el proceso de enseñanza (sin cuestionar la raíz del problema ni siquiera identificarla). Ejemplos de ello son el modelo educativo basado en competencias y la inclusión del aprendizaje orientado a proyectos, entre otros. Ninguna de ellas ha cuestionado la necesidad de modificar todo el currículo y disolver la estructura rígida de un número fijo de cursos con un número fijo de clases y un número específico de horas semanales. Además, está el tema de la acreditación y la calificación.

La tarea principal es desarrollar la capacidad de razonamiento, de modo que los estudiantes puedan analizar, evaluar y sintetizar cualquier problema (que pueda resolverse utilizando habilidades de ingeniería) independientemente del plazo. La propuesta recopila diferentes ideas y reflexiones discutidas en nuestras comunidades y presentadas en otros foros [14] (Berlanga et al. 2022). La eficacia de la educación no sincrónica y la aplicación de pruebas de evaluación

han demostrado ser efectivas en muchos sistemas educativos; por lo tanto, esta propuesta es una evolución de las experiencias de enseñanza de la ingeniería que han roto el marco tradicional. En el nuevo modelo, los profesores ya no serían necesarios para instruir a los estudiantes; su función consistirá en seleccionar el material de lectura y las fuentes de información adecuadas. También deberán preparar ejercicios de laboratorio para reforzar el conocimiento teórico, y la relación con los estudiantes se basará en el acompañamiento y la orientación para la preparación de los exámenes. El modelo propuesto se fundamenta en la idea de la autoformación. En lugar de dividir el conocimiento de ingeniería en un número fijo de cursos, cada estudiante deberá aprobar un conjunto de exámenes, procedimientos de laboratorio y el desarrollo de proyectos para obtener el diploma de ingeniería. Las pruebas se organizarán de forma secuencial y podrán presentarse en cualquier momento; de esta manera, cada estudiante determinará su propio ritmo en función de sus habilidades y necesidades. Las universidades se convertirán en espacios para compartir conocimientos y experiencias, ofrecer tutorías (si la tutoría en línea no resulta suficientemente eficaz) y servir como laboratorios para el trabajo práctico y la investigación.

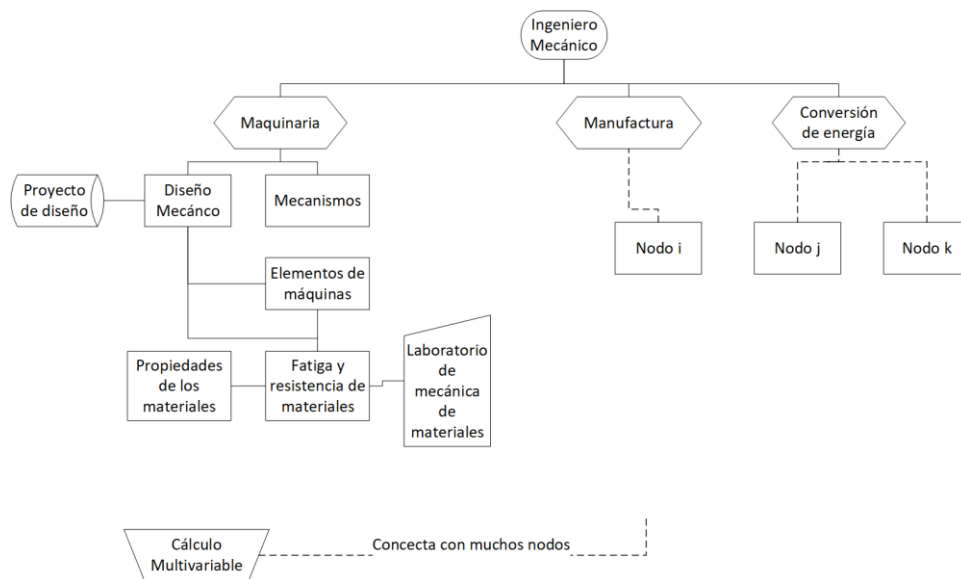


Fig. 2. Esquema conceptual del nuevo modelo curricular [6].

El nuevo proceso de aprendizaje de ingeniería que aquí se propone se basa en un nuevo paradigma [15], [16]. Los roles de quienes participan en el proceso educativo difieren de los anteriores; los estudiantes deberán adquirir nuevos conocimientos y desarrollar habilidades de pensamiento por sí mismos. Tendrán que leer libros de texto, ver videos y realizar ejercicios a su propio ritmo. No tendrán que asistir a clases. Avanzarán en el programa a su propio ritmo. La idea se representa en la Figura 2, donde se muestra la estructura de las microcredenciales que deberán ir adquiriendo progresiva y evolutivamente. Cada nodo representa una microcredencial de certificación de un conjunto de conceptos y habilidades comunes y es un requisito previo para los nodos siguientes. Por otro lado, la evaluación de las asignaturas se ha convertido en un tema complejo; la primera cuestión es la calificación. ¿Qué significa la calificación? Cada país tiene su propio sistema de calificación, que distingue a cada estudiante individualmente; sin embargo, el sistema de calificación no puede determinar el conocimiento individual; por lo tanto, los estudiantes deben demostrar su conocimiento y las habilidades de ingeniería que adquirieron durante sus estudios. En el método propuesto, no hay

calificación; cada nodo debe ser aprobado, y la distinción entre los estudiantes radica en el tiempo que dedican a aprobar todas las certificaciones (nodos).

Cada nodo se agrupa a partir de conocimientos y habilidades técnicas que cada estudiante debe cubrir a su ritmo personal. Una vez que el estudiante demuestra que ha logrado asimilar el conocimiento y las habilidades definidas para un nodo obtendrá un certificado (microcredencial) que le permitirá evolucionar y al completar todos los nodos podrá obtener el título de ingeniero. Los nodos se agrupan de acuerdo con los conocimientos cuya similitud permiten definir los requisitos para que se puedan certificar y son los prerequisites de los siguientes nodos definidos en la red (Fig. 2). Estos se agrupan de acuerdo con la clasificación mostrada en la Tabla 1:

TABLA 1
DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE NODOS.

Tipo de nodo	Competencia que califican	Ejemplo
Nodos teóricos	Conceptos de física, matemáticas e ingeniería	- Matemáticas. - Física. - Mecánica. - Termodinámica. - Ciencia de materiales. - Control automático. - Inteligencia artificial.
Nodos prácticos	Capacidades relacionadas con: - Instrumentación. - Laboratorios. - Metrología. - Experimentación. - Elaboración de reportes técnicos	- Laboratorio de máquinas herramientas - Laboratorio de fluidos
Nodos de proyecto	Capacidades propias del desarrollo de proyectos	- Integración multidisciplinaria. - Innovación - Diseño - Gestión tecnológica - Resolución de problemas reales

Los módulos teóricos están estrechamente relacionados con el desarrollo del pensamiento crítico y los conceptos básicos de ingeniería, desde la física y las matemáticas hasta temas específicos de ingeniería. Los módulos prácticos se diseñan como actividades de laboratorio con experimentos bien definidos y resultados específicos; los estudiantes deben completar un conjunto de actividades de laboratorio con sus correspondientes informes técnicos. Las actividades de laboratorio deben diseñarse para desarrollar habilidades de ensayo, utilizando cuadernos de bitácora, redacción de informes técnicos, uso de instrumentos especializados, etc. Antes de cualquier módulo práctico, los estudiantes deben haber aprobado los módulos teóricos prerequisite. Los módulos de proyecto se diseñan como actividades complementarias, donde los estudiantes combinan conocimientos teóricos y prácticos previos para resolver problemas reales y aprenden a trabajar en equipo, bajo presión y condiciones similares a la práctica profesional.

Los roles en el proceso enseñanza-aprendizaje cambian. Los docentes ya no impartirán clase, pero podrán organizar cursos cortos para reforzar los estudios individuales, además de la impartición de tutorías o asesorías especializadas. Estas clases no deben ser obligatorias; deben estar diseñadas para apoyar el proceso de aprendizaje y pueden impartirse en cualquier momento. La duración de los cursos debe adaptarse a las necesidades y requisitos específicos de los estudiantes. La Tabla 2 resume las funciones en este nuevo plan de estudios de ingeniería

TABLA 2
NUEVOS ROLES EN EL PROCESO ENSEÑANZA-APRENDIZAJE.

Actor	Rol
Estudiante	Autoaprendizaje - Preparación para exámenes - Asistencia a sesiones de tutoría cuando sea necesario - Realización de proyectos conjuntos y actividades de laboratorio. Participación en actividades extracurriculares dentro de la universidad - Creación de redes con otros estudiantes
Profesor	Elaboración de material de certificación - Diseño y actualización de exámenes de certificación. Tutoría a estudiantes en materias específicas. Seguimiento del progreso de los estudiantes - Preparación y coordinación de proyectos y actividades de laboratorio. Organización de cursos cortos
Administración	-Organización y apoyo de actividades culturales - Gestión de la matrícula estudiantil - Adquisición de materiales para laboratorios y proyectos. Coordinación de exámenes y certificaciones

Este método propuesto se refuerza con los conceptos más recientes de la microcredencialización.

III. MICROCREDENCIALIZACIÓN COMO MECANISMO DE IMPLEMENTACIÓN

Las microcredenciales constituyen certificaciones verificables de competencias específicas adquiridas por un estudiante o profesional. A diferencia de los métodos tradicionales, una microcredencial representa evidencia concreta de una habilidad particular [17], [18], [19], [20]. Este concepto complementa la propuesta de la certificación por nodos, de manera que:

En la estructura planteada:

- Cada nodo teórico puede generar una microcredencial
- Cada laboratorio aprobado puede generar una microcredencial práctica
- Cada proyecto puede generar una microcredencial profesional

El conjunto de estas credenciales forma un ecosistema de aprendizaje evolutivo que al final asegura que el futuro ingeniero ha acumulado los conocimientos y habilidades necesarias para su desempeño profesional.

Las microcredenciales pueden agruparse progresivamente y se acumulan (Stackable Credentials) conforme se van cubriendo los prerequisites de cada una hasta lograr todas las credenciales necesarias para obtener el título de ingeniero.

Por ejemplo:

Nivel 1. Fundamentos Matemáticos

- Álgebra
- Cálculo diferencial
- Cálculo integral
- Ecuaciones diferenciales

Nivel 2. Modelado Físico

- Mecánica
- Termodinámica
- Transferencia de calor

Nivel 3. Diseño y Simulación

- CAD
- Elementos Finitos
- Manufactura Digital

11

Nivel 4 Área de especialidad del Ingeniero Mecánico

Integración de todas las credenciales previas.

La velocidad actual del desarrollo tecnológico obliga a considerar que ningún programa de licenciatura puede preparar completamente a un profesional para toda su vida laboral. La propuesta permite que un ingeniero regrese periódicamente a la universidad para obtener nuevas certificaciones en:

- Inteligencia Artificial
- Gemelos Digitales
- Industria 5.0
- Manufactura Inteligente
- Ciberseguridad Industrial
- Computación Cuántica Aplicada

Esto transforma la relación universidad-egresado en un vínculo permanente.

La microcredencialización requiere una infraestructura tecnológica que permita almacenar y verificar las competencias adquiridas. Los elementos de acreditación (insignias) se deberán estandarizar de manera que puedan ser transferibles entre distintas instituciones de educación superior. Esta estandarización permitirá que los estudiantes acrediten sus conocimientos y habilidades en cualquier institución nacional o internacional. Por lo que, la propuesta que se presenta en este artículo el certificado de acreditación de un nodo deberá contener, además de los datos del estudiante:

- Competencia certificada
- Evidencia de evaluación
- Fecha de emisión

- Institución emisora
- Profesor responsable
- Nivel de dominio
- Enlace a evidencias digitales
- Insitución emisora

Con el seguimiento a las certificaciones de los nodos, en lugar de un currículum vitae estático, cada estudiante dispondría de un portafolio digital actualizado permanentemente.

IV. IMPLICACIONES PARA LA ACREDITACIÓN Y EVALUACIÓN

Uno de los principales desafíos será adaptar el modelo propuesto a los procesos de acreditación. Sin embargo, organismos internacionales como:

- ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology)
- European Commission
- UNESCO

Estas organizaciones han comenzado a reconocer esquemas basados en competencias verificables y aprendizaje a lo largo de la vida. Las micro-credenciales ofrecen evidencia más precisa de las capacidades reales de los egresados que las calificaciones tradicionales. Una crítica inmediata que probablemente harán los revisores es: "¿Cómo puede acreditarse un programa sin asignaturas?" Por ello es importante demostrar que la propuesta no contradice a ABET, sino que puede satisfacer sus criterios mediante un mecanismo diferente. La acreditación moderna de ABET ya no está basada en horas de clase sino en resultados de aprendizaje.

La Tabla 3 muestra la relación entre los resultados de aprendizaje de ABET y los nodos de certificación propuestos.

TABLA 3
CORRESPONDENCIA ENTRE ABET Y EL MODELO DE NODOS.

Resultado ABET	Evidencia en el modelo propuesto
Resolver problemas complejos de ingeniería	Nodos teóricos y proyectos integradores
Aplicar diseño de ingeniería	Nodos de proyectos
Comunicación efectiva	Reportes técnicos y defensa de proyectos
Responsabilidad ética y profesional	Nodos específicos de ética profesional
Trabajo en equipo	Nodos colaborativos de proyectos
Experimentación y análisis de datos	Nodos prácticos de laboratorio
Aprendizaje autónomo permanente	Eje central del modelo

En consecuencia, el cumplimiento de los resultados ABET no requiere necesariamente cursos semestrales tradicionales, sino mecanismos verificables de evaluación de competencias.

A. Ventajas frente a modelos tradicionales acreditados

El modelo propuesto ofrece tres ventajas principales:

- Trazabilidad. Cada competencia queda asociada a una evidencia específica

- Actualización continua. Es posible modificar un nodo individual sin rediseñar todo el programa
- Evaluación directa. Las competencias son evaluadas explícitamente y no inferidas a partir de una calificación global de una asignatura

B. Hacia una acreditación basada en competencias verificables

La tendencia internacional se dirige hacia sistemas donde:

- lo importante no es cuánto tiempo estudió una persona;
- sino qué sabe hacer realmente.

El modelo de microcredenciales permite documentar con precisión la adquisición de competencias, alineándose con la filosofía moderna de ABET y de los marcos europeos de aprendizaje permanente.

V. RUTA DE IMPLEMENTACIÓN A CINCO AÑOS

Una crítica frecuente a los modelos disruptivos es que parecen imposibles de implementar. Por ello se propone una transición gradual. La tabla 4 muestra un plan preliminar de implantación, considerando que el proceso estaría listo en cinco años, que es el tiempo promedio en el que un estudiante logra obtener el título de ingeniero

TABLA 4
PLAN DE IMPLANTACIÓN A CINCO AÑOS.

Año	Objetivos	Entregables
Primero: Diseño y validación conceptual	- Definir competencias. - Identificar nodos. - Construir mapas de dependencias. - Diseñar mecanismos de evaluación.	- Catálogo inicial de nodos. - Catálogo de credenciales de certificación. - Marco de certificación.
Año 2: Programa piloto	Implementación parcial. Posibles áreas: - Matemáticas. - Física. - Programación.	Implementación parcial. Posibles áreas: - Matemáticas. - Física. - Programación.
Año 3: Expansión a laboratorios	Incorporación de: - prácticas; - reportes técnicos; - proyectos cortos.	Se inicia la generación de certificados de acreditación digitales verificables.
Año 4: Integración con la industria	Participación de empresas. Las empresas: - definen competencias; - validan certificados de acreditación; - proponen proyectos.	Se inicia el reconocimiento externo de las micro-credenciales.
Año 5: Programa completo	El programa opera bajo un esquema híbrido: - asignaturas tradicionales; - certificaciones por nodos; - Certificados de acreditación digitales.	Al final del año se realiza la evaluación para migrar completamente al nuevo modelo.

VI. CONCLUSIONES

La revolución tecnológica impulsada por la inteligencia artificial obliga a replantear profundamente los modelos tradicionales de educación en ingeniería. El sistema universitario se encuentra en una encrucijada, donde deberá tomar decisiones importantes. La pandemia ha dejado dolorosamente claro que seguir como hasta ahora no funcionará y que es necesario encontrar una alternativa. Cuándo sucederá esto es una incógnita. La estructura organizativa de las universidades actuales no es lo suficientemente flexible para adaptarse a las necesidades. Este, por supuesto, no es el único sector en crisis. En el sector de la restauración, por ejemplo, la gente se ha dado cuenta de que va a los restaurantes no solo por la comida, y los camareros tampoco quieren trabajar por una miseria.

El modelo propuesto sustituye la estructura rígida de asignaturas por una red de nodos de certificación basada en competencias verificables, aprendizaje autónomo y experiencias prácticas. Este artículo propone un nuevo paradigma para preparar a las escuelas de ingeniería para la revolución tecnológica. El nuevo modelo curricular eliminaría la necesidad de clases, cursos y calificaciones, y obligaría a los estudiantes a adquirir conocimientos teóricos y de ingeniería de forma autónoma. El nuevo currículo se organiza en nodos de conocimiento que guían y apoyan a los estudiantes en la construcción de habilidades y conocimientos de ingeniería para la práctica profesional. En estos nodos, los profesores tendrán nuevas funciones. En lugar de impartir clases, ayudarán a los estudiantes, individualmente o en grupo, a desarrollar las habilidades necesarias para cumplir con los requisitos de certificación, seleccionarán el material de estudio y actualizarán los exámenes. Organizarán actividades de laboratorio y diseñarán proyectos específicos. La creación de redes es fundamental para los ingenieros; por lo tanto, los estudiantes participarán plenamente en el desarrollo de proyectos y prácticas de laboratorio, sin necesidad de asistir a otras clases simultáneamente. La metodología utilizará tecnologías de reciente desarrollo y aprovechará la IA, internet y la experiencia del teletrabajo durante la pandemia. Si bien no es específica de la ingeniería, ofrecemos estrategias prácticas para evaluar y mejorar el aprendizaje de los estudiantes, incluyendo el desarrollo de competencias y habilidades [21].

La micro-credencialización emerge como el mecanismo natural para implementar esta transformación, permitiendo trayectorias personalizadas de aprendizaje, certificaciones acumulables y actualización profesional continua. Más que una reforma curricular incremental, esta propuesta representa un cambio de paradigma que redefine el papel de profesores, estudiantes y universidades en la formación de los ingenieros del futuro.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización, Metodología, Investigación, Redacción y preparación del borrador original, Redacción, revisión y edición del manuscrito, Supervisión, Análisis formal, Administración del proyecto: JCJC, MS.

Financiamiento: Los autores declaran no haber recibido financiación externa.

Declaración de la disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo y pueden ser solicitados.

Agradecimientos: Los autores agradecen las facilidades otorgadas.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] B. Caplan, *The Case Against Education: Why the Education System Is a Waste of Time and Money*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2018.

- [2] J. J. Aguilar, "High school students' reasons for disliking mathematics: The intersection between teacher's role and student's emotions, belief and self-efficacy," *Int. Electron. J. Math. Educ.*, vol. 16, no. 3, Art. no. em0658, pp. 1–11, Oct. 2021. doi: <https://doi.org/10.29333/iejme/11294>
- [3] National Student Clearinghouse Research Center, "Current term enrollment estimates: Fall 2022," Feb. 2023. [Online]. Disponible en: <https://nscresearchcenter.org/current-term-enrollment-estimates/>. [Accedido: jun. 26, 2023].
- [4] O. Adepoju, "The Economist this weekend: A special edition on universities," *USA Africa Dialogue Series*, 2023. [Online]. Disponible en: <https://groups.google.com/g/usaafriadiologue/c/gmjlpQeijTc>. [Accedido: jun. 26, 2023].
- [5] B. C. Devereaux, "Colleges should be more than just vocational schools," *The New York Times*, 2 de abril de 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.nytimes.com/2023/04/02/opinion/humanities-liberal-arts-policy-higher-education.html>. [Accedido: jun. 26, 2023].
- [6] J. C. Jauregui-Correa, M. Sen, "Revolutionizing engineering education: Adapting curricula to address artificial intelligence challenges and opportunities," *ASEAN J. Eng. Educ.*, vol. 8, no. 1, pp. 64–69, 2024.
- [7] M. Khalil, E. Er, "Artificial intelligence and personalized learning in higher education," *Comput. Educ.: Artif. Intell.*, vol. 6, Art. no. 100201, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100201>
- [8] T. K. F. Chiu, "Future research recommendations for transforming higher education with generative AI," *Comput. Educ.: Artif. Intell.*, vol. 6, Art. no. 100197, pp. 1–9, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100197>
- [9] T. K. F. Chiu, Q. Xia, X. Zhou, C. S. Chai, M. Cheng, "Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education," *Comput. Educ.: Artif. Intell.*, vol. 4, Art. no. 100118, pp. 1–15, 2023. doi: [10.1016/j.caeai.2022.100118](https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118).
- [10] M. Gunawardena, P. Bishop, K. Aviruppola, "Personalized learning: The simple, the complicated, the complex and the chaotic," *Teach. Teacher Educ.*, vol. 139, Art. no. 104429, pp. 1–11, Mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tate.2023.104429>
- [11] M. Tavakoli, A. Faraji, J. Vrolijk, M. Molavi, S. T. Mol y G. Kismihók, "An AI-based open recommender system for personalized labor market driven education," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 52, Art. no. 101508, pp. 1–15, Abr. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101508>
- [12] J. C. Jauregui-Correa, "Flipped learning applied to machine design," en *Trends in Educational Activity in the Field of Mechanism and Machine Theory (2018–2022)*, J. C. García Prada, C. Castejón y J. I. Pedrero Moya, Eds. Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 55–63. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22232-0_6
- [13] L. R. Lattuca, P. T. Terenzini, J. F. Volkwein, G. D. Peterson, "The changing face of engineering education," *The Bridge*, vol. 36, no. 2, pp. 6–44, Jun. 2006.
- [14] F. A. Berlanga, M. C. Vallejo, J. L. Borrego, J. C. García-Prada, "Influence of continuous assessment test methodology on the learning of basic mechanical physics knowledge," en *International Symposium on the Education in Mechanism and Machine Science*, J. C. García-Prada y C. Castejón, Eds. Cham, Suiza: Springer, 2022, pp. 103–109. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22232-0_11
- [15] J. González, R. Wagenaar, "Developing competency-based learning in higher education: Evidence from the tuning approach," en *Tuning Educational Structures in Europe: Universities' Contribution to the Bologna Process. An Introduction*, 2.^a ed. Bilbao, España: Universidad de Deusto, 2008, pp. 33–41.
- [16] M. Mina, "Liberating engineering education: Engineering education and pragmatism," en *Proc. IEEE Front. Educ. Conf. (FIE)*, Oklahoma City, OK, USA, 2013, pp. 832–837. doi: <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6684943>
- [17] B. Oliver, *Making Micro-Credentials Work for Learners, Employers and Providers*. Melbourne, Vic., Australia: Deakin University, 2019.

- [18] M. Brown, M. Nic Giolla Mhichíl, E. Beirne, C. Mac Lochlainn, "The global micro-credential landscape: Charting a new credential ecology for lifelong learning," *J. Learn. Develop.*, vol. 8, no. 2, pp. 228–254, Jul. 2021. doi: <https://doi.org/10.56059/jl4d.v8i2.525>
- [19] L. Wheelahan, G. Moodie, S. Billett, A. Kelly, "Higher education, microcredentials and lifelong learning," *J. Higher Educ. Policy Manage.*, vol. 44, no. 6, pp. 593–607, 2022. doi: <https://doi.org/10.1080/1360080X.2022.2123587>
- [20] J. Finkelstein, E. Knight, S. Manning, *The Potential and Value of Using Digital Badges for Adult Learners* (Final Report). Washington, DC, USA: American Institutes for Research, 2013.
- [21] R. Marzano, D. Pickering, J. McTighe, *Assessing and Improving Student Learning in College: A Practical Guide*. Aurora, CO, USA: Mid-Continent Regional Educational Lab., 1993.

Output Regulation Based on Object Detection and High Gain Observers in Liquid Handling Robots

Regulación de la salida basada en detección de objetos y observadores de alta ganancia en robots de manipulación de líquidos

Ricardo **Tapia Herrera** ^{1*}
Edith Sayuri **Chirinos Martinez** ²
Tonatiuh **Hernández Cortes** ³
Beatriz Adriana **Jaime Fonseca** ⁴
Jesús Alberto **Meda Campaña** ⁵

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación /
Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0003-0674-9082 | rtapiah@ipn.mx

* corresponding author

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco,
Ciudad de México, MÉXICO

² ORCID: 0009-0009-1948-984X / echirinosm2600@alumno.ipn.mx

⁴ ORCID: 0009-0003-2632-4409 | bjaimef@ipn.mx

⁵ ORCID: 0000-0001-6557-2745 | jmedac@ipn.mx

Universidad Autónoma de Hidalgo,
Pachuca, MÉXICO

³ ORCID: 0000-0002-1966-2755 | tonatiuh@upp.edu.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 22/05/2026, aceptado 30/06/2026, publicado 01/07/2026.



Abstract

Liquid Handling Robots have acquired a significant role in modern laboratories due to their capabilities to automate pipetting and dispensing liquids with high precision and repeatability. Additionally, advances in artificial intelligence have contributed to research areas such as biology or material science, generating sophisticated systems to conduct complex assays. This paper presents an overview of the impact of artificial intelligence techniques and Liquid Handling Robots in applications related to sample preparation, such as cell culturing, microscopy, and in vivo experimentation. In this context, the paper proposes object identification of common labware to support liquid handling tasks. The detection system is based on the ResNet-50 classifier and YOLO v2 detector. The information provided by the detector is used for trajectory planning of a robotic system. To minimize the tracking position error, is proposed a control scheme based on High-Gain observer and Output Regulation, where the trajectories are considered as unmodeled reference signals.

Index terms: liquid handling robot, deep learning, object identification, output regulation, labware recognition, high-gain observer.

2

Resumen

Los robots de manipulación de líquidos han adquirido un papel relevante en los laboratorios modernos gracias a su capacidad para automatizar el pipeteo y la dispensación de líquidos con alta precisión y repetibilidad. Asimismo, los avances en inteligencia artificial han contribuido a áreas de investigación como la biología y la ciencia de materiales, dando lugar a sistemas sofisticados para realizar ensayos complejos. Este artículo presenta una visión general del impacto de las técnicas de inteligencia artificial y los robots de manipulación de líquidos en aplicaciones relacionadas con la preparación de muestras, tales como el cultivo celular, la microscopía y la experimentación ‘in vivo’. En este contexto, se propone la identificación de objetos —específicamente material de laboratorio común— para facilitar las tareas de manipulación de líquidos. El sistema de detección se basa en el clasificador ResNet-50 y el detector YOLO v2. La información proporcionada por el detector se utiliza para la planificación de trayectorias de un sistema robótico. Con el fin de minimizar el error de seguimiento de posición, se propone un esquema de control basado en un observador de alta ganancia y regulación de salida, donde las trayectorias se consideran señales de referencia no modeladas.

Palabras clave: robot de manipulación de líquidos, aprendizaje profundo, identificación de objetos, regulación de salida, reconocimiento de material de laboratorio, observador de alta ganancia.

I. INTRODUCTION

Traditional laboratory environments can involve time-consuming manual tasks such as sample handling, pipetting, or data analysis, which are highly susceptible to human errors. Above, have been addressed by automating repetitive tasks through the integration of robotic systems, due to their inherent characteristics of repeatability and accuracy. Consequently, robotics plays a crucial role in the development of industries relative to chemistry, biology, pharmacology, and materials science, which are characterized by complex processes such as the handling of hazardous chemicals, handling of pathogenic organisms, the carrying out numerous assays or process steps, and the need of frequent measurements over extended periods. The complexity involved in discovering new molecules, materials, or systems, coupled with advances in machine learning and artificial intelligence, have led to the idea of expanding the concept of automation to autonomy. In this context, Self-Driving Laboratories (SDL) integrate artificial intelligence models and fully automated systems in a closed-loop, enabling them to make decisions about conducting experiments based on previous acquired experimental data [1], [2].

One industry with a high demand for the development of new technologies is the pharmaceutical, where the potential of SDL offers robust platforms capable to accelerating and optimizing the formulations of therapeutic proteins and vaccines to contribute to human health [3]. The performance of an SDL in the fields of protein engineering and synthetic biology is described in [4], where the design of new proteins can be derived from an intelligent agent learning about protein sequence-function relationships. This agent sends the designed proteins to a fully robotic system to conduct experimental tests, and results provide feedback to enhance the agent's capabilities and optimize the process. Living organisms are complex systems that cannot be easily controlled, making processes related to engineering biological organisms potentially benefit from an approach based on autonomy, allowing humans to set goals and receive the results of the assays. However, the level of autonomy in these processes depends on advances and access to new technologies in fields such as electrical and mechanical engineering, informatics, and even the manufacturing of new materials [5]. Similarly, a platform was developed in [6] to automate the discovering of relationship between genes and their functions, in molecular biology, facilitating collaboration with researchers. More recently, in [7], an SDL based on active learning with a liquid handling robot is applied to enable data-driven development in the field of nanomedicine. Discoveries in the pharmaceutical industry are conditioned and constrained by economic factors, as the development of treatments for diseases can be costly and time-consuming [8]. High costs are often associated with assays that involve testing large libraries of compounds, which can range from tens to millions of samples. Furthermore, retesting experiments is necessary to reduce the likelihood of false positives. It is important to note that these systems demonstrate the potential of applying artificial intelligence techniques to generate hypotheses, design and execute experiments to test hypotheses, analyze, and interpret results to make decisions [9]. Then, the combination of robotics and artificial intelligence plays a fundamental role in reducing costs and accelerating processes as drug discovery [8].

Robotics provides benefits to facilitate the implementation of reproducible protocols, ensure consistency across experiments, and enhance the reliability of research. Additionally, a precise control over experimental parameters and conditions enables researchers to explore biologicals phenomena, conduct large-scale screening studies, and accelerate hypothesis testing. As can be observed, a wide range of laboratory workflows involve the handling of small volumes of liquid solutions, where liquid handling robots (LHRs) are a fundamental component in laboratory automation for executing pipetting and dispensing tasks. LHRs provide systems with an efficient means of handling small volumes of liquid solutions, precisely dispensing reagents, conducting complex assays, facilitating high throughput screening, and performing large-scale liquid handling reactions automatically. These platforms have demonstrated their potential to minimize hands-on time, maximize experiment scale, increase reproducibility, reduce sample contamination, minimize wastage of expensive reagents, and manage experimental complexity, being a useful tool in drug discovery, genomics, and clinical research [10]. In this context, liquid Handling Robots have emerged as indispensable and modern tools in

laboratory settings, providing researchers with a different approach to develop experiments and assays, offering an alternative to manual liquid handling, alleviating researchers from tedious, tireless, and potential errors associated with repetitive manual tasks. Beyond the cost, LHRs have significantly improved the reproducibility of experiments and assays [11] including cell microinjection [12], DNA extraction [13], [14], yeast spot assay [15], nucleic acid testing [16], or shot gun proteomic analysis [17]. Due to its current relevance, in [18] is provided a detailed analysis of the use of LHRs for solvent extraction techniques, which are not only applied in molecular biology, but also in pharmacokinetics or toxicology. Additionally, authors also present an update of several types of robots and their applications in solvent extraction where LHRs offer advantages over manual procedures, especially when is necessary to analyze large number of samples in a short period of time. LHRs can be equipped with a variety of components, depending on the specific needs of an experiment. For instance, in protein and organism evolution experiments, necessary devices may include pipettes (which could have multiple channels), pipette tips, robotic grippers, sterilization stations, and plates. However, the cost of automation varies depending on the flexibility required for handling different types of samples. Moreover, with the evolving requirements in research and education, the development of open-source platforms has gained significant importance, enabling greater flexibility in robot programming and the sharing of protocols [19].

It is clear that LHRs have contributed to the development of research areas related to pathogen discovery due to their capabilities to execute complex liquid handling protocols with high levels of accuracy and consistency, even surpassing human performance in many cases. These capabilities can be further improved by incorporating artificial intelligence and machine learning techniques to develop intelligent controls, monitoring tasks to detect anomalies, and implementing corrective actions when necessary. In addition, deep learning brings to LHRs capabilities to operate and adapt them to diverse experimental conditions, by leveraging that neural networks learn from large volumes of data. Deep learning allows robots to autonomously optimize their performance, adapt to dynamic environments, and even discover novel strategies for liquid manipulation. The autonomy of a robotic system in laboratory settings or within an SDL lies in the capacity to make decisions based on the knowledge of its environment. The potential of deep learning has carried out a trend toward developing applications focused on reducing the duration of assays, in any of their stages, particularly those that are repetitive or require high precision, such as sample preparation. Above can be achieved by integrating convolutional neural networks (CNN) for labware identification, allowing a LHR to distinguish between sample and black wells and perform monitoring tasks [20]. Similarly, [21] presents the adaptation of a commercial robotic manipulator for liquid handling, as well as the labware recognition based on classifiers for motion planning purposes, thus avoiding reprogramming the robot. Object detection using convolutional neural networks has been demonstrated to be a robust tool for recognizing labware, identifying the color of liquids, and estimating liquid levels in pipette tips [17]. Moreover, convolutional networks are useful for tackling with complex classification problems, such as the identification of internal viscous dissipation in dispensing tasks [22].

As previously mentioned, researchers deal with large-step and complex protocols, which, in conjunction with the lack of standardization, can lead to a loss of flexibility. This situation can make it challenging to execute different protocols or integrate new components, requiring a considerable amount of time for programming. To address this issue, the implementation of a Hierarchical Task Network can increase the flexibility of LHRs [23]. On the other hand, strategies based on Bayesian optimization allow the evaluation of experiments based on the analysis of captured images that provide data about the growing of cells in regenerative medicine [24]. Previous literature highlights the importance of liquid handling in a variety of complex processes, where LHRs and artificial intelligence combined with advancements in hardware and software, represent an alternative to exploit a wide range of applications, which accelerate discoveries in different research areas. This paper explores the object detection of common labware to support liquid handling tasks. The detection system is based on the ResNet-50 classifier and YOLO v2 detector. The information provided by the detector is used for trajectory planning of a robotic system. To minimize the position error and ensure the asymptotic tracking, is proposed a control scheme based on High-Gain observer and Output Regulation, where the

trajectories are considered as unmodeled reference signals. This capability can enhance the performance of liquid handling tasks and increase overall efficiency.

II. METHODS AND MATERIALS

The integration of the deep learning models into LHRs is a promising approach to achieving autonomy in these systems. This work proposes the recognition of common labware used in liquid handling tasks, which is achieved through two main stages: classification and real time detection. Classification is based on a residual network (ResNet), while the real-time detection uses the you-only-look-once (YOLO v2) object detector. Fig. 1 shows the workflow for object detection process.

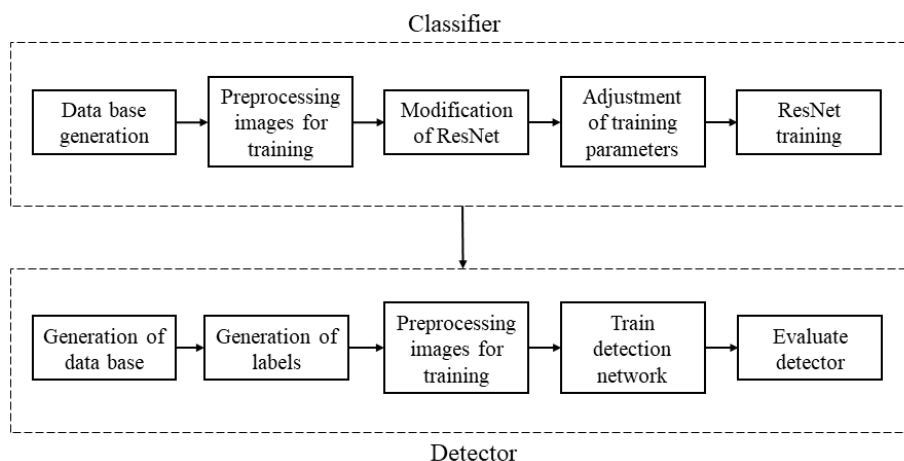


Fig. 1. Block diagram for object identification process.

The labware of interest is a pipette, a 3d printed rack for reagents, a 3d printed test tube rack, pipette tips, open tube, and closed tube (Fig. 2).

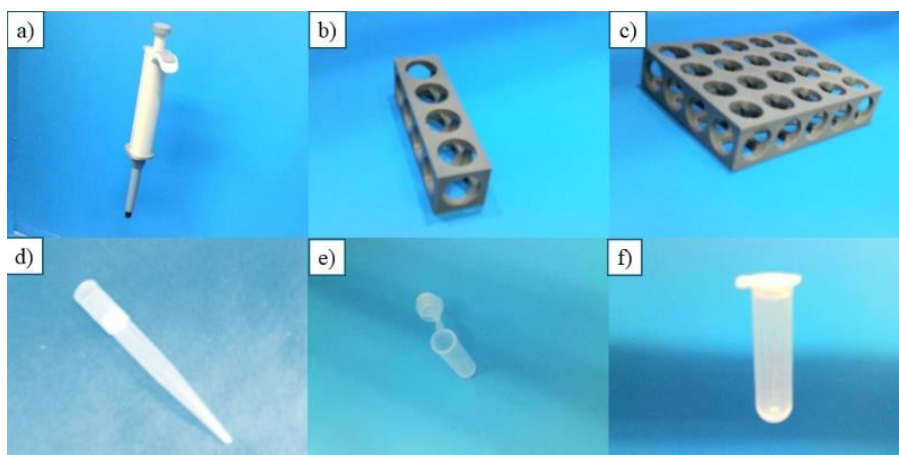


Fig. 2. Labware to identify. a) pipette, b) 3d printed rack for reagents, c) 3d printed test tube rack, d) pipette tip, e) open tube and f) closed tube.

A. Clasification

ResNet-50 employs residual connections to overcome the limitations of traditional deep learning architectures. This architecture comprises 50 layers, allowing the creation of complex models with a high level of accuracy. The first step for labware recognition involves generating a dataset with images of the objects of interest (Fig. 2), images were captured at a resolution of 640×480 dpi. The dataset is then resized to fit the network input size of 224×224×3, ensuring that the data input and the network dimensions are consistent. Deep Network Designer toolbox of Matlab® is used to retrain the ResNet-50 network. Above requires replacing the existing network head, which includes the blocks associated to the fully connected layer, the Softmax layer, and the Classification output layer, with similar blocks configured according to the classes on the new dataset. The initial learn rate for training was set to 0.01. As seen in Fig. 3, an accuracy of 98.1% was achieved with the dataset and training parameters.

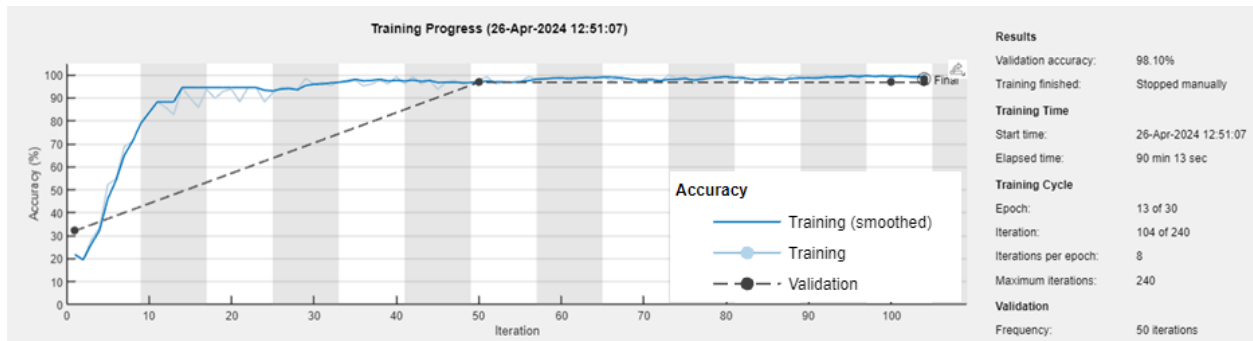


Fig. 3. Accuracy of the retrained ResNet-50 network.

B. Object detection

YOLO v2 is a fast and efficient method for detecting objects in images and videos. The model employs a deep convolutional neural network (CNN) to extract features from an input image, allowing it to predict multiple bounding boxes and class probabilities in a single forward pass. This approach makes YOLO v2 suitable for real-time applications. In labware recognition, a new dataset is generated for training. This dataset contains captured images of the objects of interest, which are different from the images used in the classifier. This new dataset is used to generate the labels of each object, and they are used to train the YOLO v2 network. If necessary, each image may need to be resized to ensure consistency with the input layer size of the network. The preprocessing step consists of splitting the dataset into 60% of the images for training, 10% for validation and 30% for testing.

C. Control scheme base don high-gain observer

In this paper the Liquid Handling Robot is a cartesian robot as can be seen in Fig. 4. To control the cartesian robot is proposed a control scheme based on output regulation and a high-gain observer [25]. The controller is graphically described in the block diagram of Fig. 5.

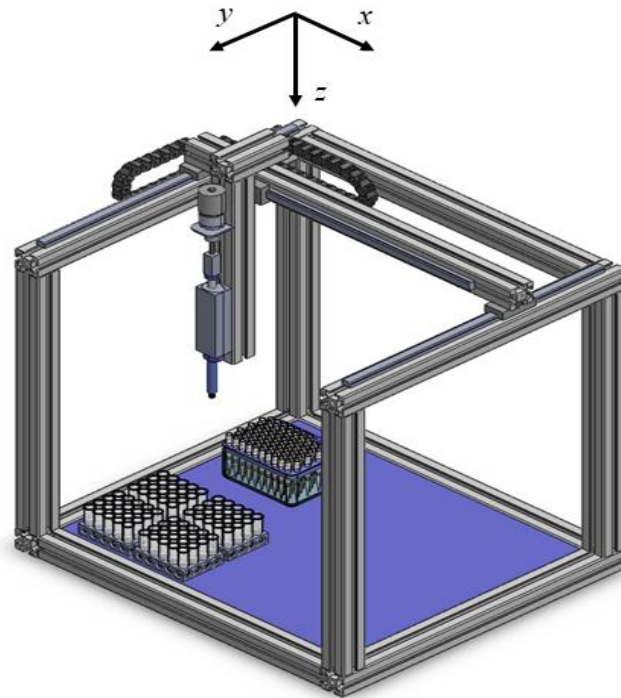


Fig. 4. Prototype of a Liquid Handling robot based on a cartesian robot.

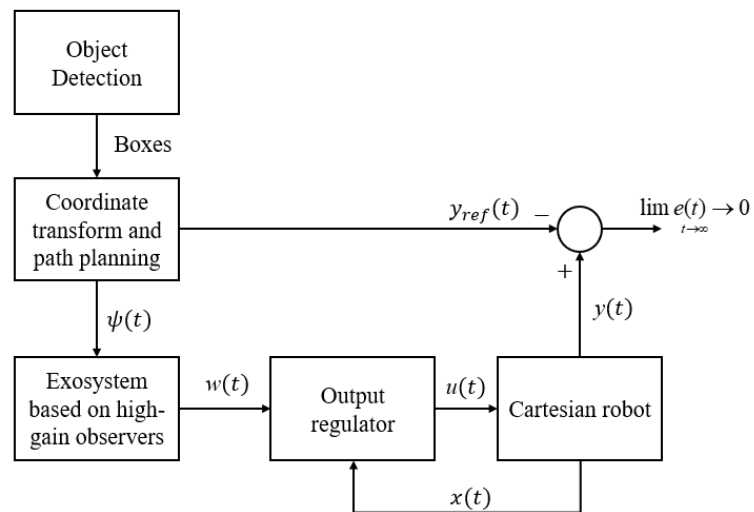


Fig. 5. Block diagram of the proposed controller.

The trajectories for $x_{ref}(t)$ and $y_{ref}(t)$ are considered as unmodeled reference signals for each independent joint of the two-degree-of-freedom cartesian robot [26]. Furthermore, considering gravity acting in the z robot axis results in simple kinematics and dynamics model for the X-Y motion. Thus, the dynamics is given by Eq. (1):

$$\begin{bmatrix} m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

The state space representation leads to:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_1(x(t), u(t)) \\ x_4 \\ f_2(x(t), u(t)) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

with:

$$\begin{bmatrix} f_1(x(t), u(t)) \\ f_2(x(t), u(t)) \end{bmatrix} = [D(x(t))]^{(-1)} [u(t)] \quad (3)$$

Thus, by defined the control law as $u(t) = K(x(t) - \Pi w(t)) + \Gamma w(t)$, the condition for output regulation rest on the linear matrix equations described as $\Pi S = A\Pi + B\Gamma$ and $C\Pi = Q_{ref}$ with solution for Π and Γ . To this, the linear counterpart is obtained by linearizing the system (2) around the origin, i.e. $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$, additionally consider x_1 and x_3 as the output to be regulated.

The joint trajectories of the actuators $\psi(t)$ (exogenous dynamic model) can be considered as the output of a non-existent dynamical model, and the High-Gain Observer described by the set of equation (4) can be used to estimate the state and output of such a system, resulting [25]:

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= Sw(t) + S_H \psi(t), \\ y_{ref} &= Q_{ref} w(t), \end{aligned} \quad (4)$$

subjected to the solution of the system of equations (5) [25]:

$$\begin{aligned} \Pi(S + S_H Q_w) &= A\Pi + B\Gamma + P, \\ C\Pi &= Q_{ref}, \end{aligned} \quad (5)$$

By considering $A = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; Q_{ref} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$.

According to [25], and by assuming $\rho = 2$, the block matrices S_H and S for $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, and $\varepsilon = 0.02$ are:

$$S_H = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 2500 & 0 \\ 0 & 100 \\ 0 & 2500 \end{bmatrix} \text{ and } S = \begin{bmatrix} -100 & 1 & 0 & 0 \\ -2500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -100 & 1 \\ 0 & 0 & -2500 & 0 \end{bmatrix}$$

The linear mappings are computed by the equation (5) which leads to:

$$\Pi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ and } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

can be easily verified that the gain:

$$K = \begin{bmatrix} 22.4849 & -13.9878 & 7.2044 & -1.3438 \\ 2.1375 & -0.40 & 13.3867 & -5.3859 \end{bmatrix},$$

can be used to stabilize the pair (A, B).

III. RESULTS

Fig. 6 presents the results of the classifier based on the ResNet-50 network. The data shows that classifier achieves a class score of 93% for the reagent rack, which is the lowest score among the classes. This score can be attributed to its similar characteristics to the test tube rack. In contrast, for the tip and tube rack a score of 100% is obtained.

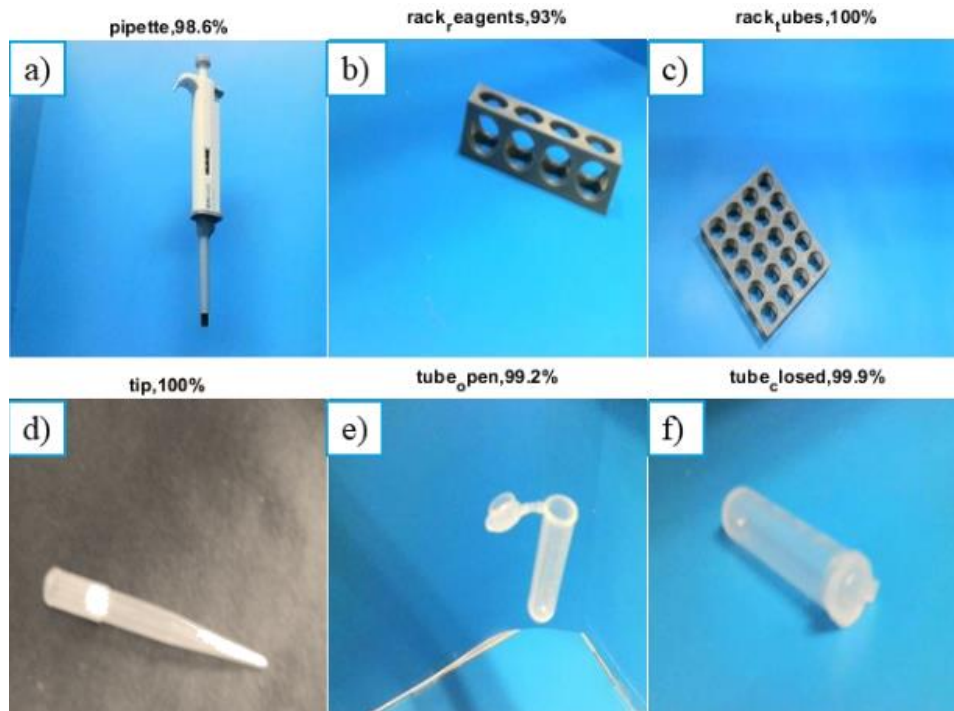


Fig. 6. Results for labware classification: a) pipette, b) 3d printed rack for reagents, c) 3d printed test tube rack, d) pipette tip, e) open tube and f) closed tube.

Finally, the network is evaluated using the trained detector. The results of object recognition using YOLO v2 are presented in Fig. 7, highlighting its effectiveness in detecting the labware objects.

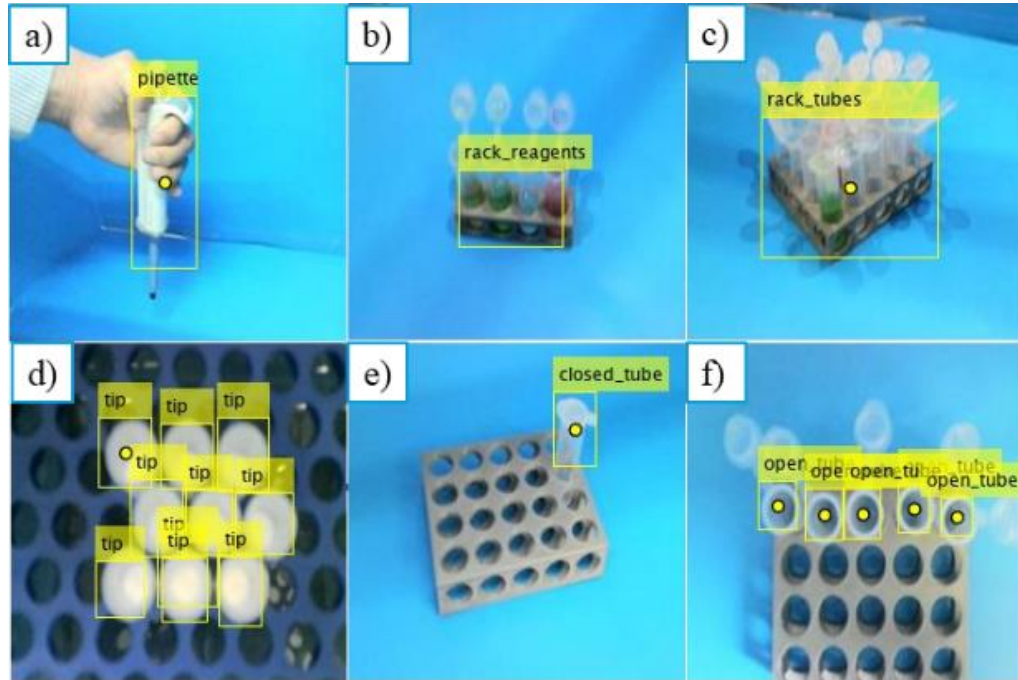


Fig. 7. Results for labware recognition: a) pipette, b) 3d printed rack for reagents, c) 3d printed test tube rack, d) pipette tip, e) open tube and f) closed tube.

The principal idea is to impose an unmodeled trajectory by a set of points in the X-Y plane, as depicted in Fig. 8. Then, object detection is carried out with the corresponding transformation of coordinates from image space to Cartesian. Once the transformation is achieved, path planning for point-to-point motion is proposed. Open tubes indicate the viapoints, in Fig. 8 the path is graphically depicted. From the X-Y workspace path, the joint trajectories of the actuators are obtained, i.e. $x_{ref}(t)$ and $y_{ref}(t)$ as can be observed in Fig. 9.

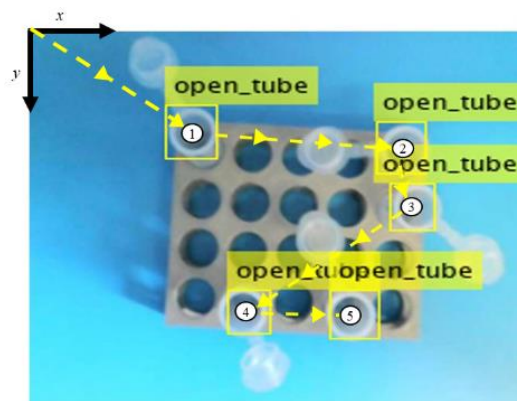


Fig. 8. Desire path in X-Y plane.

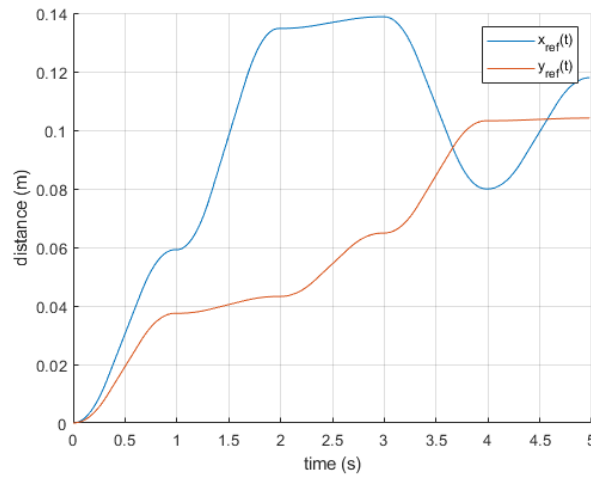


Fig. 9. Desired trajectories for x and y coordinates.

The results of the controller for the tracking of $x_{ref}(t)$ and $y_{ref}(t)$ are shown in Fig. 10.

11

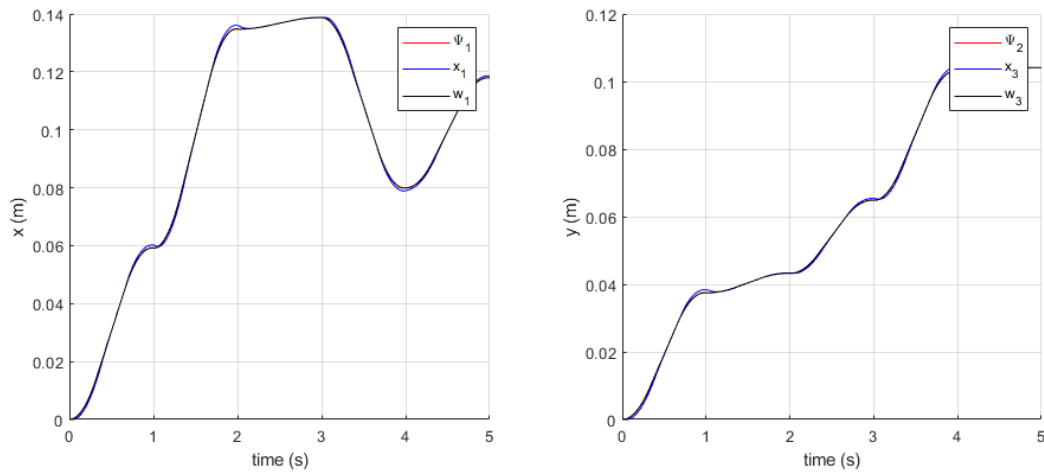


Fig. 10. Tracking results for x and y coordinates.

Additionally, tracking errors for x and y coordinates are given in Fig. 11. The corresponding control signals are depicted in Fig. 12 for simulation system.

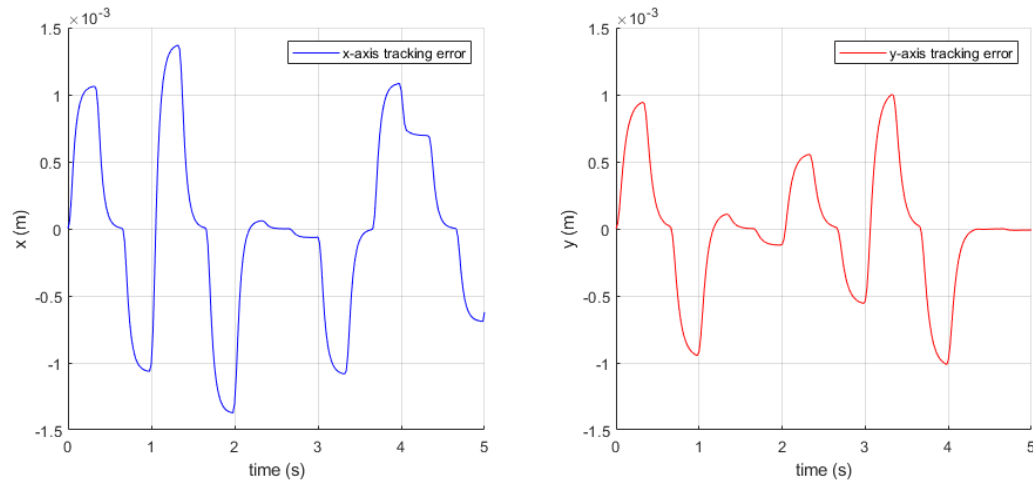


Fig. 11. Tracking error for x and y coordinates.

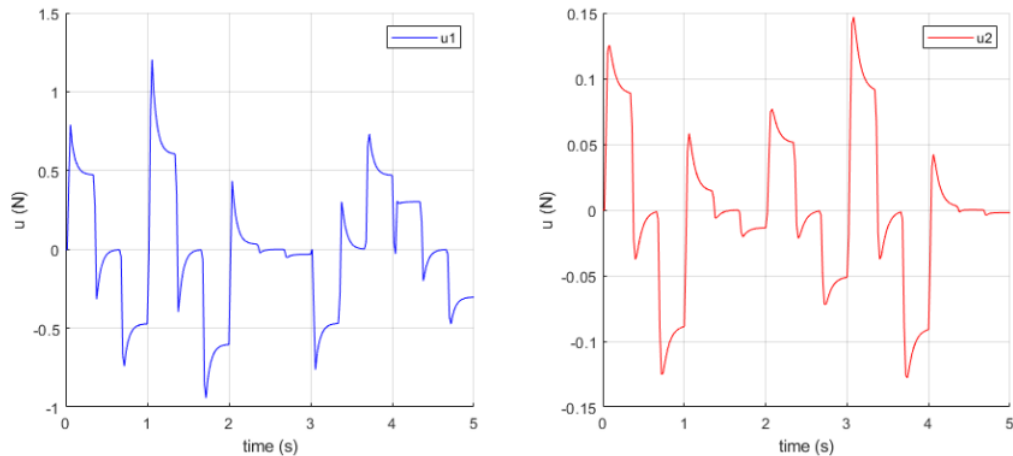


Fig. 12. Control signal for x and y actuators.

IV. CONCLUSIONS

The development of artificial intelligence has represented significant advances in experimentation and data analysis in different research fields, wherein robotics, automation systems, and artificial intelligence have converged to open new possibilities, enhancing capabilities such as efficiency, precision, and acceleration of discoveries. Deep learning has become in an effective technology that can provide a degree of autonomy to those automation systems with potential applications in fields as biology and pharmacology, which are relevant in public health. However, due to the complexity of experiments, deep learning faces challenges such as the lack of sufficient data for training or the lack of standardized assay protocols. Additionally, robotic systems have emerged as an essential tool in laboratory automation,

particularly in liquid handling routines, wherein LHRs have demonstrated their capabilities in terms of repeatability, precision, and time reduction in tasks such as liquid metering, aspirating, addition, dispensing, mixing, positioning, or cleaning.

Traditionally, robots are programmed to execute a program with the routines of an assay but could exist the probability of a programming error as well as complications derived from the variability inherent in laboratory workflows, then deep learning can represent a useful tool for real-time monitoring of a LHR routine. For above, in this work were trained a ResNet-50 network and the YOLO v2 detector for recognition of common labware. The training results showed that detector can recognize with an accuracy of 93% to 100% the labware of interest. Information acquired from detector were used in the control based on the output regulation theory and high gain observers ensuring the asymptotic tracking of unmodeled reference signals.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Authors' contributions: Conceptualization: RTH, JAMC; Methodology: RTH, THC; Software: BAJF, ESCM; Investigation: RTH, THC; Writing-original draft: RTH, ESCM; Writing-review and editing: BAJF, JAMC, ESCM; Supervision: RTH, JAMC; Formal analysis: RTH, JAMC; Project administration: RTH; Funding acquisition: BAJF.

Funding: The authors declare that no external funding was received

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries may be directed to the corresponding author.

Acknowledgments: The authors acknowledge the Instituto Politécnico Nacional for supporting this work through SIP Project IND-2026-0339 and the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación for supporting this work through Project CIR/0059/2022 under the Investigadoras e Investigadores por México program.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

- [1] J. A. Bennett, M. Abolhasani, "Autonomous chemical science and engineering enabled by self-driving laboratories," *Chem. Eng. J.*, vol. 446, no. 2, Art. no. 137100, pp. 1–10, Oct. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100831>
- [2] F. Häse, L. M. Roch, A. Aspuru-Guzik, "Next-generation experimentation with self-driving laboratories," *Trends Chem.*, vol. 1, no. 3, pp. 282–291, Jun. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.02.007>
- [3] M. J. Tamasi, A. J. Gormley, "Biologic formulation in a self-driving biomaterials lab," *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 3, no. 9, Art. no. 101019, pp. 1–17, Sep. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101041>
- [4] J. T. Rapp, B. J. Bremer, P. A. Romero, "Self-driving laboratories to autonomously navigate the protein fitness landscape," *Nat. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 97–107, Jan. 2024. doi: <https://doi.org/10.1038/s44286-023-00002-4>
- [5] J. Beal, M. Rogers, "Levels of autonomy in synthetic biology engineering," *Mol. Syst. Biol.*, vol. 16, no. 12, Art. no. e10014, pp. 1–5, Dec. 2020. doi: <https://doi.org/10.1525/msb.202010019>
- [6] R. D. King, *et al.*, "The robot scientist Adam," *Computer*, vol. 42, no. 8, pp. 46–54, Aug. 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/MC.2009.270>
- [7] R. Hickman, P. Bannigan, Z. Bao, A. Aspuru-Guzik, C. Allen, "Self-driving laboratories: A paradigm shift in nanomedicine development," *Matter*, vol. 6, no. 4, pp. 1071–1081, Apr. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.02.007>
- [8] K. Williams *et al.*, "Cheaper faster drug development validated by repositioning of drugs against neglected tropical diseases," *J. R. Soc. Interface*, vol. 12, no. 104, Art. no. 20141289, pp. 1–9, Mar. 2015. doi: <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.1289>

- [9] A. Sparkes *et al.*, "Towards robot scientists for autonomous scientific discovery," *Autom. Exp.*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, pp. 1–11, Jan. 2010. doi: <https://doi.org/10.1186/1759-4499-2-1>
- [10] C. E. Anderson, *et al.*, "Automated liquid handling robot for rapid lateral flow assay development," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 414, no. 8, pp. 2607–2618, Mar. 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s00216-022-03897-9>
- [11] H. Tegally, J. E. San, J. Giandhari, T. de Oliveira, "Unlocking the efficiency of genomics laboratories with robotic liquid handling," *BMC Genomics*, vol. 21, no. 1, Art. no. 729, pp. 1–15, Oct. 2020. doi: <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07137-1>
- [12] G. Becattini, L. S. Mattos, D. Caldwell, "A fully automated system for adherent cells microinjection," *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, vol. 18, no. 1, pp. 83–93, Jan. 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2013.2248161>
- [13] G. Singh, K. D. Lagoo, A. V. S. S. Nayan Rao, D. N. Badodkar, "Liquid handling robot for DNA extraction," in *Machines, Mechanism and Robotics*, K. V. Gangadharan, R. M. Chandelf, S. M. Kulkaru, Eds. Singapore: Springer, 2019, pp. 829–838. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8597-0_71
- [14] M. Zaleski Cox, P. N. Miklas, A. Soler Garzón, V. Hoyos Villegas, "Automating high throughput screening for anthracnose resistance in common bean using allele specific PCR," *Plant Methods*, vol. 19, no. 1, Art. no. 102, pp. 1–10, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01071-5>
- [15] S. Taguchi, Y. Suda, K. Irie, H. Ozaki, "Automation of yeast spot assays using an affordable liquid handling robot," *SLAS Technol.*, vol. 28, no. 2, pp. 55–62, Apr. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.slant.2022.12.001>
- [16] L. Tong-Tong, W. Jian-Wei, S. Qian-Nuan, W. Hui-Feng, P. Jian-Zhang, "An automated, fully-integrated nucleic acid analyzer based on microfluidic liquid handling robot technique," *Anal. Chim. Acta*, vol. 1239, Art. no. 340662, pp. 1–9, Jan. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340698>
- [17] W. Yu *et al.*, "Pick-up single-cell proteomic analysis for quantifying up to 3000 proteins in a mammalian cell," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, Art. no. 1279, pp. 1–14, Feb. 2024. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45659-4>
- [18] M. Alexovič, Y. Dotsikas, P. Bober, J. Sabo, "Achievements in robotic automation of solvent extraction and related approaches for bioanalysis of pharmaceuticals," *J. Chromatogr. B*, vol. 1092, pp. 402–421, Aug. 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.06.037>
- [19] R. P. Wierenga, S. M. Golas, W. Ho, C. W. Coley, K. M. Esvelt, "PyLabRobot: An open-source, hardware-agnostic interface for liquid-handling robots and accessories," *Device*, vol. 1, no. 4, Art. no. 100111, pp. 1–13, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.device.2023.100111>
- [20] Y. Xiong, V. Shapaval, A. Kohler, J. Li, P. J. From, "A fully automated robot for the preparation of fungal samples for FTIR spectroscopy using deep learning," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 132763–132774, Sep. 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941704>
- [21] J. Zhang, W. Wan, N. Tanaka, M. Fujita, K. Takahashi, K. Harada, "Integrating a pipette into a robot manipulator with uncalibrated vision and TCP for liquid handling," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 6051–6070, Oct. 2024. doi: <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3312657>
- [22] P. Sardana *et al.*, "DropletAI: Deep learning-based classification of fluids with different Ohnesorge numbers during non-contact dispensing," *Fluids*, vol. 8, no. 6, Art. no. 183, pp. 1–15, Jun. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/fluids8060183>
- [23] E. Whitehead, F. Rudolf, H. M. Kaltenbach, J. Stelling, "Automated planning enables complex protocols on liquid-handling robots," *ACS Synth. Biol.*, vol. 7, no. 3, pp. 922–932, Mar. 2018. doi: <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00021>
- [24] G. N. Kanda *et al.*, "Robotic search for optimal cell culture in regenerative medicine," *eLife*, vol. 11, Art. no. e77007, pp. 1–25, Jun. 2022. doi: <https://doi.org/10.7554/elife.77007>

This article is featured in the Special Issue on TRIBOLOGY

Guest editors:

Ezequiel Alberto GALLARDO HERNÁNDEZ | Instituto Politecnico Nacional
Manuel VITE TORRES | Instituto Politecnico Nacional
Nelson Federico GARZA MONTES DE OCA | Universidad Autónoma de Nuevo León
César SEDANO DE LA ROSA | Universidad de Guadalajara

Evaluation of corrosion behavior of a pipeline carbon steel (API 5L-X52)
subjected to a short-term immersion test in a sour aqueous media

*Evaluación del comportamiento corrosivo de un acero al carbón para tuberías (API 5L-X52)
sometido a una prueba de inmersión de corta duración en un medio amargo*

Javier Alejandro Frias Flores
Instituto Politécnico Nacional | MÉXICO

Jesús Gilberto Godinez Salcedo
Instituto Politécnico Nacional | MÉXICO

Manuel Vite Torres
Instituto Politécnico Nacional | MÉXICO

<https://cientifica.site>

Recibido 10/05/2026, aceptado 25/06/2026, publicado 30/06/2026.



Evaluation of corrosion behavior of a pipeline carbon steel (API 5L-X52) subjected to a short-term immersion test in a sour aqueous media

Evaluación del comportamiento corrosivo de un acero al carbón para tuberías (API 5L-X52) sometido a una prueba de inmersión de corta duración en un medio amargo

Javier Alejandro Frías Flores ¹

Jesús Gilberto Godínez Salcedo ²

Manuel Vite Torres ³

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0008-0002-6717 / jfriasf1000@alumno.ipn.mx

³ ORCID: 0000-0003-1502-0189 / mvitet@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas,
Ciudad de México, MÉXICO

² ORCID: 0009-0001-7250-7113 / jgodinezs@ipn.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 10/05/2026, aceptado 25/06/2026, publicado 30/06/2026.



Abstract

API carbon steels pipes are widely used in oil and gas industry for transporting products. They are constantly exposed to aggressive environments, most of them rich in CO₂ and H₂S concentrations, which increases wear by corrosion. This study investigated the corrosive behavior of API 5L-X52 carbon steel when immersed in a static solution simulating sour media for short periods of time, simulating conditions of initial contact between a sour media and API steels, which is of interest because oil production pipelines are affected by corrosion, causing embrittlement even after very short service times. Tests were performed according to ASTM G31 standard. The mass loss method was used to evaluate corrosion rates at each time point, and Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive X Ray Spectroscopy (EDS) was used to characterize the microstructure and corrosion products of the samples. The results showed that the first few hours of contact with the sour media generate a peak in the corrosion rate; after this time, corrosion rate decreases and tends to stabilize. Furthermore, the presence of H₂S in the media accelerates the formation of craters on the surface, causing pitting corrosion damage. Finally, the presence of Sb in the EDS analysis helps to identify corrosion products on the metal surface.

Index terms: corrosion, API 5L, sour media, H₂S, immersion tests.

2

Resumen

Las tuberías de acero al carbono API son ampliamente utilizadas en la industria del petróleo y el gas para el transporte de productos, están constantemente expuestas a ambientes agresivos, la mayoría de ellos ricos en concentraciones de CO₂ y H₂S, lo que aumenta el desgaste por corrosión. En este estudio se investigó el comportamiento corrosivo del acero al carbono API 5L-X52 cuando se sumerge en una solución estática simulando un medio amargo durante cortos periodos de tiempo, simulando las condiciones del primer contacto entre un medio amargo y los aceros API, lo cual es interesante debido a que los oleoductos de producción de petróleo se ven afectados por la corrosión, causando fragilización incluso después de tiempos de servicio muy cortos. Las pruebas se realizaron según la norma ASTM G31. Se utilizó el método de pérdida de masa para evaluar las tasas de corrosión en cada periodo de tiempo, y se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) con espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) para caracterizar la microestructura y los productos de corrosión de las muestras. Los resultados mostraron que las primeras horas de contacto con el medio amargo generan un pico en la tasa de corrosión, después de ese tiempo la tasa de corrosión disminuye y tiende a estabilizarse; además, que la presencia de H₂S en el medio acelera la formación de cráteres en la superficie, generando daños por corrosión por picaduras. Finalmente, la presencia de Sb en el análisis EDS ayuda a identificar los productos de corrosión en la superficie del metal.

Palabras clave: corrosión, API 5L, medio amargo, pruebas de inmersión.

I. INTRODUCTION

The phenomenon of corrosion is a process of electrochemical deterioration that leads to an accelerated material degradation, specifically on metals exposed to corrosive fluids [1], [2]. Several factors affect this phenomenon such as material properties, for example: hardness, metallurgical properties and chemical resistance; and media properties as: carbon dioxide (CO₂) or hydrogen sulfide (H₂S) concentration, viscosity, pH and so on [3, 4]. But one of the most important are the environmental conditions like flow conditions, pressure, temperature, among others. There are two types of corrosion according to the chemical factors of the media, sweet and sour corrosion [5]. Sour or acid corrosion occurs when the H₂S gas in the environment is dissolved into the solution, acting as a catalyzer for anodic and cathodic reactions; this usually promotes the dissolution of the iron at the anodic site, promoting the formation of some corrosion products as FeS [4], [6], this process is expressed in the following equation (1). In some cases, the formation of these corrosion products could act as a protective layer, delayed corrosion process but this effect depends on certain special conditions [7].



The presence of H₂S increases the electrochemical reaction in the corrosion process, which leads to different forms of corrosion as uniform and localized corrosion such as pitting [4, 8]. This is because H₂S inhibits hydrogen molecules formation, producing an accumulation of hydrogen ions near the material surface allowing these ions to permeate inside the material lattice structure, accumulating in the interstitial spaces, enhancing premature failure [1], [9].

Several industries are affected by corrosion damaging a lot of industrial equipment, one of them is the oil and gas industry, which uses pipelines to transport corrosive fluid for long distances, it uses them due to its price and ease of manufacturing [10], [11]. Commonly these pipelines are produced with API steels and have a relevant concern in this industry because of their excellent mechanical and physical properties, nevertheless, the internal exposure to harsh and corrosive environment with high levels of CO₂ and H₂S, along with high pressures and flow velocities, the corrosion is inevitable [12]. Corrosion is one of the principal root causes of failure in pipelines [7], [13], for this reason is essential to identify corrosion and wear deterioration on pipelines [14].

Some authors have studied the effect of sour media and dissolve hydrogen on pipelines, API carbon steels, some of them report how these conditions affect the mechanical properties of the material [15], [16]. Others point out that the microstructure and chemical composition of the material define how it is affected by the media [17], [18]. But, in sour corrosion, stress-corrosion cracking (SCC), uniform corrosion and pitting are the most common wear deterioration. Hidayat et al., [19] evaluates the dependency of SCC of an API in a sour media, Shabani et al. [11] exposed that pitting by corrosion is the initial point of crack in the weld sections due to these pits acting like stress concentration points. Then, Ren et al. [20] conclude that the addition of H₂S initially accelerates corrosion rate and then decreases as corrosion layers form; furthermore, sour corrosion is more likely to generated pitting.

Nowadays, there is a lack of research on the possible damage of brief exposure of API steels to corrosive environments, especially in sour media and how hydrogen absorption due to the brief exposure to this media affects this material [16]. For that reason, the aim of this study is to investigate the effect that short time immersion tests, without induce accelerated corrosion by applying a potential difference, has in corrosion rate and pitting formation.

II. EXPERIMENTAL DETAILS

A. Immersion test

The immersion tests were carried out at Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas of the Instituto Politécnico Nacional based on ASTM G31-72 standard [21]. Fig. 1 shows a schematic diagram of the flask used and how the samples are supported along the tests. For this setup, four samples were used, each one submerged for different test periods. The first three samples were submerged for 72, 192 and 264 hours, respectively. The last sample was submerged for 72 hours, the same as the first one, but with the solution contaminated with the previous corrosion products from the other three samples. The immersion times were chosen based on the ASTM G31-72 [21] and NACE TM0169/G31-21 [22], where it is mentioned that the most common testing periods are from 48 to 168 hours, hence it was decided to widen the common intervals, resulting in these three different immersion times. The tests were carried out twice according to what is mentioned in the standard. All specimens were weighed before and after each test with a digital balance with an accuracy of 0.1 mg as well as cleaned before and after conducting the immersion test with the aim of removing corrosion products residues adhering to the sample to obtain more accurate mass loss measurements. The media selected for this study was a sour media rich in S, finally all tests were performed at room temperature. The test conditions are listed in Table 1.

TABLE 1.
IMMERSION TEST CONDITIONS.

Parameters	Values
Specimen dimensions	50x20x3 mm
Number of samples	4
Media	Sour media
Test temperature	Room temperature
Test duration	72 hrs., 192 hrs., and 264 hrs.

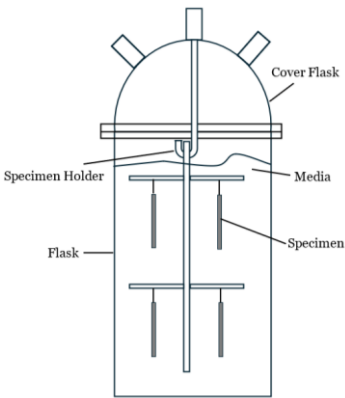


Fig. 1. Schematic diagram for immersion test.

B. Materials

1) API 5L-X52

The material tested was a carbon steel pipeline (API 5L-X52) used in oil and gas industry to transport crude oil due to its high mechanical strength and endurance to corrosive media [23]. The samples were machined into a rectangular shape with a thickness of 3 mm; they were not thicker due to the circular shape of the pipe. Samples were prepared according to ASTM G31-72 standard method [21], polished with silicon carbide sandpaper 120, ultrasonic cleaned and weighed with a digital balance. An EDS analysis was accomplished with a JEOL model JSM 7800 microscope which incorporates an EDS detector, to know elemental composition of the material along with other tests to know its chemical and physical properties, which were reported in a previous work [24]. Fig. 2 shows an SEM image of the microstructure of the material with a magnification of 5,000X; two main phases of the material can be observed here: ferrite and pearlite. In this case, polygonal ferrite is the main microconstituent appearing as equiaxed grains and relatively smooth areas separated by irregular, brightly edges. On the other hand, pearlite appears in the lower center of the SEM image with greater roughness, and a more lamellar morphology. In this case, ferrite tends to dissolve more easily than pearlite, as ferrite is more active, acting as an anode, while pearlite acts as a cathode. Furthermore, in sour environments, it generates localized corrosion and pitting, primarily where inclusions are present.

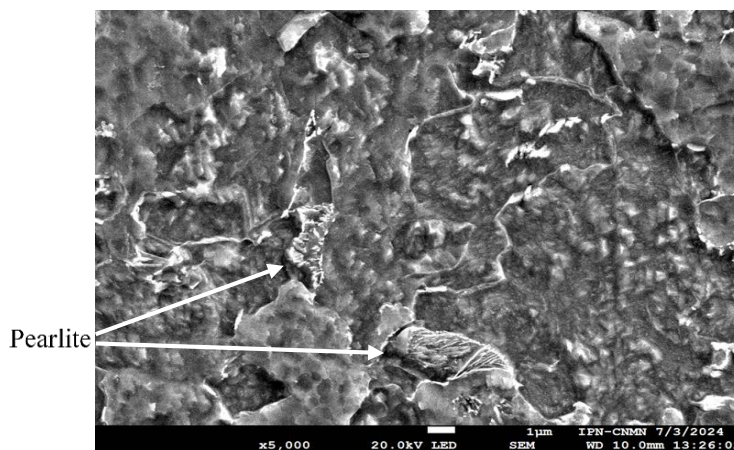


Fig. 2. API 5L-X52 SEM (5,000X magnification).

2) Sour media

Within the phenomenon of corrosion there are two types of it, sweet corrosion (high CO_2 concentration) and sour corrosion (high H_2S concentration) [5]. The media used in this investigation was a brine solution enriched with H_2S , prepared following the NACE International Publication 1D182 [25] which is used to reproduce sour tests. Initially a synthetic brine solution was prepared in a proportion of 9.62% of sodium chloride (NaCl), 0.305% of calcium chloride (CaCl_2), 0.186% of magnesium chloride hexahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and 89.89% of distilled water. To generate the H_2S , is added to the brine 1.700 mg/L of acetic acid (CH_3COOH) and 3.530 mg/L of sodium sulfide ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) to the brine previously prepared, these quantities are valid for an amount of 500 mg/L of solution. This media was selected due to the scarcity of sweet crudes around the world and because in Mexico this type of crude has a higher production [26]. Besides, sour media with H_2S is more prone to corroded pipelines [27].

III. RESULTS AND DISCUSSION

In these tests, corrosion rate was calculated based on the mass loss of samples. During the initial immersion time, a thin corrosive layer began to form, and some corrosion products adhered to the metal surface, as shown in Fig. 3. The corrosion rate peaked during the first 72 hours, as expected, due to the lack of surface protection on the material. After the first immersion time, the corrosion rate gradually decreased until reached an average value of 2.5 mm/year approximately. This decrease in corrosion rate can be attributed to the thin protective film formed on the surface, as mentioned by Ren et al. [20], where corrosion products around the exposure area of the sample act as a protective layer. These data are shown in Fig. 4 which present the average of the test performed with their respective error bars.

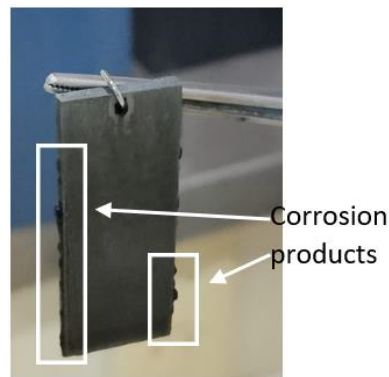


Fig. 3. First specimen with corrosion products after immersion test.

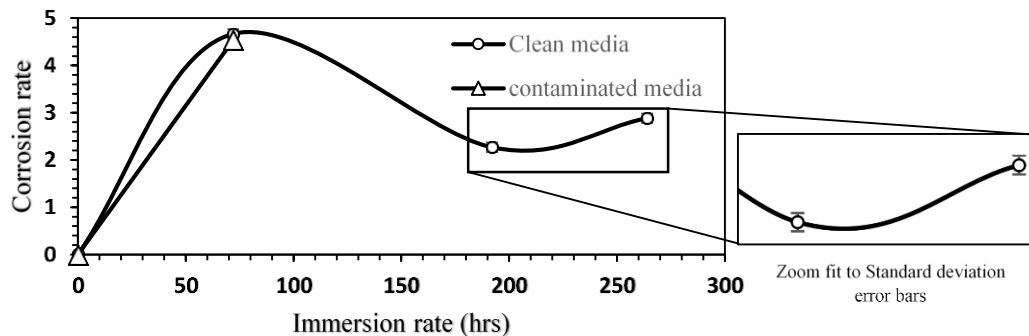


Fig. 4. Corrosion rate with immersion test corrosion.

Along with these results, it is possible to assume that the sour media does not degrade over time or with the presence of corrosion products within it, at least during the eleven days of the test. This was determined with the fourth sample; this sample was immersed in the media after the first two samples were taken out, and its corrosion rate was compared to that of the first. The corrosion rate of both samples, the fourth and first, was almost the same, indicating that the media does not tend to degrade over time under these conditions. It is necessary to evaluate this material under other conditions, such as more contaminated media or longer exposure time, to determine how these conditions affect the

degradation of the media. However, corrosion products in the exposed area appear to form more rapidly than at the beginning of the test. Fig. 5 shows the third and fourth sample; the first is the sample with the longest immersion time, and the second one was immersed after the media became contaminated with the corrosion products.

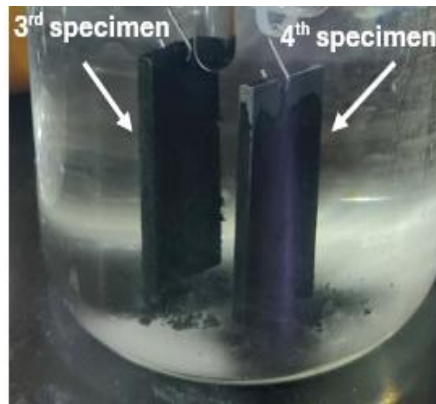


Fig. 5. Corrosion products of third and fourth specimens after immersion test.

7

After the immersion testing, the samples were analyzed with SEM and EDS. Pitting was found in various areas of the material. In Fig. 6 the pitting phenomenon and crater formation can be observed. In this case, the pitting is due to the gradual degradation of the different layers that make up the material. This type of pitting formation could be due to inclusions or precipitates in the sample, commonly Si or Mn [28]. The EDS punctual analysis performed on the pitted areas shows that the different crater layers contain Sb and Mn in their compositions, indicating that the degradation of the surface layer reveals some precipitates in the microstructure as a result of contact between the sour media and the metal surface. Fig. 7 shows the EDS analysis of different crater areas. The way the pits form is noteworthy, showing concentric circles with different layers.

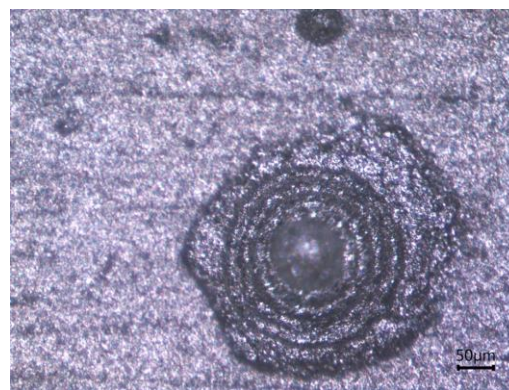


Fig. 6. Pitting corrosion.

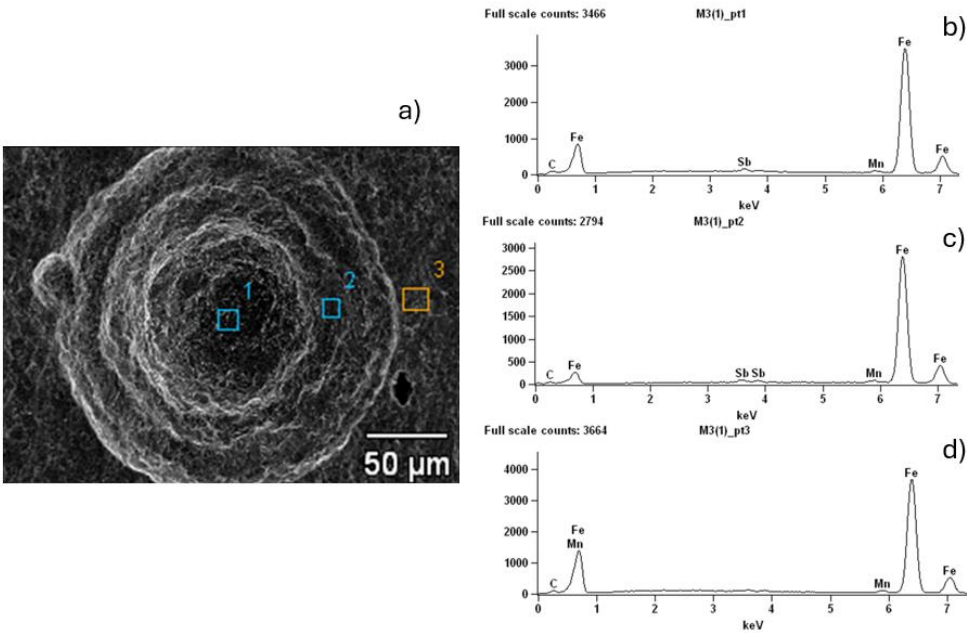


Fig. 7. EDS punctual analysis, a) SEM image of pitting area, b) 1st punctual EDS analysis, c) 2nd punctual EDS analysis, d) 3rd punctual EDS analysis.

8

TABLE 2.
PUNCTUAL EDS ANALYSIS OF PITTING AREA.

	Atom %			
	C-K	Mn-K	Fe-K	Sb-L
Point 1	39.41	0.85	58.97	0.77
Point 2	28.74	0.77	69.77	0.72
Point 3	46.07	0.78	53.15	

Fig. 8 shows a chemical composition map obtained from SEM analysis on the samples. The presence of antimony (Sb) is observed in the analysis; in Fig. 8c, the Sb distribution is dispersed and relatively homogeneous, indicating that the presence of this element is not due to possible metallographic contamination. Therefore, the Sb detected on the corroded surface may plausibly originate from trace contamination in the sodium sulfide nonahydrate reagent. Although Sb is not routinely reported in commercial certificates of analysis for $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Sb is a well-known chalcophile element that naturally associates with sulfide minerals, primarily as stibnite (Sb_2S_3) [29]. Sulfide media are also known to efficiently solubilize Sb through the formation of thioantimonate complexes [30]. Furthermore, commercial Na_2S may contain metal ion contamination [31]. Hence, contamination by trace amount of Sb from industrial sulfide raw materials or reagent manufacturing cannot be ruled out, representing a reasonable source for the Sb detected by SEM-EDS analysis. Thus, Sb adsorption onto the FeS layer or Fe-S-Sb coprecipitation is likely to occur.

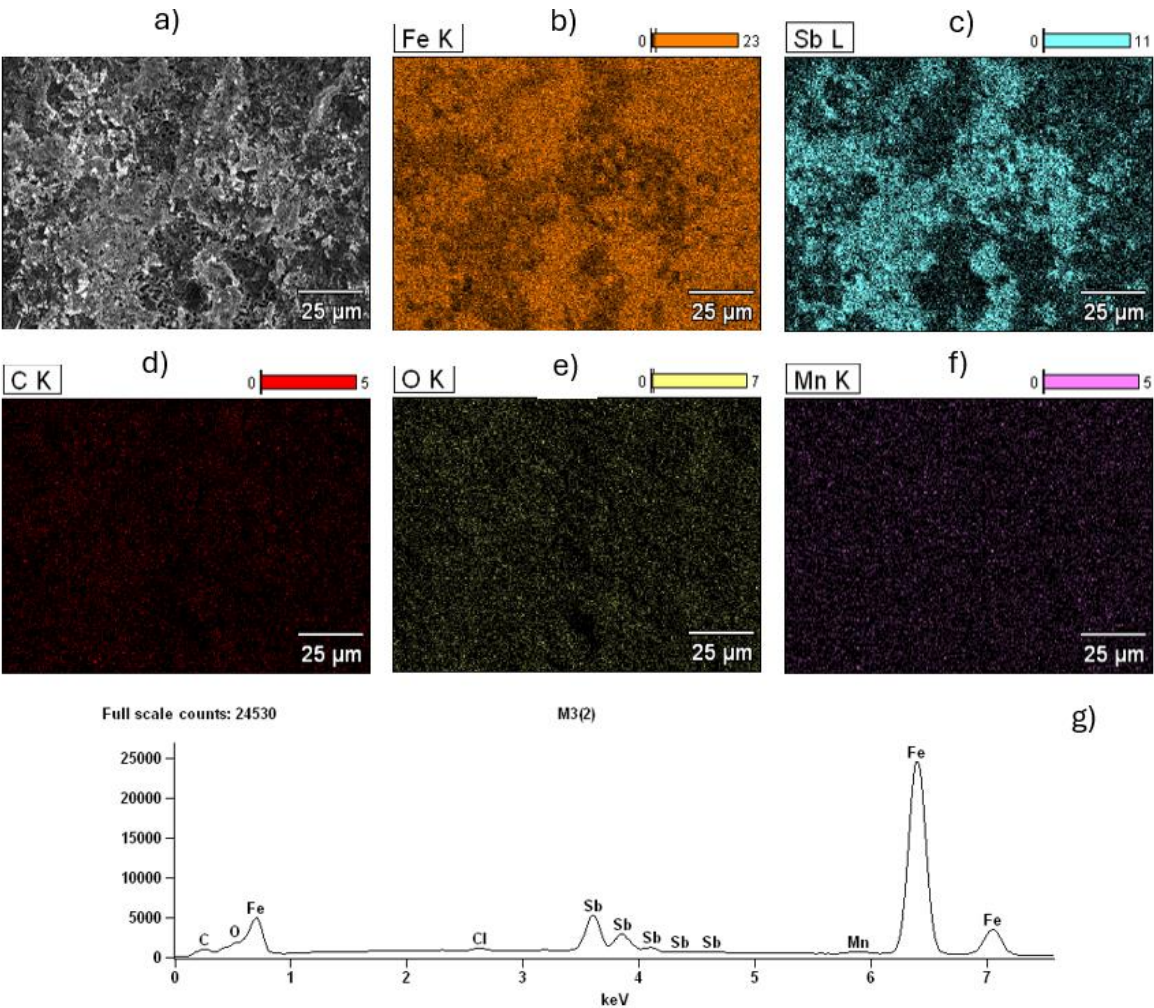


Fig. 8. Chemical composition analysis a) SEM image, b) Chemical mapping of Fe, c) Chemical mapping of Sb, d) Chemical mapping of C, e) Chemical mapping of O and f) Chemical mapping of Mn.

TABLE 3.
PUNCTUAL EDS ANALYSIS OF PITTING AREA.

Element line	Wt %	Atom %
C	11.88	39.39
O	1.74	4.32
Cl	0.41	0.46
Mn	0.93	0.67
Fe	70.81	50.50
Sb	14.24	4.66
Total	100.00	100.00

The spatial relationship between the corroded image and the Sb mapping (Fig. 8a and 8c) indicates that the Sb concentration occurs in the corrosion products, not in the base metal. These products are highlighted as a rough or shiny area in Fig. 8a. It is important to note that in sour corrosion, some elements such as Sb, As, and Sn are known as hydrogen recombination poisons, leading to increased absorption of atomic hydrogen and raising the risk of SSC or hydrogen embrittlement. Therefore, as Macedo et al. [32] mention in their experiments, the corrosion rate depends more on environmental factors than on metallurgical ones.

IV. CONCLUSION

1. The immersion corrosion test shows non-uniform pitting wear in the samples. This phenomenon exhibits a peculiar crater formation pattern, consisting of concentric circles that wear down the material in layers. These pits could be attributed to inclusion in the material matrix, as typical inclusion elements appear in the elemental analysis of the craters. This form of corrosion supports existing literature data indicating that pitting and stress corrosion cracking are the main types of corrosion in sour environments.
2. The corrosion rate obtained with this test indicates that the major damage suffered by the material is at the beginning of the test, in the first 72 hrs., that the material comes into contact with the sour media, after this point the corrosion rate decreases and tends to stabilize. This is because when the sour media meets the metal, there is no protective layer on the surface of the material, which accelerates corrosion process. Subsequently, corrosion products that begin to form act as a protective layer, inhibiting hydrogen ions from catalyzing reduction reactions.
3. Despite being an unexpected situation, the appearance of antimony (Sb), in the chemical element composition map, is a way to identify the corrosion products, since it does not concentrate in the base metal, but on the rougher (corroded) surface; however, further investigation is needed to understand the appearance of this element. It is adsorbed or deposited in the FeS layer due to its affinity with S. This element also could enhance the pitting formation due to the inhibition of hydrogen molecules formation.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: JAFF; Methodology: JAFF, JGGS; Investigation: JAFF, JGGS; Writing-original draft preparations: JAFF; Writing-review and editing: MVT; Supervision: JAFF, JGGS; Formal analysis: JAFF

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The original data contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed at the corresponding author.

Acknowledgments: We recognized the experimental support of the corrosion laboratory of the Higher School of Chemical Engineering and Extractive Industries of Instituto Politécnico Nacional and Tribology Group of the SEPI ESIME-ZACATENCO at Instituto Politécnico Nacional; we also thank Dr. Juan Rodrigo Laguna Camacho for his support of this manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCIAS

- [1] M. G. Fontana, *Pitting. In Corrosion Engineering*. Third ed. United States: McGraw-Hill, 1987.
- [2] P. Rao, L. Mulky, "Erosion-Corrosion of Materials in Industrial Equipment: A review," *Chem Electro Chem*, vol. 10, no. 16, pp. 1-13, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/celc.202300152>

- [3] M. M. Stack, N. Pungwiwat, "Erosion–corrosion mapping of Fe in aqueous slurries: some views on a new rationale for defining the erosion–corrosion interaction," *Wear*, vol. 256, no. 5, pp. 565–576, Oct. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00566-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00566-0)
- [4] J. Jeon, R. Ahmed, R. Elgaddafi, C. Teodoriu, "Hydrogen embrittlement of high-strength API carbon steels in H₂S and CO₂ containing environments," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 104, p. 104676, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104676>
- [5] C. I. Ossai, B. Boswell, I. J. Davies, "Pipeline failures in corrosive environments – A conceptual analysis of trends and effects," *Engineering Failure Analysis*, vol. 53, pp. 36–58, Apr. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.004>
- [6] L. Popoola, A. Grema, G. Latinwo, B. Gutti, A. Balogun, "Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation," *International Journal of Industrial Chemistry*, vol. 4, no. 1, p. 35, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>
- [7] H. Ma, et al., "The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions," *Corrosion Science*, vol. 42, no. 10, pp. 1669–1683, Oct. 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00003-2)
- [8] C. I. Ossai, "Advances in Asset Management Techniques: An overview of corrosion mechanisms and mitigation strategies for oil and gas pipelines," *ISRN Corrosion*, vol. 2012, pp. 1–10, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.5402/2012/570143>
- [9] S. Papavinasam, "The main environmental factors influencing corrosion," in Elsevier eBooks, 2013, pp. 179–247. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397022-0.00004-2>
- [10] Y. Chen, H. Zhang, J. Zhang, X. Liu, X. Li, J. Zhou, "Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects," *Engineering Failure Analysis*, vol. 47, pp. 67–76, Oct. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.09.013>
- [11] H. Shabani, N. Goudarzi, M. Shabani, "Failure analysis of a natural gas pipeline," *Engineering Failure Analysis*, vol. 84, pp. 167–184, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.003>
- [12] D. Hincapié-Ladino, J. W. Calderón-Hernández, J. V. De S Araujo, R. Magnabosco, N. Alonso-Falleiros, "The influence of H₂S on the microstructure of API 5 L X65 pipeline steel: An electrochemical approach," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 20, no. 4, p. 100967, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.100967>
- [13] Z. B. Wang, Y. G. Zheng, "Critical flow velocity phenomenon in erosion-corrosion of pipelines: determination methods, mechanisms and applications," *Journal of Pipeline Science and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 63–73, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.01.005>
- [14] S. Sh. Abedi, A. Abdolmaleki, N. Adibi, "Failure analysis of SCC and SRB induced cracking of a transmission oil products pipeline," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 1, pp. 250–261, Apr. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.024>
- [15] K. M. M. Rahman, M. A. Mohtadi-Bonab, R. Ouellet, J. Szpunar, "A comparative study of the role of hydrogen on degradation of the mechanical properties of API X60, X60SS, and X70 pipeline steels," *Steel Research International*, vol. 90, no. 8, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201900078>
- [16] E. Gámiz-Serrano, J. L. González-Velázquez, D. I. Rivas-López, M. A. Beltrán-Zúñiga, "Mechanical behavior of API 5L X80 steel after Short-Term immersion in brine and sour aqueous media," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 34, no. 1, pp. 450–460, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08966-3>
- [17] S. U. Koh, J. S. Kim, B. Y. Yang, K. Y. Kim, "Effect of line pipe steel microstructure on susceptibility to sulfide stress cracking," *Corrosion*, vol. 60, no. 3, pp. 244–253, Mar. 2004, doi: <https://doi.org/10.5006/1.3287728>
- [18] R. A. Carneiro, R. C. Ratnapuli, V. De Freitas Cunha Lins, "The influence of chemical composition and microstructure of API linepipe steels on hydrogen induced cracking and sulfide stress corrosion cracking,"

Materials Science and Engineering: A, vol. 357, no. 1–2, pp. 104–110, May 2003, doi:
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00217-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00217-X)

- [19] D. Hidayat, S. A.-T. Al-Azhima, R. Zainul, N. S. Syafei, “Stress-dependent corrosion behavior and SCC susceptibility of API 5L grade B steel in acidic sour environments,” *Discover Materials*, Apr. 2026, doi: <https://doi.org/10.1007/s43939-026-00645-z>
- [20] C. Ren, D. Liu, Z. Bai, T. Li, “Corrosion behavior of oil tube steel in simulant solution with hydrogen sulfide and carbon dioxide,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 93, no. 2–3, pp. 305–309, Apr. 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.03.010>
- [21] Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, ASTM G31-72 (Reapproved 2004), ASTM International, 2012, available: <https://store.astm.org/g0031-72r04.html>
- [22] Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, NACE TM0169/G31-21, 2025, available: https://doi.org/10.5006/NACE-ASTM_TM0169-2021-ASTM_G31-21-2025
- [23] B. Vargas-Arista, A. Balvantin, A. Baltazar, F. García-Vázquez, “On the use of ultrasonic spectral analysis for the characterization of artificially degraded API 5L X52 steel pipeline welded joints,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 550, pp. 227–234, Apr. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.064>
- [24] J. A. Frias-Flores, M. Vite-Torres, E. A. Gallardo-Hernández, C. S. De la Rosa, “Erosive Wear Resistance of a Pipeline Section (API 5L-X52) by Solid Particle (Al_2O_3)”, *Tribology In Industry*, vol. 47, n.o 3, pp. 593-601, sep. 2025, doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2007.08.25.08>
- [25] Wheel Test Method Used for Evaluation of Film-Persistent Corrosion Inhibitors for Oilfield Applications, NACE 1D182, NACE INTERNATIONAL, 2025, available: <https://webstore.ansi.org/standards/nace/NACEPublication1D182>
- [26] N. Rodríguez-Martínez, “Del petróleo crudo a los combustibles (Parte I)”, La Union, (accessed May 28, 2026), available: <https://www.launion.com.mx/blogs/ciencia/noticias/187153-del-petroleo-crudo-a-los-combustibles-parte-i.html>
- [27] Z. M. Wang, J. Zhang, “Corrosion of multiphase flow pipelines: the impact of crude oil,” *Corrosion Reviews*, vol. 34, no. 1–2, pp. 17–40, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2015-0053>
- [28] C. S.-D. La Rosa, M. Vite-Torres, J. G. Godínez-Salcedo, E. A. Gallardo-Hernández, R. Cuamatzi-Melendez, L. I. Farfán-Cabrera, “Erosion-corrosion of X-52 steel pipe under turbulent swirling impinging jets,” *Wear*, vol. 376–377, pp. 549–556, Apr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.063>
- [29] S. C. Grund, K. Hanusch, H. J. Breunig, H. U. Wolf, “Antimony and antimony compounds,” Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Jun. 2000, doi: https://doi.org/10.1002/14356007.a03_055.pub2
- [30] J. W. Town, I. Usa, “US3361559A - Method for antimony precipitation of mercury - Google Patents,” Feb. 16, 1965, (accessed June 16, 2026), available: <https://patents.google.com/patent/US3361559A/en>
- [31] W. L. F. Armarego, C. L. L. Chai, “Purification of inorganic and Metal-Organic chemicals,” in Elsevier eBooks, 2009, pp. 445–576. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-567-8.50013-5>
- [32] J. F. Macedo, I. A. Fioravante, R. Z. Nakazato, H. A. Acciari, E. N. Codaro, “Corrosion behavior of API 5L X70 carbon steels in hydrogen sulfide environments,” DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals), Jan. 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.22068/ijmse.18.1.12>