

Manufactura Inteligente, Mecatrónica y Elementos Tecnológicos de la Industria 4.0

Volumen 1



Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos en la Industria 4.0

Memorias del IV Congreso Internacional MIMETI 4.0
23-25 de Septiembre 2025, Querétaro, México
Instalaciones de la Universidad Tecnológica de Querétaro

Editorial
CIDESI

Créditos

Información libro:

Título libro: Manufactura Inteligente, Mecatrónica y Elementos Tecnológicos de la Industria 4.0

Volumen 1

Título volumen: Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos en la Industria 4.0

Memorias del IV Congreso Internacional MIMETI

Editor(es) responsables:

Dr. Ángel Iván García Moreno

Dr. Guillermo Ronquillo Lomelí

Dr. José Alfredo Manzo Preciado

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

Institución editora:

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

Dirección: Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702,

Col. Desarrollo San Pablo,

C.P. 76125, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

Sitio web: www.cidesi.com

ISBN (versión digital): 978-607-95615-2-9

Edición: Primera edición

Año de publicación: 2025

Lugar de publicación: Santiago de Querétaro, México

Créditos de producción:

Diseño de portada e imagen: Lic. Carlos Alejandro Martínez Páramo

Derechos de autor

© 2025 Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Todos los derechos reservados.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio —electrónico, mecánico, por fotocopia, grabación u otros— sin el permiso previo y por escrito de la institución editora.



Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



Prefacio

Es un honor presentar al público académico, industrial y científico la primera edición de las Memorias del Congreso Internacional MIMETI 4.0, un espacio concebido para la divulgación y el intercambio de conocimientos en torno a la Manufactura Inteligente, Mecatrónica y Elementos Tecnológicos de la Industria 4.0 que impulsan la transformación digital.

Este volumen reúne los trabajos en extenso presentados durante el congreso, los cuales fueron sometidos a un proceso de revisión técnica por un comité externo (+60 revisores) y editorial con el propósito de garantizar la calidad y pertinencia de los contenidos aquí publicados. Cada artículo refleja la dedicación, el rigor metodológico y la visión de especialistas provenientes de distintos centros de investigación, instituciones de educación superior y sectores industriales, tanto nacionales como internacionales.

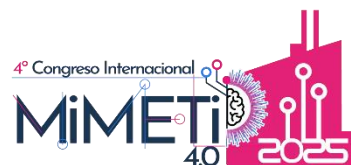
El congreso MIMETI 4.0 se ha consolidado como un espacio de encuentro entre investigadores, profesionales y estudiantes que buscan impulsar la innovación tecnológica y fortalecer la vinculación entre ciencia, ingeniería y sociedad. Las temáticas abordadas en esta edición reflejan a una comunidad que evoluciona al ritmo de los desafíos que plantea la industria moderna. En particular, esta edición del congreso puso especial énfasis en el papel protagónico de la inteligencia artificial y la ciencia de datos como motores de la Industria 4.0, destacando su aplicación en la toma de decisiones, la automatización inteligente y la optimización de procesos. Estos ejes temáticos se complementaron con trabajos orientados al diseño y mejoramiento de procesos de manufactura, la caracterización avanzada de materiales y el desarrollo de tecnologías digitales que integran, potencian y transforman los sistemas productivos.

Agradecemos profundamente a los autores que compartieron sus investigaciones, al comité de evaluadores por su labor en la revisión de los trabajos, y al equipo organizador por su compromiso en hacer posible este esfuerzo editorial. Asimismo, reconocemos el apoyo del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), cuya misión de promover el desarrollo tecnológico se ve reflejada en iniciativas como este congreso.

Confiamos en que estas memorias constituyan una referencia valiosa para investigadores, docentes, estudiantes, profesionales y todos aquellos interesados en la evolución de la ingeniería y la tecnología aplicada a los procesos industriales. Esperamos que la lectura de este volumen inspire nuevas ideas, proyectos y colaboraciones en beneficio de la comunidad científica y del sector productivo.

Dr. Ángel Iván García Moreno
Dr. Guillermo Ronquillo Lomelí
Dr. José Alfredo Manzo Preciado

Sinopsis del congreso



La edición 2025 del Congreso Internacional MIMETI 4.0 reunió a investigadores, académicos, profesionales de la industria y estudiantes de distintas disciplinas vinculadas con la ingeniería, la manufactura avanzada y las tecnologías emergentes. Bajo la temática central “*Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos para la Industria 4.0*”, el evento se consolidó como un espacio estratégico para el intercambio de conocimiento y la presentación de desarrollos científicos y tecnológicos de vanguardia.

Este congreso es Organizado por CIDESI, en conjunto con universidades del estado. CIDESI es Centro Público Sectorizado a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI, dependencia rectora que forma parte del gabinete del Poder Ejecutivo Federal. La institución sede de esta edición fue la Universidad Tecnológica de Querétaro. Agradecemos profundamente el apoyo brindado por sus autoridades y por los profesores que participaron en las distintas comisiones. Su apoyo, profesionalismo y disposición fueron fundamentales para el óptimo desarrollo de todas las actividades realizadas.

Los trabajos presentados abarcaron diversas áreas para la digitalización industrial. Entre ellas destacan la automatización inteligente, el aprendizaje automático, los sistemas ciberfísicos, el control avanzado de robots/cobots, la analítica predictiva y los métodos de percepción y reconocimiento basados en Inteligencia Artificial (IA). Otra vertiente fundamental fue la aplicación de herramientas digitales en manufactura avanzada, incluyendo el diseño de equipos, la optimización de procesos, la caracterización y mejora de materiales, la deposición de recubrimientos, la microfabricación y la validación de sistemas de manufactura mediante enfoques tanto digitales como experimentales. En todos estos casos, la integración de algoritmos inteligentes, técnicas estadísticas y simulaciones de alta fidelidad jugó un papel relevante.

Asimismo, se abordaron áreas emergentes que complementan la infraestructura tecnológica de la Industria 4.0, tales como la instrumentación inteligente, los sistemas de monitoreo en tiempo real, los sensores avanzados, la energía sustentable, la ingeniería de datos, y los enfoques interdisciplinarios que combinan mecatrónica, ciencia de materiales y control computacional.

Además de las sesiones técnicas, El programa académico de MIMETI 4.0 incluyó dos conferencias magistrales: “Propiedad Intelectual en México: Mitos, realidades y oportunidades”, centrada en los mecanismos para proteger la innovación tecnológica, e “IA: Retos, amenazas y oportunidades para la industria”, dedicada a la adopción responsable de la inteligencia artificial en entornos productivos. Complementariamente, se ofreció un amplio conjunto de plenarias que abordaron: 1) ciencia de datos e IA aplicada a la Industria 4.0, 2) manufactura aditiva metálica y simulación numérica, 3) liderazgo femenino en tecnología, innovación sustentable y seguridad tecnológica, 4) sistemas de control predictivo y mantenimiento predictivo, 5) IA para interpretación de bioseñales médicas y algoritmos bioinspirados para modelación ambiental, 6) robótica como área estratégica nacional y la 7) micro fabricación de sensores.

La diversidad de temáticas reflejó el carácter multidisciplinario de MIMETI 4.0, mostrando cómo la IA y la ciencia de datos no solo potencian el desarrollo de tecnologías específicas, sino que habilitan ecosistemas industriales más conectados, flexibles y orientados a la toma de decisiones basada en datos. Esta edición del congreso reafirma la importancia de la colaboración entre academia, industria y centros de investigación para avanzar hacia una ingeniería más inteligente, sostenible y competitiva.

Índice

AUTOMATIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN ACADÉMICA PARA PREDECIR ALUMNOS EN RIESGO CON ALGORITMOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO.....	10
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UN MODELO NUMÉRICO DE VIGA BASADO EN SECCIÓN 2D Y UNA SIMULACIÓN POR MÉTODO FEM 3D DE UNA PALA COMPUESTA BAJO CARGAS DE FLEXIÓN	29
APLICACIONES DE REDES GENERATIVAS ANTAGÓNICAS EN MANUFACTURA INTELIGENTE: UNA REVISIÓN CORTA.....	51
AQUANOVA: MONITOREO AUTÓNOMO INTELIGENTE DE AGUA CON IA Y ENERGÍA SOLAR	70
AUTOMATIZACIÓN DEL DOSIFICADO DE SOLUCIONES CON AYUDA DE UN ROBOT COLABORATIVO	79
CLASIFICACIÓN DE PATRONES MIOELÉCTRICOS USANDO SEÑALES EMG CON ADAPTABILIDAD MULTIBRAZALETE MEDIANTE REDES NEURONALES HÍBRIDAS.....	89
CONTROL MILIMÉTRICO DE COBOTS MEDIANTE COMANDOS DE VOZ.....	99
DISEÑO DE EQUIPO MODULAR DE EVAPORACIÓN TÉRMICA RESISTIVA PARA EL DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS METÁLICOS Y SEMICONDUCTORES.....	107
DISEÑO DE UN AGENTE PARA EL ENTRENAMIENTO DE UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE APRENDIZAJE POR REFUERZO	119
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE COLONIA DE HORMIGAS PARA MEJORAR LOS MODELOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	134
DISEÑO MECÁNICO DE UN MÓDULO DE MONITOREO ÓPTICO ON-AXIS PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LMD.....	140
ESTUDIO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DEL SISTEMA MAGNETRÓN SPUTTERING PARA LA PRODUCCIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE WS ₂	152
EFFECTO DE LOS PARÁMETROS DE CARBURIZADO DE BAJA PRESIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES DE LA CAPA ENDURECIDA EN ACEROS FABRICADOS POR MÉTODOS CONVENCIONALES Y POR MANUFACTURA ADITIVA	166
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SENSORES DE GLUCOSA NO ENZIMÁTICOS A BASE DE C-CUO, TI-PT-CUO, TI-NI, T-NI-CUO.....	173
EVOLUCIÓN DE CONTROLADORES NEURONALES PARA EL AUTO-ENSAMBLAJE Y LOCOMOCIÓN DE ROBOTS MODULARES MARBOT	187
GENERADOR DE CONSULTAS SQL POR VOZ BASADO EN <i>WHISPER</i> Y <i>GPT 3.5</i>	204
GENERADOR MÚLTIPLE DE ENERGÍA EÓLICA.....	213
HACIA LA INDUSTRIA 4.0: APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE SEMIAUTOMATIZACIÓN PARA UN ENTORNO DE PRODUCCIÓN FLEXIBLE	222

INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA MANUFACTURA INTELIGENTE E INDUSTRIA 4.0	232
INFLUENCIA E IMPACTO DE LA POSICIÓN DE LOS PIEZORESISTORES EN LA MEMBRANA PARA SENSORES DE BAJA PRESIÓN	247
INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE FASES EN INCONEL 718 MEDIANTE IMÁGENES METALOGRAFICAS.....	252
LA MECATRÓNICA Y SU EDUCACIÓN EN EL CONTEXTO DE LAS INDUSTRIAS 4.0 Y 5.0	264
MEJORA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO AUTÓNOMO CON APLICATIVO 4.0	283
MICROFABRICACIÓN Y EMPAQUETAMIENTO DE SENSORES PARA BAJAS PRESIONES BAJO LA TECNOLOGÍA DE OBLEAS SOI	296
MODELADO Y SIMULACIÓN DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA DE UNA CELDA MICROFLUÍDICA PARA UN SENSOR PIEZORESISTIVO CON APLICACIONES EN DETECCIÓN DE PESTICIDAS	303
DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA FABRICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR DEPOSICIÓN DE ENERGÍA (DED) DIRIGIDA. ANÁLISIS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN Y RETOS TECNOLÓGICOS	311
PREDICCIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA EN ROBOT COLABORATIVO PARA EL PROCESO DE MANUFACTURA DE PCBS.....	322
PREDICCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR USANDO MODELOS POLINOMIALES	343
SISTEMA DE SEGMENTACIÓN AUTOMÁTICA Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE ARCADAS DENTALES EN IMÁGENES RADIOGRÁFICAS PARA APOYO CLÍNICO.....	354
SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN WEB DE DATOS EN TIEMPO REAL SOBRE UNA ARQUITECTURA DETERMINISTA DE DOBLE NÚCLEO EN ESP32.....	366
TRIBOLOGÍA INTELIGENTE APLICADA EN EL PROCESO DED-LB, PARA PREDECIR EL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS BASE COBALTO ASOCIADOS AL SECTOR METALMECÁNICO	376
VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE MANUFACTURA REALES Y DIGITALES USANDO TÉCNICAS ESTADÍSTICAS	388

Automatización De La Evaluación Académica Para Predecir Alumnos En Riesgo Con Algoritmos De Aprendizaje Automático

Jose Javier Moya Moya¹, Iván Peredo Valderrama¹, Dennys Fernández Conde¹ Jairo Pacindo Piña¹

¹Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera Estatal 420 S/N, El Rosario, 76240 Querétaro, México.
ivan.peredo@upq.mx

Resumen. La presente investigación tiene como objetivo automatizar la evaluación académica para predecir alumnos en riesgo de bajo rendimiento académico mediante distintos modelos de aprendizaje automático de tipo supervisado. En el caso de la Universidad Politécnica de Querétaro, con el uso del LMS de Google Classroom, se recolectaron datos de desempeño de los estudiantes durante el curso mediante su API. Los datos fueron preprocesados para garantizar su calidad y limpieza. Posteriormente, se entrenaron 3 modelos representativos de este enfoque -*regresión lineal*, *árbol de decisión* y *Random Forest*- para estimar el rendimiento final de los alumnos y detectar tempranamente a aquellos en riesgo académico. Como resultado, el modelo *Random Forest* demostró la mayor precisión predictiva, superando a los otros algoritmos con el error cuadrático medio más bajo y un coeficiente de determinación (R^2) superior. Este enfoque automatizado permitió identificar con anticipación a estudiantes con posible rezago académico, lo que facilita a los docentes brindar retroalimentación oportuna e intervenir antes de los exámenes finales. La automatización mediante modelos de aprendizaje automático mejora la exactitud y objetividad en las evaluaciones, ofreciendo a los educadores una herramienta para reducir el tiempo invertido en evaluaciones manuales y apoyar de forma proactiva a los alumnos en riesgo.

Palabras Clave: Evaluación, Automatización, Inteligencia Artificial, Predicción.

1 Introducción

En los últimos años, los procesos educativos como la evaluación académica ha tenido un impacto significativo con la llegada de la era digital y la adopción de plataformas *LMS* (Learning-Management System), siendo una de las más populares y de uso libre, *Google Classroom*, la cual ha ayudado con la gestión de cursos y una comunicación directa docente-alumno para entregas de trabajos, recepción de estos y su respectiva evaluación, sin embargo el proceso de calcular de calificaciones sigue siendo mayormente un proceso manual, repetitivo, propenso a errores y con una gran demanda de tiempo por parte de los docentes, afectando a la comunidad estudiantil en recibir sus calificaciones y retroalimentación de forma tardía (Martínez-Comesaña et al., 2023). Esta situación ha generado incertidumbre en la comunidad estudiantil sobre la transparencia de la evaluación, la cual fue evidenciada con encuestas y entrevistas realizadas en la *Universidad Politécnica de*

Querétaro (UPQ) resalta la necesidad de desarrollar un software de automatización potenciado con tecnologías de *Inteligencia Artificial (IA)*, ya que diversas investigaciones han demostrado que su implementación puede mejorar, optimizar y automatizar la obtención y precisión de las evaluaciones académicas, permitiéndonos brindar una retroalimentación personalizada a cada uno de los estudiantes dependiendo de sus patrones de aprendizaje dando una educación más incluyente (Ramos Armijos et al., 2024; Zafari et al., 2021). Además, modelos de aprendizaje automático como las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, Support Vector Machine) y *Random Forest* se han empleado exitosamente para estimar el rendimiento académico y detectar de forma temprana de alumnos en riesgo (Zafari et al., 2021).

A través de este enfoque se espera que el desarrollo del software de automatización de la evaluación académica logre una reducción significativa en el tiempo dedicado que invierten los docentes para la evaluación, cálculo de calificaciones y reducción de errores humanos. Así mismo se espera la predicción de alumnos en riesgo en alto, medio y bajo para intervención temprana por parte de los educadores y permitir una retroalimentación temprana y personalizada a cada uno de los estudiantes.

2 Estado del arte.

La literatura reciente muestra diversos estudios con esfuerzos de automatizar la evaluación educativa utilizando *ML (Machine Learning)*, principalmente enfocado en la predicción del desempeño estudiantil y detección de alumnos en riesgo. En un estudio en Portugal, se aplicaron distintos enfoques de *ML* para estimar el rendimiento de 110,617 estudiantes de nivel medio superior. Los autores compararon modelos desde redes neuronales hasta métodos tradicionales. Encontraron que el modelo *Random Forest* obtuvo la mejor precisión con un 0.79-.80 de exactitud, superando algoritmos como regresión logística y SVM. El modelo logró identificar correctamente a los estudiantes con riesgo de no aprobar el año, obteniendo un área bajo la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) cerca de 0.76. Además, se evaluó la importancia de más variables como el número de asignaturas cursadas en el año, este factor fue el más relevante, seguido del género y edad del estudiante. Esto sugiere que la carga académica e historial de desempeño son claves para anticipar el rendimiento para clasificar estudiantes en riesgo con suficiente antelación (Cruz-Jesus et al., 2020).

Otro estudio similar, los autores utilizaron un dataset propio de 459 estudiantes de secundaria para evaluar el desempeño durante el semestre e identificar factores de riesgo. Recopilaron esta información de su conducta grupal e individual vía encuestas a docentes y sus calificaciones, probaron clasificadores como *Random Forest*, SVM, *Regresión Logística* y *RNA (Red neuronal Artificial)*. Emplearon el algoritmo *Boruta* para seleccionar características y descubrieron que, al entrenar con variables más influyentes al desempeño, algunos modelos mejoraban como SVM y *RNA*. Los modelos *Random Forest* y *Regresión Logística* mantuvieron su rendimiento. Este estudio confirma que los modelos supervisados pueden evaluar con fiabilidad el rendimiento estudiantil a mitad del curso (Zafari et al., 2021).

En niveles educativos básicos particularmente en la educación primaria y secundaria se realizó una revisión sistemática sobre *IA* aplicada a este ámbito académico, abarcaron nueve estudios y 641

participantes, publicados entre 2010 y 2023. Los resultados evidencian varias aplicaciones que la IA ha mejorado los procesos educativos como la evaluación, predecir el rendimiento escolar, métodos automatizados y objetivos para clasificar, con el uso de métodos automatizados y técnicas basadas en redes neuronales, procesamiento del lenguaje natural y robots educativos (Martínez-Comesaña et al., 2023).

Por ultimo otro estudio, menciona que no encontró un método único optimo, ya que la eficacia varía dependiendo el dataset, sus características y su contexto, pero bajo su experimentación de cinco clasificadores con un dataset público de 395 estudiantes, compuesto con 33 variables demográficas y académicas, identificaron al *Random Forest* como el modelo con mejor desempeño con una puntuación *G-Mean* ≈ 0.9243 y exactitud $\approx 85.42\%$ en la predicción, junto con el *F1-score* más alto ~ 0.85 , superando a *SVM*, *árboles de decisión*, *KNN* y *regresión logística* (Agyemang et al.).

Tabla 1. Comparación de estudios (2021-2025) sobre predicción del rendimiento académico mediante IA.

Autor (año)	Contexto / Datos	Algoritmos	Resultados	Metodología
Este trabajo	Educación superior; Universidad Politécnica de Querétaro; datos reales extraídos en tiempo real por API de Google Classroom ($n \approx 100$ alumnos).	Regresión Lineal, Árbol de Decisión, Random Forest; API de Google Classroom; limpieza y categorización por evaluación por competencias (EC, EP, ED) y comparación de parciales.	Regresión Lineal: $R^2 \approx -0.01$, RMSE ≈ 1.19 . – Árbol de Decisión: $R^2 \approx 0.91 \pm 0.11$, RMSE ≈ 0.36 . – Random Forest (CV): $R^2 \approx 0.86 \pm 0.08$, RMSE ≈ 0.45 . – Random Forest (test): $R^2 = 0.76$ [0.61–0.87], RMSE ≈ 0.62 . – Clasificación (umbral 7.0): Acc= 91.9% , Prec.=1.00, Rec.=0.74, F1=0.85.	Primera implementación en tiempo real con datos continuos y automatizados desde un LMS oficial (Google Classroom). Análisis por competencias (EC, ED, EP) y conversión a niveles de riesgo académico (alto, medio, bajo).
(Thakur & Rawat, 2025)	E-learning; datos reales de varias escuelas; variables académicas y conductuales.	RF, SVM, LR, KNN, NB, DT; selección de características (RFE)	Accuracy: hasta 100% (DT, RF, SVM); LR 0.986; NB 0.965	Usa dataset educativo mixto; evalúa con divisiones 70/30 y 80/20

Agyemang et al. (2024)	Educación superior; datasets Kaggle/UCI (~395) y universitario (~450)	RF, SVM, Árboles, k-NN, Logística; análisis de importancia de features	RF 85.4% accuracy, F1=0.85, G-Mean=0.92	Validación 10-fold; análisis de métricas balanceadas (no solo accuracy)
(Ramos Armijos et al., 2024)	Educación general; revisión y entrevistas docentes (Ecuador/Perú)	N/A. Exploratorio, análisis conceptual de IA en evaluación	Feedback personalizado; retos éticos y técnicos	No usa dataset cuantitativo; enfoque cualitativo
(Martínez-Comesaña et al., 2023)	Revisión sistemática; 9 estudios, n=641 (K-12, 2010–2023)	Diversos: Redes neuronales, NLP, CNN, robots educativos	Precisión hasta 95% en tareas específicas (CNN, MLP); mejora en evaluación objetiva	Heterogeneidad de estudios, tamaños de muestra pequeños, sin estandarización
(Zafari et al., 2021)	Irán, bachillerato; n=459 alumnos; datos académicos y conductuales	RF, SVM, Regresión Logística, ANN; selección de features (Boruta)	ANN ~83% en dataset completo; SVM ~78% en dataset reducido	Validación 10-fold; compara dataset completo vs reducido

En conjunto estos estudios (ver Tabla 1.) evidencian avances significativos como algoritmos de *ML* (*Random Forest*, *SVM*, *RNA*) han demostrado un desempeño predictivo sólido en el rendimiento académico en diferentes contextos educativos, posibilitando evaluaciones objetivas y eficientes. Sin embargo, persisten brechas importantes: la falta de un modelo óptimo o universal debido a la sensibilidad del contexto. La necesidad de datasets más amplios, diversos y en tiempo real y la escasa integración práctica. Aquí es donde este trabajo contribuye de manera significativa, en automatizar la recolección de datos por cada ciclo de evaluación (parcial, unidad, bimestre o cuatrimestre) y brindar una retroalimentación en tiempo real y una predicción para los próximos ciclos de evaluación.

3 Metodología.

El enfoque metodológico implementada para el desarrollo del sistema de obtención, cálculo de calificaciones y predicción de alumnos en riesgo se estructuró en 3 fases principales.

I. Selección de participantes.

La investigación incluyó como participantes a 100 alumnos de 6to cuatrimestre de la *Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC)* en la asignatura de *Sistemas Operativos* y a docentes de la *Universidad Politécnica de Querétaro (UPQ)*, actualmente la

universidad usa el *LMS* de *Google Classroom*, por lo que se decidió aprovechar esta herramienta para la recolección de datos automatizada mediante su *API* (Application Programming Interface) que *Google* ofrece a desarrolladores para gestionar cursos, tareas y calificaciones.

II. Recopilación y limpieza de los datos.

Para obtener datos del curso, tareas, y calificaciones se desarrolló el *script* de *Python* que hace llamadas a la *API* para obtener todos los datos y calificaciones. Para la limpieza de los datos el *Script* contiene métodos de ordenamiento y filtrado para categorizar los trabajos y tareas en las diferentes competencias, calcula el promedio de cada parcial, dejándolo limpio y estructurado para obtener un formato *CSV* (*Comma Separated Values*), que se usará como *dataset*, con las calificaciones de los estudiantes sin necesidad de hacer el cálculo manual o usar alguna otra herramienta, este mismo *dataset* servirá para entrenar con modelos de aprendizaje automático de tipo supervisado para estimar de alumnos en riesgo académico (alto, medio y bajo), ver el flujo en la Figura 1.

III. Experimentación y entrenamiento de modelos.

Se experimentó con diferentes algoritmos de aprendizaje supervisado y automático para predecir las calificaciones de los alumnos, así como los alumnos en riesgo de reprobación, a la par también se experimentó con árboles de decisión la comparación de la calificación real obtenida por los estudiantes vs la calificación predicha para evaluar su eficacia, ver el flujo en la Figura 1.

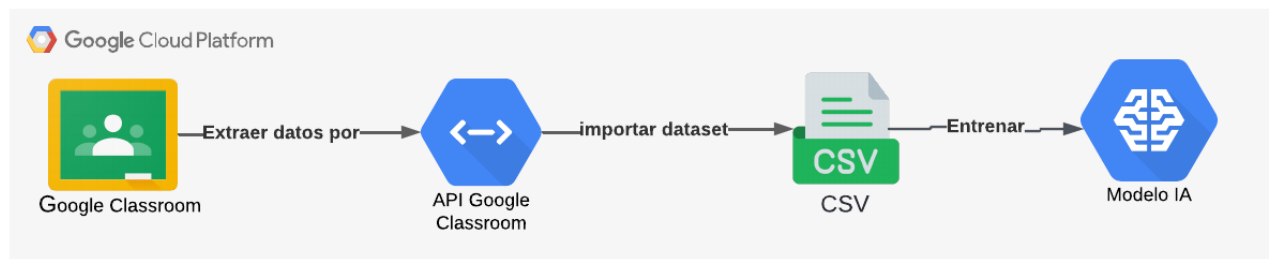


Figura. 1. Flujo de script de automatización para obtención de datos a través de la API y generación de dataset para entrenamiento de los modelos, propuesto en este trabajo.

3.1. Selección de participantes

Para la obtención de los datos académicos se recuperó la información de cursos de *Google Classroom* y se recuperó en un formato *CSV*. Para esto se escribió un script para automatizar este proceso en el lenguaje de *Python* usando la librería *googleapiclient* de *Google* para poder conectarnos al servicio de *Google Classroom* mediante el diseño de su *API Restful* (*Google Developers*, 2025), los pasos de la automatización del script son los siguientes:

Autenticación OAuth 2.0:

Para acceder de forma segura a los recursos académicos, se implementó el protocolo *OAuth 2.0*, siguiendo la documentación oficial de *Google* (Google, s. f.). Este protocolo permite que el *script* en *Python* obtenga datos protegidos sin exponer credenciales del usuario, empleando en su lugar un archivo de credenciales en formato *JSON* (*JavaScript Object Notation*) generado desde *Google Cloud Console*. Dicho archivo contiene la *client_secret* y especifica los alcances (*scopes*) necesarios para la lectura de cursos, trabajos, entregas y otros elementos académicos. Durante la ejecución, el flujo de autenticación genera un *token* de acceso único en formato *JSON*, que autoriza temporalmente las solicitudes a la *API* y se renueva en cada inicio de sesión. Esto elimina la necesidad de incrustar contraseñas en el código, garantiza que únicamente usuarios autorizados puedan acceder a la información, reforzando la privacidad y la seguridad de los datos obtenidos desde *Google Classroom* (Google for Developers, 2025).

Medidas adicionales de seguridad y privacidad:

Además, se implementaron tres acciones para garantizar la protección de los datos, específicamente:

1. Anonimización de datos: los identificadores personales de los estudiantes (nombres, correos electrónicos, ID de usuario) fueron omitidos antes de alimentar el dataset, asegurando que el análisis trabajara con datos despersonalizados.
2. Gestión de tokens: los *tokens OAuth 2.0* generados se almacenaron de forma local y encriptada, con expiración automática, evitando su exposición en repositorios de código o entornos compartidos.
3. Scopes mínimos: el script solicitó únicamente los permisos indispensables de la *API* de *Google Classroom* (*classroom.courses.readonly*, *classroom.coursework.students.readonly*, *classroom.student-submissions.students.readonly*, *classroom.rosters.readonly*), siguiendo el principio de privilegios mínimos recomendado por *Google*, y sin requerir permisos de escritura o administrativos.

Cumplimiento normativo:

Este estudio se realizó siguiendo las disposiciones de la *LGPDPPO-MX* (*Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados*) aplicables al contexto educativo mexicano. Los datos académicos obtenidos de *Google Classroom* fueron tratados únicamente con fines de investigación, bajo autorización institucional, y se procesaron de forma anonimizada para garantizar la confidencialidad de los estudiantes. No se recopilaban datos sensibles ni se compartió información con terceros fuera de la *Universidad Politécnica de Querétaro*. Asimismo, la investigación mantiene alineación con los principios internacionales de la *FERPA*, en lo relativo a proteger la privacidad de la información académica de los alumnos.

PRIMER PARCIAL	
ED.01.01. INTRODUCCION A LOS SISTEM...	
EP.01.01. INTALAR SISTEME OPERATIVO ...	
EC.01.01. EXAMEN PRIMER PARCIAL	
SEGUNDO PARCIAL	
ED.02.01. PERMISOS ROOT	
EP.02.01. PARTICION DE SISTEMA OPER...	
EC.02.01. EXAMEN SEGUNDO PARCIAL	
TERCER PARCIAL	
ED.03.01. COMPILAR KERNEL	
EP.03.01. LINUX FROM SCRATCH	
EC.03.01. EXAMEN TERCER PARCIAL	

Figura. 2. Ejemplo de organización de actividades académicas por evidencias por competencia (ED, EP, EC) en Google Classroom por parciales (Primer, Segundo y Tercer Parcial).

3.2. Recopilación y limpieza de los datos

Mediante un método de la librería *googleapiclient* se obtiene la lista de tareas asociadas a cada curso. En el contexto de la *Universidad Politécnica de Querétaro* (UPQ), el modelo de evaluación se basa en competencias, concretamente: Evidencia de Conocimiento (EC), Evidencia de Producto (EP) y Evidencia de Desempeño (ED). El script identifica y clasifica las tareas en estas tres categorías, tomando en cuenta los nombres definidos por la nomenclatura. Los temas permiten agrupar los trabajos por parcial (1º, 2º y 3º) para lograr esto en Google Classroom se organiza como el ejemplo de la Figura 2. (Google Workspace Developers, 2025).

Finalmente, el *script* organiza toda la información obtenida y la exporta a dos archivos en formato CSV. El primero se estructura separando cada parcial por sus competencias (*EC*, *EP* y *ED*), ver Figura.3. El segundo archivo CSV separa el promedio por parciales (1º, 2º y 3º) ver Figura 4, garantizando formatos estandarizados para su posterior análisis y uso en el cálculo de promedios y entrenamiento de modelos de predicción (Python Software Fundación, 2025).

Grupo	123 Parcial	123 EC	123 ED	123 EP
s191	1	7.39	8.57	9.98
s191	1	7.02	9.18	6.38
s191	1	9.67	7.74	8.31
s191	1	6.91	6.17	8.59
s191	1	8.56	7.41	9.80
s191	1	9.25	6.73	9.36
s191	1	8.70	6.96	7.71
s191	1	9.92	9.23	8.12
s191	1	8.73	8.93	7.73
s191	1	6.61	6.77	9.83

Figura. 3. Dataset de calificaciones por competencias extraídas por API de Google Classroom (EC, ED, EP) del Primer Parcial.

El flujo anterior aprovecha las llamadas a la *API* oficial de *Google Classroom* para recopilar datos sistemáticamente. Todo el proceso está automatizado: una vez que el *script* se ejecuta se gestiona la autenticación y se generan los archivos CSV sin necesidad de pasos manuales. Esto ahorra tiempo al docente o administrador al recopilar y promediar calificaciones de *Google Classroom*, especialmente en casos con muchas tareas y estudiantes, creando un dataset estructurado y limpio para la parte de experimentación y evaluación de modelos para predecir estudiantes en riesgo.

Grupo	123 Parcial 1	123 Parcial 2	123 Parcial 3
s191	9.15	8.41	9.68
s191	8.69	7.78	9.43
s191	7.65	9.45	6.66
s191	6.52	8.37	8.46
s191	8.04	8.75	8.96
s191	9.86	6.73	9.85
s191	6.12	6.58	9.04
s191	7.47	9.38	7.01
s191	7.25	6.46	6.16
s191	7.77	7.23	9.69

Figura. 4. Dataset de promedios de las competencias (EC, ED, EP) para cada uno de los parciales (Parcial 1, Parcial 2 y Parcial 3).

3.3. Experimentación y entrenamiento de modelos.

Evaluación del Primer Parcial.

Antes de la experimentación primero se empleó un procesamiento y análisis de los datos utilizando la librería de *Pandas* en *Python* para evaluar el *Primer Parcial*, para integrar, filtrar y ordenar la información. A través de una función se filtran y se listan los alumnos que no alcanzaron la calificación mínima aprobatoria (7). Y se determina la *competencia* con menos calificación para cada alumno, para evaluación de debilidades y áreas de oportunidad, así brindar al docente responsable la información filtrada lista para poder intervenir en una retroalimentación temprana hacia los estudiantes reprobados en *Primer Parcial*. Este procesamiento utiliza operaciones determinísticas y condicionales aún no se aplican técnicas de *IA* o *ML*, como se observa en la Figura 5.

Predicción del Segundo Parcial con competencias del Primer Parcial.

A partir del análisis de las calificaciones del *Primer Parcial* se implementó un modelo de aprendizaje automático supervisado utilizando *regresión lineal* con el objetivo de predecir las calificaciones del *Segundo Parcial* a partir de las competencias (*EC*, *ED* y *EP*) del *Primer Parcial*. Los resultados obtenidos muestran un *MSE* de 1.54, *RMSE* de 1.24 y *MAE* de 1.08. En términos prácticos en promedio, la diferencia entre las calificaciones reales y las predichas por el modelo es cercana a ± 1.2 puntos en una escala de 0 a 10.

Sin embargo, el coeficiente de determinación R^2 fue negativo (-0.004), lo que indica que el modelo no explica la varianza de los datos y que su capacidad predictiva es incluso inferior a una predicción basada en la media. Aunque los errores obtenidos reflejan un margen moderado, la ausencia de poder explicativo confirma que el modelo entrenado únicamente con las calificaciones de primer parcial no es eficaz para poder identificar con más precisión a los estudiantes en riesgo de reprobación en el segundo parcial, ver Figura 6.

Grupo	123 Parcial...	123 EC	123 ED	123 EP	Competencia débil
s191	6.52	6.91	6.17	8.59	ED
s191	6.52	6.91	6.17	8.59	ED
s191	6.52	6.91	6.17	8.59	ED
s191	6.12	8.70	6.96	7.71	ED
s191	6.12	8.70	6.96	7.71	ED
s191	6.12	8.70	6.96	7.71	ED
s191	6.78	8.07	8.26	9.10	EC
s191	6.78	8.07	8.26	9.10	EC
s191	6.78	8.07	8.26	9.10	EC
s193	6.42	6.22	9.53	9.83	EC

Figura. 5. Dataset de estudiantes reprobados en primer parcial (>7), sus calificaciones de sus competencias (EC,ED,EP) y su competencia con menor calificación.

123 EC	123 ED	123 EP	123 Parcial 2 Predicho	Competencia más débi...
0 rows x 5 columns				

Figura. 6. Resultados nulos al intentar predecir calificaciones del Segundo Parcial únicamente con competencias del Primer Parcial.

Esto se debe a que la información disponible en esa etapa temprana del curso no es suficiente para detectar patrones de reprobación de forma confiable. Este hallazgo sugiere que se requiere esperar a la segunda evaluación del *Segundo Parcial*, esperando tendencias de mejora o empeoramiento, para aumentar la capacidad predictiva del modelo.

Evaluación del Parcial 2.

En el transcurso del cuatrimestre justo cuando se llegó a la semana de evaluación del *Segundo Parcial*, siguiendo la misma metodología aplicada en el *Primer Parcial*, se repitió el mismo procedimiento para esta nueva evaluación, el objetivo fue de nuevo identificar la competencia más débil de cada estudiante en esta etapa. Se evaluaron las tres competencias correspondientes al parcial (*EC*, *ED* y *EP*) y se determinó aquella con la calificación más baja para cada alumno. Posteriormente, se filtraron aquellos estudiantes con una calificación final inferior a (7), clasificándolos como reprobados, y se listaron junto con su respectiva competencia más débil, ver Figura 7.

Grupo	123 Parcial 2	123 EC	123 ED	123 EP	Competencia débil
s191	6.71	8.32	7.03	8.57	ED
s191	6.71	8.32	7.03	8.57	ED
s191	6.71	8.32	7.03	8.57	ED
s191	6.76	7.65	9.01	9.33	EC
s191	6.76	7.65	9.01	9.33	EC
s191	6.76	7.65	9.01	9.33	EC
s191	6.46	8.73	8.93	7.73	EP
s191	6.46	8.73	8.93	7.73	EP
s191	6.46	8.73	8.93	7.73	EP
s191	6.44	9.80	9.92	9.88	EC

Figura.7. Dataset de estudiantes reprobados (>7) en *Segundo Parcial*, sus calificaciones de sus competencias (*EC*, *ED*, *EP*) y su competencia con menor calificación.

Este enfoque comparativo entre parciales permite observar si las debilidades detectadas en el *Primer Parcial* se mantienen o si los estudiantes presentan cambios en las áreas que requieren refuerzo filtrando esta información se entregó al docente a cargo para que pueda realizar una retroalimentación temprana y aplicar estrategias de refuerzo individualizadas.

Predicción del Segundo Parcial con Competencias de Primer y Segundo Parcial.

Con anterioridad se observó la predicción el *Segundo Parcial* solo con las competencias de *Primer Parcial*, es una etapa muy temporada para una predicción con exactitud. En este punto del curso se tienen las calificaciones de las competencias de *Segundo Parcial*, se empleó nuevamente predecir la calificación. Antes de esto se llevó a cabo un experimento para determinar cual modelo ofrecía la mejor desempeño para la estimación del rendimiento de los estudiantes, se realizó un análisis comparativo entre tres técnicas de aprendizaje supervisado: *regresión Lineal*, *árbol de decisión* y *Random Forest*.

Para este experimento, se utilizaron como variables predictoras las calificaciones obtenidas en las competencias (*EC*, *ED* y *EP*) durante el *Primer* y *Segundo Parcial*. La variable objetivo fue la calificación final del *Segundo Parcial*. Los datos fueron divididos en conjuntos de entrenamiento y prueba mediante el método *train/test split*, garantizando así una evaluación justa del rendimiento de cada modelo.

La métrica utilizada para comparar el desempeño fue el *Mean Squared Error (MSE)*, que cuantifica el error cuadrático medio, calculando a partir de la diferencia entre las salidas observadas y las estimadas por el modelo; un valor menor de *MSE* indica una mayor precisión predictiva. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, ver Tabla 2.

Tabla 2. Tabla comparativa algoritmos de aprendizaje supervisado y su puntuación MSE.

Algoritmos	Puntuación MSE
Regresión Lineal	1.9801
Random Forest	1.8805
Árbol de Decisión	2.5182

De acuerdo con los resultados, el modelo *Random Forest* presentó el menor error de predicción, superando ligeramente a la *Regresión Lineal* y de forma más notable al *Árbol de Decisión*. Esto se debe a que *Random Forest*, al combinar múltiples árboles de decisión entrenados en subconjuntos aleatorios de los datos, logra una mejor generalización y reduce la varianza, evitando problemas de sobreajuste que pueden presentarse en modelos más simples.

Por estas razones, se seleccionó *RandomForestRegressor* con 100 árboles (estimadores) y un estado aleatorio fijo con los datos de entrenamiento. Tras el entrenamiento, evaluamos el modelo en el conjunto de prueba prediciendo las calificaciones del Segundo Parcial de los estudiantes en la división de prueba. El rendimiento del modelo se midió mediante el *Error Cuadrático Medio (ECM)*, una métrica de regresión común: valores bajos de *ECM* indican predicciones más precisas. Para nuestro modelo, el *ECM* fue de aproximadamente 1,879, lo que significa que el promedio de los errores de predicción al cuadrado es de 1,879 (en puntos de calificación al cuadrado).

Este es un error razonablemente bajo, aunque tiene margen de mejora (para contextualizar, un ECM de 1,879 implica un error cuadrático medio de aproximadamente 1,37, por lo que, en promedio, las predicciones difieren aproximadamente 1,37 puntos de calificación de los valores reales). Clasificación del Nivel de Riesgo: Para que las predicciones sean prácticas para los educadores, clasificamos cada calificación prevista en un nivel de riesgo:

- Alto: si la calificación prevista es inferior a 7.0 (indica un alto riesgo de reprobar o un bajo rendimiento).

- Medio: si la calificación prevista está entre 7.0 y 8.5.
- Bajo: si la calificación prevista es de 8.5 o superior (bajo riesgo de reprobar).

Estos umbrales se eligieron con base en estándares de calificación típicos (p. ej., en algunos sistemas de calificación, una puntuación inferior a 7 puede considerarse reprobatoria o preocupante). De esta manera, el modelo no solo predice una cifra, sino que también identifica a los estudiantes que podrían necesitar atención adicional.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a un subconjunto representativo de estudiantes utilizados en el experimento, que muestra sus puntuaciones de competencia, la calificación real del *Segundo Parcial*, la calificación del Parcial prevista por el modelo y el nivel de riesgo asignado, ver Figura 8.

÷	Grupo	÷ ¹²³ EC	÷ ¹²³ ED	÷ ¹²³ EP	÷ ¹²³ Parcial 2 Real	÷ ¹²³ Parcial 2 Predicho	÷	Riesgo
33	s196	9.40	7.57	8.66	7.78	7.8815		Medio
9	s191	6.61	6.77	9.83	7.23	7.3890		Medio
146	s193	8.89	9.16	8.30	7.53	7.5697		Medio
282	s194	8.60	6.26	8.68	6.82	6.9135		Alto
261	s193	8.66	6.58	9.38	6.04	6.2091		Alto
125	s196	10.00	8.12	7.92	8.10	8.2555		Medio
108	s191	8.54	7.42	6.98	7.14	8.1089		Medio
206	s191	8.54	7.42	6.98	7.14	8.1089		Medio
109	s191	8.60	9.18	7.35	7.29	7.2087		Medio
42	s196	6.50	6.54	8.43	8.32	8.1293		Medio

Figura. 8. Comparación entre calificación real y predicha para el Segundo Parcial con Random Forest, mostrando su nivel de riesgo asignado.

La Figura 9 presenta la comparación entre las calificaciones reales y las predichas por el modelo. La línea roja representa la diagonal ideal donde el valor real y el estimado coinciden perfectamente. Si bien la mayoría de las observaciones se encuentran próximas a esta línea, se aprecian desviaciones en algunos casos, lo que explica el error cuadrático medio obtenido (~ 1.37 puntos). Esto sugiere que el modelo logra capturar la tendencia general de los datos, pero todavía presenta limitaciones para predicciones con alta precisión en casos individuales.

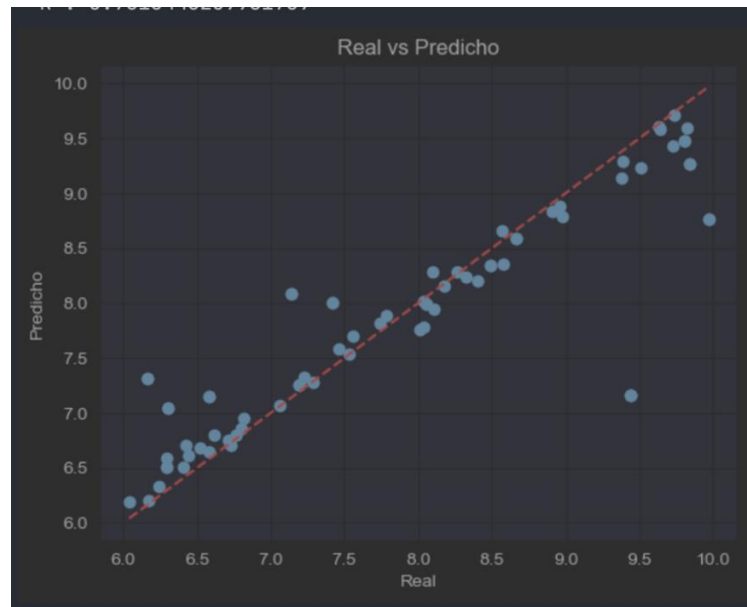


Figura. 9. Gráfico de dispersión Real vs Predicho con línea de tendencia.

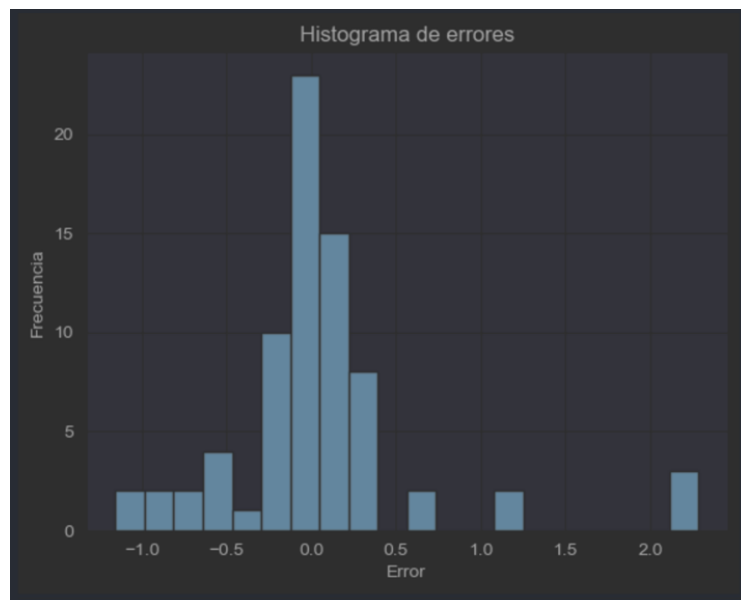


Figura. 10. Distribución de errores (calificación real – calificación predicha) en la predicción del Segundo Parcial.

El histograma de la Figura 10 muestra la distribución de los errores (valor real – valor predicho). La mayoría de los errores se concentran en torno a 0, lo que indica que el modelo no presenta un sesgo sistemático hacia la sobreestimación o subestimación. No obstante, existen algunos errores mayores a 1 punto, que reflejan estudiantes cuya predicción difirió significativamente de la calificación real.

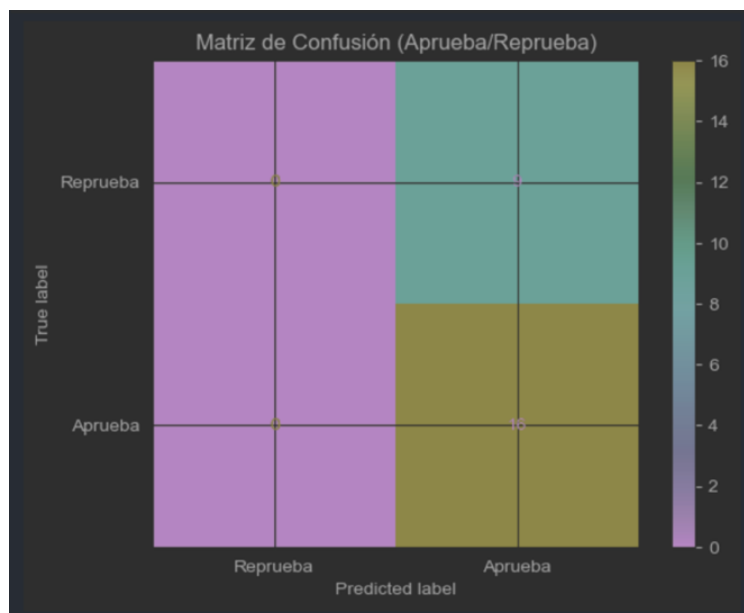


Figura. 11. Matriz de confusión del modelo para clasificación binaria (aprobar/reprobar).

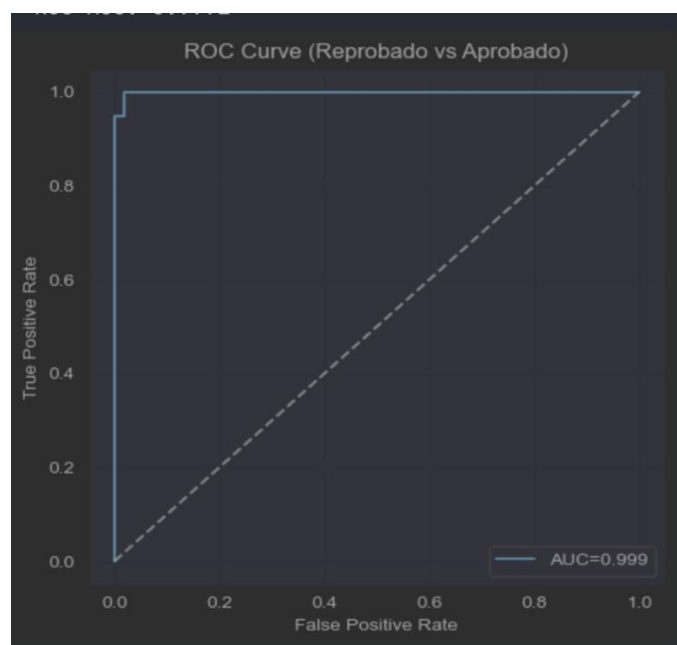


Figura. 12. Curva ROC y AUC de diferencia de Reprobados Vs Aprobados en la predicción de Segundo Parcial.

Con el fin de evaluar la utilidad práctica en un escenario educativo, las predicciones continuas fueron transformadas en una clasificación binaria: *aprueba* (≥ 7.0) y *reprueba* (< 7.0). La Figura 11 presenta la matriz de confusión correspondiente. El modelo logró identificar correctamente a la mayoría de los aprobados, aunque mostró dificultades para clasificar a los reprobados, generando un número relevante de falsos negativos (estudiantes en riesgo que fueron clasificados como

aprobados). Este hallazgo refuerza la necesidad de mejorar el modelo si se desea usarlo como sistema de alerta temprana.

La Figura 12 presenta la curva ROC, que mide la capacidad discriminativa del modelo al variar el umbral de decisión. El valor del área bajo la curva (AUC) obtenido fue de 0.999, lo que indica un excelente desempeño teórico en términos de separación entre clases. Sin embargo, este resultado contrasta con la matriz de confusión, lo que sugiere que el modelo puede estar sobre ajustado o que los datos de prueba presentan un desbalance de clases.

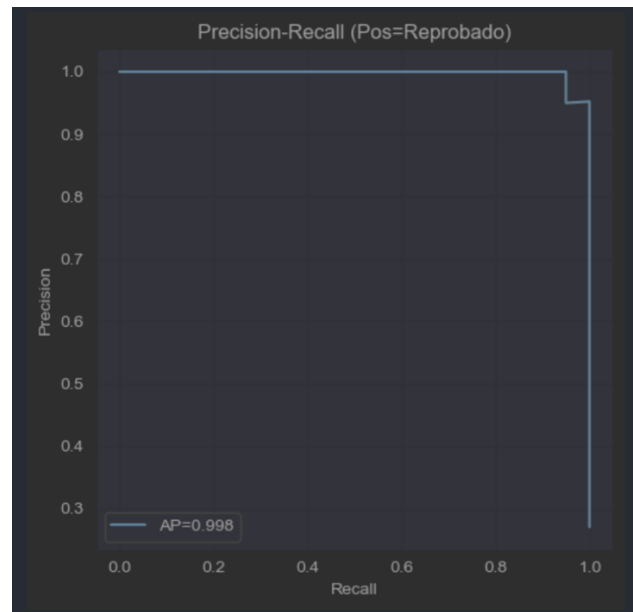


Figura. 13. Curva de Precisión–Recall con la clase positiva como definida como Reprobado.

Finalmente, la Figura 13 muestra la curva de Precisión–Recall con la clase positiva definida como *Reprobado*. El área promedio bajo esta curva fue de 0.998, un valor que también indica un alto potencial predictivo. En la práctica, sin embargo, la utilidad real del modelo se ve limitada por la baja capacidad de detección de estudiantes en riesgo observada en la matriz de confusión.

Predicción Tercer Parcial

Con el propósito de estimar el rendimiento académico correspondiente al tercer parcial se implementaron y compararon dos modelos de regresión supervisada: *regresión lineal múltiple* y *RandomForestRegressor*. El conjunto de datos integró como variables independientes las calificaciones de los parciales previos *Primer* y *Segundo Parcial* junto con las evidencias de evaluación por competencias correspondientes a cada parcial (*EC*, *ED* y *EP*). La variable dependiente correspondió a la calificación real del *Tercer Parcial*, ver Figura 14.

En el primer enfoque, la regresión lineal múltiple obtuvo un error cuadrático medio (*MSE*) de 1.2728 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.0894, lo que indica que el modelo únicamente explica el 8.94% de la variabilidad de las calificaciones reales, reflejando una capacidad predictiva muy limitada para este problema.

Por su parte, el modelo *RandomForestRegressor*, entrenado con parámetros por defecto y semilla aleatoria 42, presentó un *MSE* de 0.2248 y un R^2 de 0.8391, lo que implica que es capaz de explicar aproximadamente el 83.91% de la variabilidad de las calificaciones reales.

Este resultado, sumado a su menor error medio cuadrático, evidencia una mejora sustancial respecto al modelo lineal, reduciendo significativamente las desviaciones entre las calificaciones predichas y las observadas, ver Tabla 3.

Tabla 3. Tabla comparativa algoritmos de aprendizaje supervisado y su puntuación *MSE* y R^2 .

Modelo	MSE	R2
Regresión Lineal	1.2728571651116185	0.08937598377459965
Random Forest	0.2248282456122458	0.8391539871149796

La interpretación de estos valores sugiere que el Random Forest presenta una alta capacidad para capturar relaciones no lineales y posibles interacciones entre las variables predictoras, lo que resulta particularmente relevante en contextos educativos donde el desempeño académico puede depender de múltiples factores interrelacionados.

Grupo	123 Parcial 3	123 Parcial 3 (predicho)
s191	9.68	8.370968
s191	9.68	8.370968
s191	9.68	8.370968
s191	9.43	8.528514
s191	9.43	8.528514
s191	9.43	8.528514
s191	6.66	7.437943
s191	6.66	7.437943
s191	6.66	7.437943
s191	8.46	8.165097

Figura. 14. Predicción del desempeño del Tercer Parcial comparada con calificaciones reales.

4 Resultados.

Los experimentos realizados permitieron evaluar la eficacia de diversos algoritmos de aprendizaje automático para la estimación del rendimiento académico, así como extraer información valiosa sobre el desempeño por competencias de los estudiantes. En primer lugar, los resultados iniciales mostraron que un modelo entrenado únicamente con las calificaciones del Primer Parcial (EC, ED y EP) no logró predecir de forma confiable el desempeño en el Segundo Parcial ni identificar a tiempo

a los estudiantes en riesgo. El error cuadrático medio obtenido fue de 1.53, con un RMSE de 1.23 y un R^2 negativo, lo que indica que el modelo no explica la varianza de los datos y su poder predictivo es prácticamente nulo. Además, al transformar las predicciones en clases binarias (*aprueba / reprueba*), la matriz de confusión reveló que el modelo clasificaba correctamente a la mayoría de los aprobados, pero no lograba identificar a ningún estudiante en riesgo, lo cual refuerza que la información disponible en esa etapa temprana del curso resulta insuficiente para detectar patrones confiables.

En un segundo experimento se incorporaron las calificaciones de las competencias del Segundo Parcial (EC, ED y EP) como variables predictoras adicionales. Para comparar enfoques, se evaluaron tres modelos supervisados: regresión lineal, árbol de decisión y Random Forest. Los resultados de esta comparación (Tabla 1) mostraron que el modelo Random Forest obtuvo el menor error de predicción (ECM $\approx$ 1.88), superando ligeramente a la Regresión Lineal (ECM $\approx$ 1.98) y de forma más notable al Árbol de Decisión (ECM $\approx$ 2.52). Con el modelo Random Forest ajustado (100 árboles y parámetros por defecto), se procedió a realizar las predicciones sobre el conjunto de prueba. El rendimiento alcanzado fue satisfactorio: se registró un ECM de aproximadamente 1.88, lo que equivale a un RMSE cercano a 1.37 puntos de diferencia promedio entre las calificaciones reales y las predichas (en una escala de 0 a 10). La Figura 9 muestra la relación entre valores reales y predichos, donde se aprecia un ajuste aceptable, aunque con dispersión en casos específicos. El histograma de errores (Figura 10) confirma que la mayoría de las predicciones se concentran en torno a 0, sin sesgos sistemáticos, pero con algunos errores relevantes (>1 punto).

Por otra parte, las métricas globales (curva ROC en Figura 12 y curva de Precisión–Recall en Figura 13) arrojaron valores cercanos a la perfección (AUC = 0.999 y AP = 0.998). Estos resultados, aunque impresionantes, deben interpretarse con cautela, ya que probablemente reflejan un desbalance de clases en el conjunto de datos más que una verdadera capacidad predictiva.

Finalmente, además de las predicciones cuantitativas, el sistema desarrollado permitió identificar las competencias académicas más débiles de cada estudiante en cada parcial, proporcionando información cualitativa valiosa para la retroalimentación. Este análisis comparativo mostró si las debilidades detectadas en el Primer Parcial persistían en el Segundo o si surgían nuevas áreas de oportunidad. De esta manera, la herramienta no solo funciona como predictor de calificaciones, sino también como un sistema de ayuda a la toma de decisiones pedagógicas, al ofrecer a los docentes insumos concretos para diseñar intervenciones focalizadas antes de los exámenes finales del curso.

5 Conclusiones y Trabajos futuros.

Este estudio se centró únicamente en estudiantes de la Ingeniería en Sistemas Computacionales en la asignatura de Sistemas Operativos, dado que se trataba de los grupos directamente accesibles al autor. En consecuencia, el modelo fue entrenado únicamente con las competencias definidas en la UPQ (EC, ED y EP) como variables de entrada, sin considerar factores demográficos como sexo, edad o carrera. Esto implica que, aunque el modelo refleja de manera fiel el sistema de evaluación por competencias de la institución, aún no se ha evaluado su robustez frente a posibles sesgos demográficos.

Bajo esta limitación metodológica demostró viabilidad automatizar la evaluación académica y la estimación temprana del rendimiento académico mediante modelos de aprendizaje automático aplicados a datos reales obtenidos de la plataforma Google Classroom. Los resultados confirmaron que, entre los modelos considerados, el enfoque basado en Random Forest ofreció la mayor precisión predictiva exacta del 91.9%. Además, especialmente al anticipar el desempeño en evaluaciones posteriores (segundo y tercer parcial).

En particular, el modelo Random Forest logró alcanzar un coeficiente de determinación elevado (~ 0.84) en la predicción del tercer parcial, superando ampliamente a la regresión lineal tradicional. Esto supone una contribución importante, ya que permitió identificar con suficiente anticipación a los estudiantes en alto riesgo de bajo rendimiento o reprobación, con un nivel de acierto y detalle muy superior al que se obtendría mediante métodos manuales o heurísticos simples. Adicionalmente, el sistema implementado fue capaz de señalar las competencias específicas en las que cada alumno presentaba mayores debilidades (EC, ED o EP), brindando así información accionable para personalizar la enseñanza.

Se reconoce que un sistema de predicción en educación debe garantizar equidad y no reproducir desigualdades, por lo que en trabajos futuros se contempla ampliar la muestra a otras carreras y analizar explícitamente la existencia de sesgos para fortalecer la validez y la equidad del modelo. Esto podría implicar el reentrenamiento o ajuste de los modelos para distintos contextos, e incluso la comparación con otros algoritmos avanzados (p. ej., máquinas de vector de soporte, redes neuronales o métodos de ensemble como XGBoost) que pudieran ofrecer un rendimiento igual o superior al Random Forest. Otra línea de mejora consiste en afinar la optimización de hiperparámetros del modelo Random Forest mediante técnicas de búsqueda sistemática o validación cruzada, con el objetivo de reducir aún más el error de predicción sin incurrir en sobreajuste.

Referencias

Agyemang, E. F., & Mensah Obu-Amoah Ampomah Louis Agyekum Justice Akuoko-Frimpong, J. A. (n.d.). Predicting Students' Academic Performance Via Machine Learning Algorithms: An Empirical Review and Practical Application. <https://doi.org/10.7176/CEIS/15-1-09>

Cruz-Jesus, F., Castelli, M., Oliveira, T., Mendes, R., Nunes, C., Sa-Velho, M., & Rosa-Louro, A. (2020). Using artificial intelligence methods to assess academic achievement in public high schools of a European Union country. *Heliyon*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E04081/ATTACHMENT/2E3CFCB1-8C36-4BB8-A27A-6291C924E98B/MMC1.DOCX>

Automatización De La Evaluación Académica Para Predecir Alumnos En Riesgo Con Algoritmos De Aprendizaje Automático

Martínez-Comesaña, M., Rigueira-Díaz, X., Larrañaga-Janeiro, A., Martínez-Torres, J., Ocarranza-Prado, I., & Kreibel, D. (2023). Impacto de la inteligencia artificial en los métodos de evaluación en la educación primaria y secundaria: revisión sistemática de la literatura. *Revista de Psicodidáctica*, 28(2), 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.PSICOD.2023.06.001>

Ramos Armijos, D. F., Ramos Armijos, D. G., Ramos Armijos, N. J., Tapia Puga, V. M., & Tapia Puga, L. I. (2024). Explorando las Fronteras: la Aplicación de Inteligencia Artificial en la Evaluación Educativa. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 5657–5672. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9108

Thakur, S. N., & Rawat, B. (2025). Prediction of Student Performance in E-Learning Environment using Machine Learning Techniques. *Procedia Computer Science*, 259, 1416–1425. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2025.04.096>

Zafari, M., Sadeghi-Niaraki, A., Choi, S. M., & Esmaeily, A. (2021). A practical model for the evaluation of high school student performance based on machine learning. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311534>

Google. (31 de agosto de 2025). Cómo usar OAuth 2.0 para acceder a las API de Google. Google Developers. <https://developers.google.com/identity/protocols/oauth2?hl=es-419>

Análisis Comparativo Entre Un Modelo Numérico De Viga Basado En Sección 2d Y Una Simulación Por Método FEM 3d De Una Pala Compuesta Bajo Cargas De Flexión

Brandon Alexis Cano Díaz¹, Mauricio Torres Arellano¹ y Eduardo José Trujillo¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Universidad Tecnológica de Querétaro, Pie de la cuesta 2501, 76148 Querétaro, México
brandon.cano@cidesi.edu.mx

Resumen. En el presente trabajo se desarrolla un análisis comparativo entre un modelo analítico-numérico empleando secciones 2D y simulación por el método de elementos finitos (FEM) en ANSYS para el diseño de un aspa de material compuesto sometida a cargas de flexión. La aproximación analítica se desarrolla empleando la teoría de vigas de Euler-Bernoulli y la teoría de laminados compuestos, discretizando la geometría del aspa por secciones. De forma paralela un modelo FEM se construye para simular el comportamiento bajo las mismas condiciones de carga y con los mismos laminados propuestos, para comparar las deflexiones y la respuesta global a la flexión. El modelo 2D reduce significativamente el costo computacional para proponer un laminado, y obtener la deflexión del aspa bajo cargas de diseño en relación con los paquetes de simulación 3D como ANSYS, la herramienta analítica presenta un potencial en etapas tempranas de diseño.

Palabras Clave: Análisis Estructural, Materiales Compuestos, Método de Elementos Finitos (FEM), Teoría de Vigas.

1. Introducción

Las aspas de turbinas, tanto eólicas como hidrocinéticas, son componentes clave en sistemas de conversión de energía (Burton et al., 2011). Su eficiencia estructural y aerodinámica influye directamente en el desempeño general del sistema. En las últimas décadas, el uso de materiales compuestos en el diseño de aspas ha crecido significativamente debido a su alta relación resistencia-peso y su capacidad para ser optimizados por capas.

Sin embargo, modelar el comportamiento estructural de estas aspas representa un desafío. Las simulaciones tridimensionales con el Método de Elementos Finitos (FEM) (Reddy, 2019), especialmente aquellas que utilizan elementos tipo shell o sólidos, ofrecen resultados de alta fidelidad, pero requieren un gran esfuerzo computacional, tiempos extensos de pre-procesamiento y una carga significativa de recursos, lo cual puede ser ineficiente en etapas tempranas de diseño donde se analizan múltiples variantes.

Por el contrario, los modelos analíticos o simplificados basados en la teoría de vigas ofrecen tiempos de cálculo considerablemente menores y permiten evaluar rápidamente diferentes configuraciones. No obstante, estos modelos suponen simplificaciones importantes, como propiedades seccionales constantes o unidimensionalidad estructural, lo cual puede afectar su precisión ante geometrías complejas o laminados variables.

Análisis Comparativo Entre Un Modelo Numérico De Viga Basado En Sección 2d Y Una Simulación Por Método FEM 3d De Una Pala Compuesta Bajo Cargas De Flexión

Ante esta problemática, surge la necesidad de realizar un estudio comparativo entre ambas aproximaciones con el fin de cuantificar sus diferencias, validar la aplicabilidad de los modelos simplificados, y establecer criterios claros sobre cuándo es adecuado utilizar cada uno. Se plantea la hipótesis de que el modelo de viga basado en secciones 2D proporcionará una buena aproximación a las deflexiones globales bajo cargas de flexión, pero podrá diferir en la predicción de esfuerzos locales o acoplamientos complejos.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Desarrollar un modelo numérico en Python que calcule propiedades seccionales variables (EI_x , EI_y , EI_{xy} , centro elástico) de un aspa compuesta.
- Implementar un solver tipo FEM de viga que utilice dichas propiedades para predecir la deflexión y rotación del aspa bajo carga con empotramiento en la raíz.
- Modelar la misma aspa con las mismas condiciones de carga en ANSYS utilizando elementos shell como solución de referencia.
- Comparar los resultados de deflexión obtenidos por ambos modelos para evaluar la precisión del enfoque simplificado.
- Identificar y analizar las discrepancias encontradas, discutiendo la validez y límites del modelo de viga.

Este estudio se limita a análisis bajo cargas de flexión estáticas, sin considerar efectos dinámicos ni fenómenos de pandeo. El documento se estructura en secciones que abordan el marco teórico, la metodología empleada, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del análisis comparativo.

2. Marco teórico

El enfoque propuesto en este trabajo se clasifica como un modelo analítico-numérico. Se implementa la teoría clásica de vigas Euler-Bernoulli para describir el comportamiento de cada segmento de aspa. Sin embargo, debido a la complejidad geométrica y la variación de las propiedades del material a lo largo de su envergadura, una solución analítica para toda la estructura no es factible. Por ello, se recurre a una implementación numérica mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), donde el aspa es discretizada en una serie de elementos viga 1D. De esta manera, se combina la simplicidad de una base teórica analítica con la robustez de un método numérico para obtener la solución estructural

2.1 Teoría de vigas para materiales compuestos

Las teorías clásicas de vigas como la de Euler-Bernoulli y Timoshenko han sido ampliamente utilizadas para analizar estructuras delgadas. Sin embargo, al aplicarse a aspas compuestas, estas

teorías presentan limitaciones importantes, ya que asumen comportamiento homogéneo e ignoran efectos de acoplamiento entre flexión, torsión y extensión (Wang et al. 2014). Por ello, surge el concepto de "vigas equivalentes homogéneas", donde se reduce el comportamiento complejo del laminado a propiedades efectivas como rigidez axial, rigidez a flexión (tanto en eje y o x) y rigidez torsional. Este enfoque es la base de diversas herramientas computacionales especializadas, como el software BECAS, diseñado para el análisis de secciones transversales de aspas de aerogeneradores (Blasques et al., 2013).

En estructuras anisotrópicas, como las aspas compuestas, es crucial identificar el centro elástico y el centro de cortante, ya que estos puntos determinan los ejes de referencia para desacoplar los modos de deformación. El desacoplamiento ideal permite una interpretación más clara de los efectos estructurales y una modelación más precisa (Kollár & Springer, 2003; Wang et al., 2014).

Existen teorías de vigas más avanzadas, como las formulaciones de Vlasov o modelos específicos para secciones de pared delgada con contorno abierto/cerrado, que consideran estos acoplamientos. Estas son especialmente útiles cuando el término de rigidez adquiere un valor relevante, indicando la presencia de efectos de torsión-flexión acoplada (Vlasov, 1961; Oden & Ripperger, 1981; Wang et al., 2014).

2.2 Cálculo de Propiedades Seccionales de Laminados (Enfoque numérico)

Para calcular las propiedades efectivas de viga se adopta un enfoque basado en la teoría clásica de laminados y macromecánica de una lámina. Cada capa se modela mediante su matriz de rigidez reducida $[Q]$, la cual es transformada a $[\bar{Q}]$ en función del ángulo de orientación de las fibras.

Las propiedades equivalentes de sección se obtienen mediante integración ponderada del módulo longitudinal efectivo en cada segmento, evaluando:

- $EA = \sum(E_x^i \cdot A_i)$: rigidez axial
- $EI_{yy} = \sum(E_x^i \cdot (I_{yy}^i + A_i \cdot d_{x,i}^2))$: rigidez a flexión en el eje y
- EI_{xx}, EI_{xy} : análogamente, considerando las coordenadas referidas al centro elástico global.

El módulo efectivo E_x^i se relaciona con el coeficiente en cada capa, permitiendo una estimación homogénea a nivel de sección. Este enfoque sigue principios similares a los planteados por (Wang et al. 2014), que permiten una formulación consistente para aspas con laminados complejos.

2.3 Método de Elementos Finitos (FEM)

- Modelo de Viga en Python: Se implementa un elemento de viga 2D tipo Euler-Bernoulli con 2 nodos y 3 grados de libertad por nodo (desplazamiento axial, transversal y rotación). La matriz de rigidez se ensambla a partir de las propiedades EA, EI previamente calculadas para cada segmento.
- Modelo de Referencia en ANSYS: Se emplean elementos tipo SHELL181 o SHELL281 para representar el laminado compuesto. La definición de materiales y acomodo del laminado se

realiza a través del módulo ACP (ANSYS Composite PrepPost). El análisis es estático lineal, con cargas transversales y condiciones de empotramiento en la raíz del aspa.

Esta comparación entre enfoques busca validar el modelo de viga frente a un modelo de referencia completo, identificando fortalezas, limitaciones y posibles aplicaciones prácticas de cada uno.

3. Marco teórico

3.1 Descripción del Aspa de Estudio:

La geometría empleada es parte del proyecto Centro Mexicano de innovación en Energía-Oceano (CEMIE-Oceano), este diseño fue optimizado en base a las condiciones de golfo de california, donde la corriente marina nominal tiene una velocidad de 1.5 m/s, el aspa tiene una longitud de raíz apunta de 0.67 m de largo y un ancho de cuerda máximo de 0.2 m [19] (Figura 1).

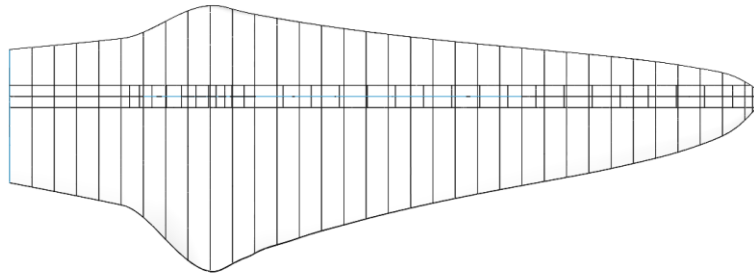


Figura 1: Geometría del aspa para diseño a detalle.

Los materiales a usar para el laminado compuesto a usar, para este caso se han propuesto fibra de vidrio unidireccional (UD) y triaxial (TRIAX) de Sika/Axon, resina epoxi (epoxi 2040) con endurecedor 2047, además se usa un núcleo rígido (R-3318).

Para soportar las cargas a la que es sometida el aspa se proponen laminados que puedan manufacturarse, para esto se analiza a lo largo del aspa la evolución del laminado para revisar el acomodo de las capas y el espesor del núcleo, el cual por consideraciones de manufactura se recomienda mantener un espesor mayor a 3 mm, Figura 2.

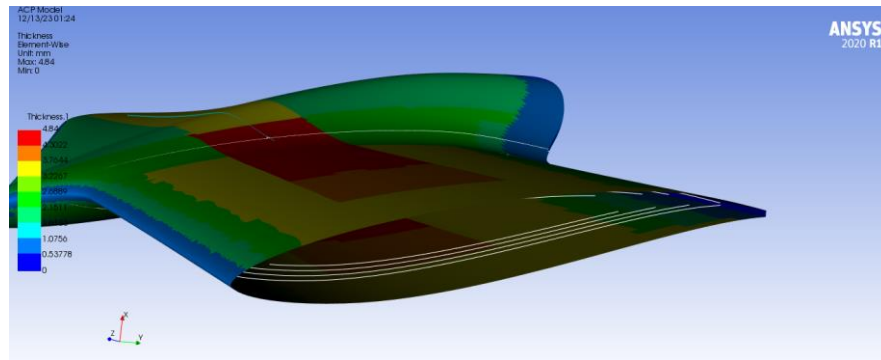


Figura 2: Geometría del aspa para diseño a detalle.

3.2 Desarrollo del Modelo Analítico-Numérico Basado en Secciones 2D.

Pre procesamiento Geométrico y de Laminado:

El primer paso fundamental en el modelo basado en secciones 2D, consiste en la construcción de la geometría y la distribución de material para cada sección transversa del aspa. Este procedimiento se automatiza mediante los siguientes pasos:

Lectura de coordenadas de perfil.

La geometría externa del aspa se define mediante una serie de perfiles aerodinámicos a lo largo de la longitud (coordenada Z,

Figura 3). La precisión de cada sección depende de la densidad de los puntos en los archivos de formato CSV donde se guardan las coordenadas.

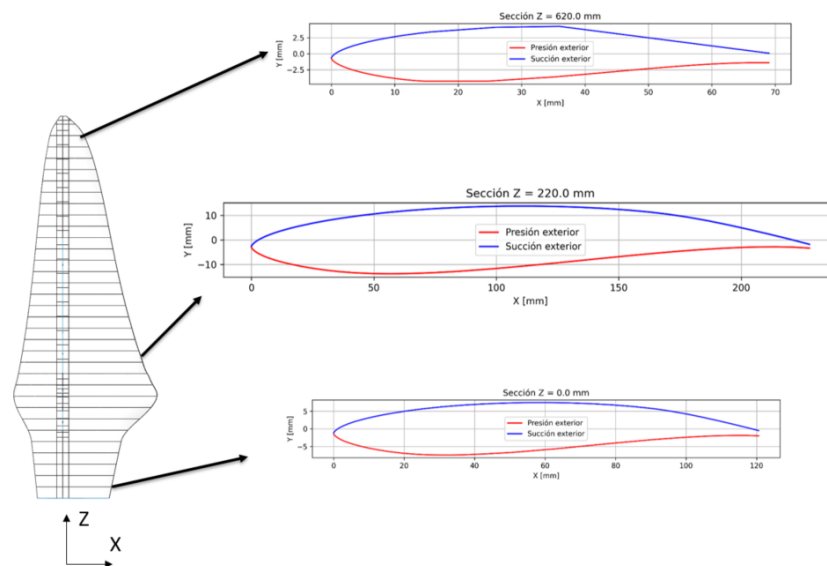


Figura 3: Perfiles aerodinámicos a lo largo del aspa.

Para soportar las cargas operacionales, se propone un laminado híbrido diseñado siguiendo los principios estándar de la ingeniería de palas de material compuesto. La elección y disposición de los materiales busca optimizar la rigidez y la resistencia de manera eficiente:

Spar-caps: Se emplean capas de fibra de vidrio unidireccional (UD) orientadas a 0° a lo largo del eje del aspa. Este material es ideal para los spar-caps, ya que su alta rigidez y resistencia en la dirección de las fibras le permite soportar eficientemente los momentos flectores, que son la carga principal en la pala.

Piel (Skin): Para la superficie aerodinámica (piel de presión y succión), se utiliza un tejido de fibra de vidrio triaxial (TRIAX). Este material, con fibras orientadas típicamente en $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$, proporciona una rigidez quasi-isótropa en el plano, lo que es excelente para resistir las cargas cortantes y mantener la forma aerodinámica, además de aportar rigidez torsional a la estructura.

Almas de Cortante (Shear-Webs): Los shear-webs, que conectan los spar-caps superior e inferior para formar una viga de caja (box-beam), también utilizan el tejido triaxial. Esta configuración es muy eficiente para transferir las fuerzas de cortante entre los largueros.

Núcleo (Core): Se emplea un núcleo de espuma rígida (R-3318) para separar las pieles y los spar-caps, aumentando así el momento de inercia de la sección con un mínimo aumento de peso. Esto incrementa enormemente la rigidez a flexión y previene el pandeo local de los paneles delgados.

La configuración detallada de este laminado se presenta en la Tabla 1.

Lectura de la tabla de laminado y propiedades de material.

Usualmente el diseño de la estructura de un aspa consiste de capas en las superficie de succión y de presión llamadas como “pieles” que permiten la adaptación y dan forma a la superficie aerodinámica, spar-caps capas que soportan las principales cargas de flexión, shear-webs, son refuerzos que brindan rigidez ante fuerzas de flexión y axiales, Figura 4 (León-Muñoz, 2018).

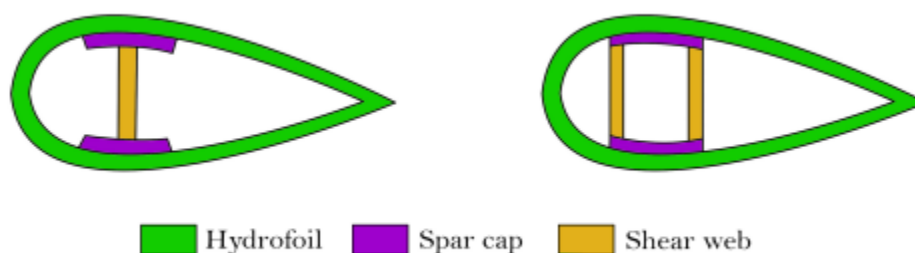


Figura 4: Configuraciones clásicas del laminado de aspas (León-Muñoz, 2018).

La lectura del laminado propuesta para el aspa consiste en proponer una gran variedad de arreglos en el laminado, en la Tabla 1 se muestra un ejemplo de un laminado que consiste de 11 capas que

se asignan tanto a la parte de succión de la superficie aerodinámica y de presión, así como un larguero que se encuentra posicionado a 34% de la longitud de la cuerda desde el borde de ataque, así como un spar-cap que inicia al 28% desde el borde de ataque del perfil. Esta Tabla 2 puede ser modificada por el usuario de tal forma que la configuración del laminado se ajuste a los requerimientos mecánicos de diseño.

Tabla 2: Laminado propuesto.

Tela ID	Epesor	No. Capas	Material	Angulo de orientación	Componente	Z-inicial [mm]	Z-final [mm]	X-inicial desde LE [%]
1	1.35	1	TRIAX	0	piel presión	0	674.27	0
2	1.35	1	TRIAX	0	raíz presión	0	150	0
3	0.85	1	UD	0	spar-cap presión 1	20	620	28
4	0.85	1	UD	0	spar-cap presión 2	50	600	28
6	1.35	1	TRIAX	0	piel succión	0	674.27	0
7	1.35	1	TRIAX	0	raíz succión	0	150	0
8	0.85	1	UD	0	spar-cap succión 1	20	620	28
9	0.85	1	UD	0	spar-cap succión 2	50	600	28
10	1.35	1	TRIAX	0	shear-web-ba	0	600	34
11	1.35	1	TRIAX	0	shear-web-bs	0	600	34

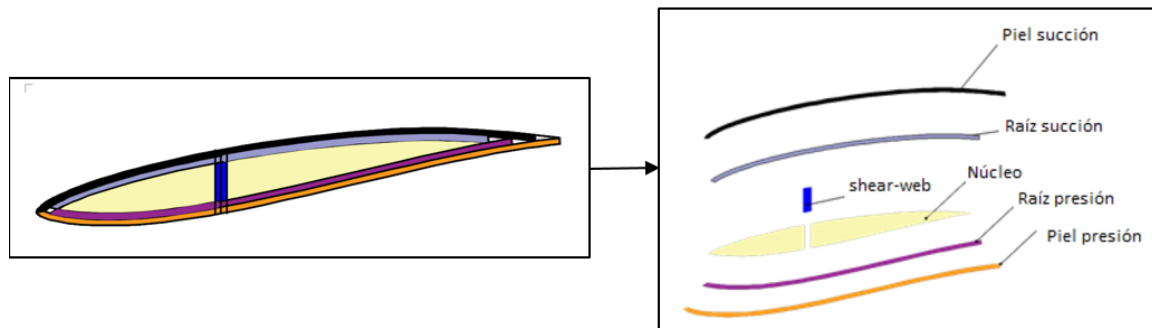
Las propiedades del material también son colocadas en una tabla para ser asignados al laminado diseñado por el usuario, en este caso se tienen fibras de vidrio y un núcleo rígido de polipropileno (R-3318), este material es empleado ya que es el que se tiene disponible en laboratorio y ha sido previamente caracterizado bajo pruebas mecánicas estandarizadas. Las propiedades mostradas en la Tabla 3, se basan en los valores reportados por Rubio González et al. (2022).

Tabla 3: Propiedades mecánicas (Rubio González et al. 2022).

Material ID	TRIAX	UD	núcleo
Density [kg/m ³]	1893	1780	288
Axial stiffness, E_x [MPa]	28000	41800	260
Transverse stiffness, E_y [MPa]	11200	12200	260
In-plane shear stiffness, G_{xy} [MPa]	7200	4710	100
Poissons ratio, ν_{xy}	0.41	0.26	0.3
Axial tensile strength $\sigma_{x,T}$ [MPa]	440	1077	
Axial compressive strength $\sigma_{x,C}$ [MPa]	-352	-542.2	
Transverse tensile strength $\sigma_{y,T}$ [MPa]	87	61.8	
Transverse compressive strength $\sigma_{y,C}$ [MPa]	-123	-380	
In-plane shear strength, $S_{x,y}$ [MPa]	180	49.9	

Generación de capas y desratización del laminado.

En este paso, las líneas externas de presión y succión de todas las secciones transversales toman estas líneas como base para generar las capas en base al espesor y las capas asignadas en cada sección. La Figura 5 muestra un ejemplo de la sección $Z = 0\text{mm}$ de cómo se generan las capas por cada hacia el interior de cada perfil. Cada sección además de generar el laminado de la sección detecta el tipo de material su orientación de la fibra.

**Figura 5:** Componentes de laminado en una sección del asa.

Cálculo de Propiedades Seccionales.

Una vez que la geometría de cada capa y el núcleo han sido discretizadas en polígonos, como se describió en la sección anterior, el siguiente paso es crucial para la determinación de las propiedades mecánicas de cada sección transversal a lo largo del asa. Este proceso consiste de dos etapas: primero, el cálculo de las propiedades geométricas y elásticas de cada segmento

individual que componen la sección, y segundo, la integración de estas propiedades individuales para obtener las rigideces equivalentes de viga y la ubicación del centro elástico de la sección.

Propiedades geométricas por sección

En cada sección las capas que conforman el laminado se representan como un polígono cerrado definido por sus vértices (x, y) en el plano de la sección. Para cada uno de estos polígonos se calculan las propiedades geométricas fundamentales. Se emplea la fórmula de área de Gauss (Weisstein, n.d; Roark & Young, 2020), también conocida como fórmula de la lazada, que permite celular el área de cualquier polígono simple a partir de las coordenadas de sus vértices:

- Área del segmento:

El área A del polígono con n vértices x_i, y_i

$$A = \frac{1}{2} \oint (x dx - y dy) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (1)$$

Es crucial entender que, si bien la formula (1) es un algoritmo general, se aplica de manera iterativa a cada sección transversal Z del aspa. Dado que la geometría del perfil varía a lo largo de la envergadura, cada sección se representa como un polígono con un conjunto único de vértices. Al aplicar esta fórmula a cada polígono, se obtiene un valor de área específico para cada posición Z, resultando en una distribución de área variable, como se muestra posteriormente en la Figura 12.

- Centroide del segmento:

Los primeros momentos de área se obtienen con los mismos productos x_i, y_i (Roark & Young, 2020).

$$\bar{x} = \frac{1}{6A} \sum_i (x_i + x_{i+1})(x_{i+1} y_i - x_{i+1} y_i) \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{6A} \sum_i (y_i + y_{i+1})(x_{i+1} y_i - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

- Momentos de segundo orden respecto al origen:

Los primeros momentos de área se obtienen con los mismos productos x_i, y_i

$$I_{x.o} = \frac{1}{12} \sum_i (y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2)(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

$$I_{y,o} = \frac{1}{12} \sum_i (x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (4)$$

$$I_{xy,o} = \frac{1}{24} \sum_i (x_i y_{i+1} + x_{i+1} y_i + 2x_i y_i + 2x_{i+1} y_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (5)$$

- Traslado al centroide:

Para expresar las inercias en un sistema con origen en $\bar{x}, \bar{y}$, se emplea el teorema de ejes paralelos en cada segmento.

$$I_{x,c} = I_{x,o} - A\bar{y}^2 \quad (6)$$

$$I_{y,c} = I_{y,o} - A\bar{x}^2 \quad (7)$$

$$I_{xy,c} = I_{xy,o} - A\bar{x}\bar{y} \quad (8)$$

Cálculo de Módulo por segmento

Cada segmento poligonal representa una capa de material compuesto con una orientación específica si es el caso. Para cuantificar su contribución a la rigidez global del aspa, se calcula el módulo efectivo en el sistema de coordenadas de la sección.

- Propiedades del material de la capa:

El material de cada segmento, se obtienen sus propiedades elásticas principales ($E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$), a partir de la información del Excel donde se encuentran las propiedades de los materiales.

- Matriz de rigidez reducida:

La contribución a la rigidez de una capa se describe mediante la matriz de rigidez reducida. La rigidez de las capas se modifica si estas se posicionan con un ángulo distinto de cero en la orientación de las fibras con la matriz de rigidez transformada.

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

- Módulos efectivos:

Los módulos efectivos del segmento, referidos a los ejes x, y de la sección, se toman de los componentes de la matriz de rigidez.

Calculan las propiedades globales para cada sección Z , enfatizando la suma ponderada.

Con las propiedades geométricas y los módulos de elásticos efectivos de cada segmento, se procede a calcular las propiedades. Este proceso se basa en ponderar la contribución de cada segmento por su rigidez. Este procedimiento se aplica de forma en múltiples estaciones a lo largo de la envergadura del asa, como se ilustra en la Figura 6.

Para cada sección se visualiza la distribución interna de los materiales y la ubicación del centro elástico (CE), cuya posición varía a lo largo de la envergadura, reflejando los cambios en la geometría y las configuraciones del laminado

Implementación del método analítico para la Viga.

Con las propiedades seccionales equivalentes y posición del centro elástico, se desarrolla el modelo numérico de viga para determinar la respuesta global del asa sometida a flexión.

- Desratización del asa: Se la longitud L del asa en dirección del eje Z se discretiza mediante N elementos de viga, cada par de nodos genera un elemento; si existen N secciones, se obtienen $N - 1$ elementos. La zona rígida del asa se considera para los nodos situados en $Z < 100 \text{ mm}$, ver Figura 7.
- Formulación de la matriz de rigidez del elemento y ensamblaje global.
- Definición del caso de carga.
- Resolución del sistema.

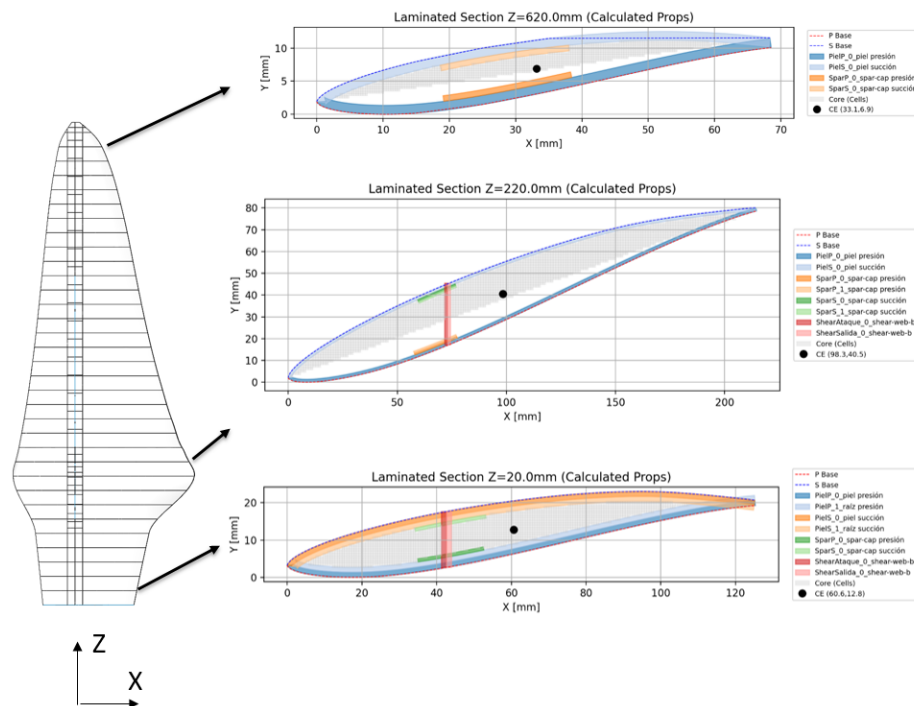


Figura 6: Laminado y centros elástico de secciones.

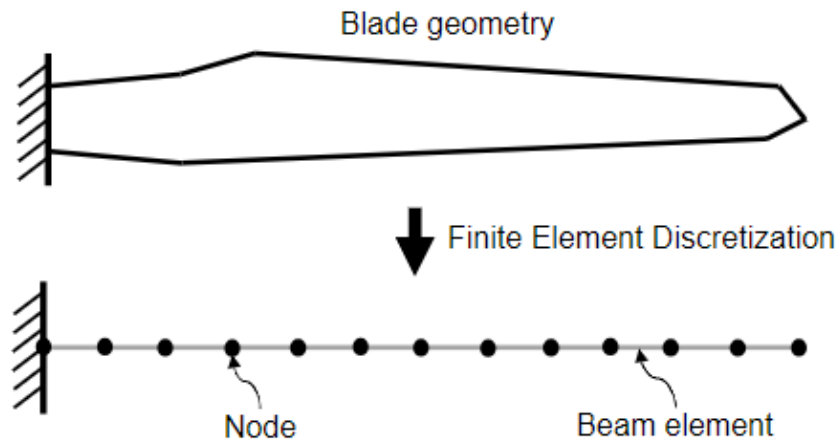


Figura 7: Simplificación del análisis numérico.

El proceso computacional se divide en dos fases principales, como se muestra en los diagramas de flujo de las Figura 8 y Figura 9. La primera fase (Figura 8) consiste en el pre-procesamiento de la geometría y el cálculo de las propiedades seccionales para cada estación del aspa. Los resultados de esta fase, es decir, las rigideces variables (EI_{xx} , EI_{yy}), sirven como entrada para la segunda fase (Figura 9), que corresponde a la solución mediante el Método de Elementos Finitos de viga.

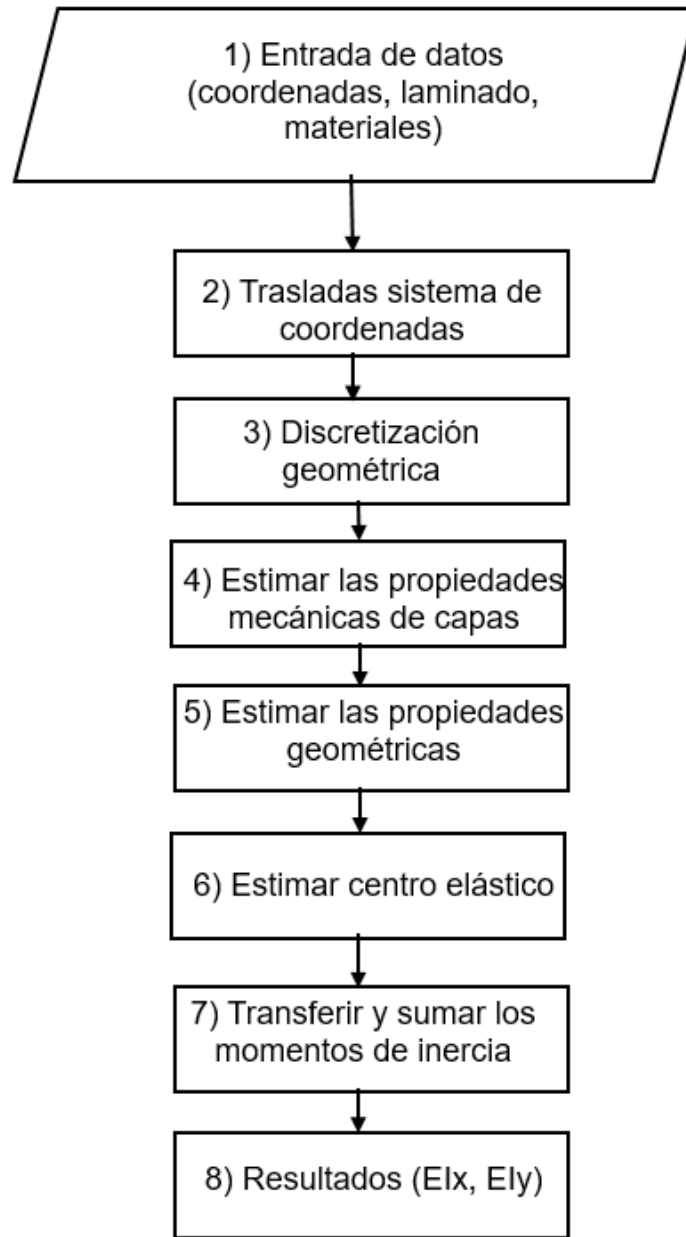


Figura 8: Cálculo de propiedades.

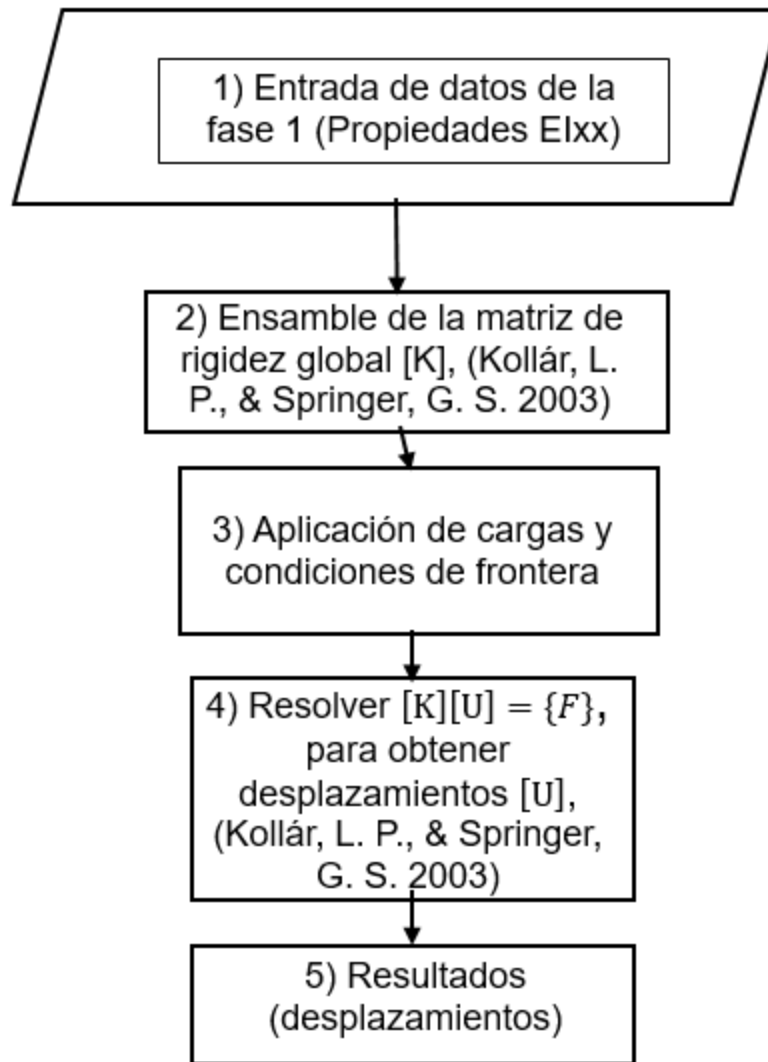


Figura 9: Solución FEM.

3.3 Desarrollo del Modelo de Simulación en ANSYS.

Creación de la Geometría

En esta fase se prepara la geometría 3D en SOLIDWORKS para iniciar con las simulaciones, la geometría empleada es parte del proyecto Centro Mexicano de innovación en Energía-Oceano (CEMIE-Oceano), este diseño fue optimizado en base a las condiciones de golfo de california, donde la corriente marina nominal tiene una velocidad de 1.5 m/s, el aspa tiene una longitud de raíz apunta de 0.67 m y un ancho de cuerda máximo de 0.2 m (León-Muñoz, 2018).

Definición de Materiales y Laminado

Para garantizar que el aspa soporte las cargas operacionales, en esta etapa se analizan diversas configuraciones de laminado mediante simulaciones en ANSYS. El objetivo es identificar la disposición óptima de capas y espesores que cumpla con los requisitos de resistencia estructural y viabilidad de manufactura.

El análisis evalúa la evolución del laminado a lo largo de toda la longitud del aspa, observando el acomodo de las capas y el espesor del núcleo. Se recomienda mantener un espesor mínimo de 3 mm en el núcleo por consideraciones de manufactura y estabilidad. El diseño propuesto del laminado es el propuesto en la Tabla 2.

Mallado.

Se genera una malla para el modelo completo del aspa, utilizando una malla tipo Shell 181 estructurada y refinada en zonas críticas como la raíz y los puntos de transición de sección. Estas áreas tienden a concentrar mayores tensiones debido a cambios de sección y a su cercanía con el punto de fijación, lo que puede hacerlas vulnerables a fallos. La densidad de la malla se ajusta específicamente en estas regiones para mejorar la precisión de los resultados. En el resto de la estructura, se emplea una malla más gruesa para optimizar el tiempo de cálculo sin sacrificar precisión, ver Figura 10.

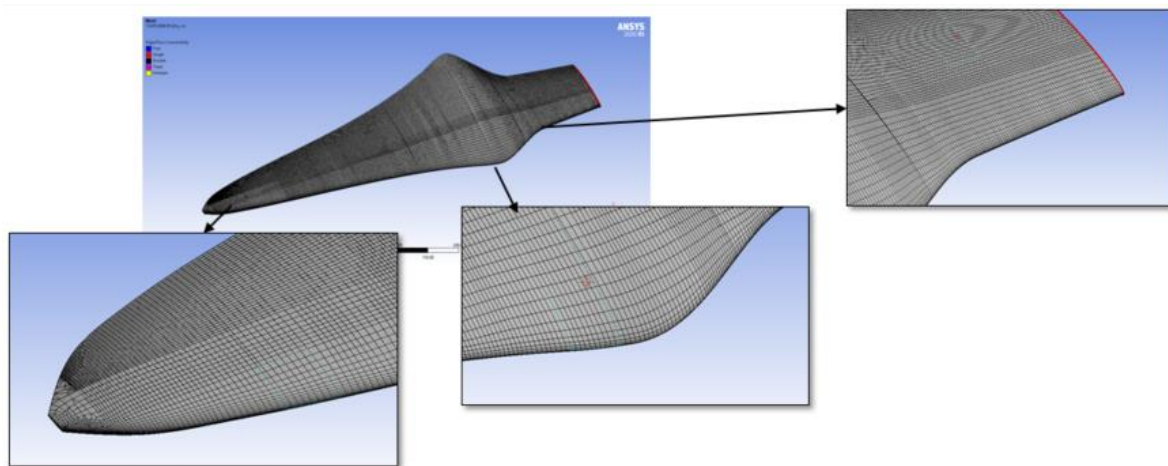


Figura 10: Mallado de aspa.

Aplicación de Cargas y Condiciones de Contorno.

En la simulación de cargas operacionales, se aplicaron cargas distribuidas a lo largo de la longitud del aspa para representar las condiciones de operación a una velocidad de corriente marina de 1.5 m/s. Utilizando el método de *Blade Element Momentum* (BEM), obteniendo una carga distribuida

que varía a lo largo del aspa, desde la raíz hasta la punta. Esta carga distribuida permite simular de manera precisa el efecto de la corriente sobre el aspa en una condición de flujo uniforme.

Para simular el punto de fijación del aspa a la turbina hidrocínética, se aplica una condición de empotramiento en la zona de raíz del aspa. Esta condición de frontera restringe el movimiento en todas las direcciones en la base del aspa, representando así el montaje real de la estructura en la turbina. Este empotramiento permite que el resto del aspa experimente libremente las cargas de flexión y torsión a lo largo de su longitud, replicando de manera realista las tensiones y deformaciones a las que se verá sometida en operación. En la Figura 11, la sección morada indica el empotramiento de la raíz y las flechas rojas las cargas distribuidas.

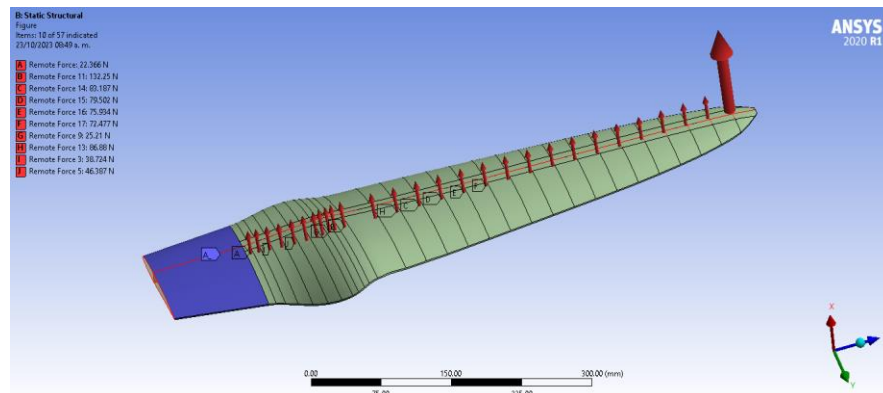


Figura 11: Condiciones de frontera de aspa.

4. Resultados

Las propiedades seccionales de la viga equivalente, calculadas mediante la herramienta Python desarrollada, describen la distribución del Área Geométrica Total, Rigidez Axial (EA), Acoplamiento Flexión-Flexión (Elxy), Coordenada X del Centro Elástico (Xe), Rigidez a Flexión alrededor del eje x local (Elxx), Coordenada Y del Centro Elástico (Ye) y Rigidez a Flexión alrededor del eje y local (Elly), en función de la posición a lo largo del aspa (desde la raíz a punta).

4.1 Propiedades Seccionales Equivalentes.

Área Total Geométrica:

El área transversal muestra un aumento desde la raíz, alcanzando un máximo alrededor de $Z = 180-200$ mm, y luego disminuye progresivamente hacia la punta. Esta tendencia es consistente con el diseño típico de aspas, donde la región de máxima cuerda y espesor se encuentra en el primer tercio o mitad de la envergadura.

Análisis Comparativo Entre Un Modelo Numérico De Viga Basado En Sección 2d Y Una Simulación Por Método FEM 3d De Una Pala Compuesta Bajo Cargas De Flexión

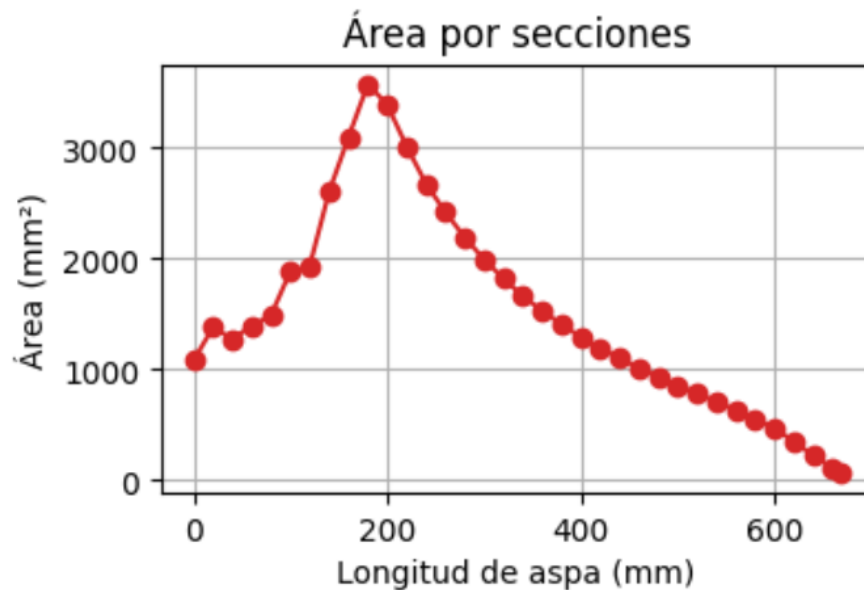


Figura 12: Variación del área de la sección transversal a lo largo del asa.

Rigideces a Flexión E_{Ixx} y E_{Iyy} :

Ambas rigideces a flexión, E_{Ixx} (resistencia a la flexión flapwise) y E_{Iyy} (resistencia a la flexión edgewise), muestran un comportamiento similar al del área con un máximo en la región de $Z = 160$ - 200 mm para E_{Iyy} y $Z=180$ - 200 mm para E_{Ixx} . La magnitud de E_{Iyy} parece ser consistentemente mayor que E_{Ixx} en la mayor parte del asa, lo que sugiere que el asa está diseñada para ser más rígida en la dirección edgewise.

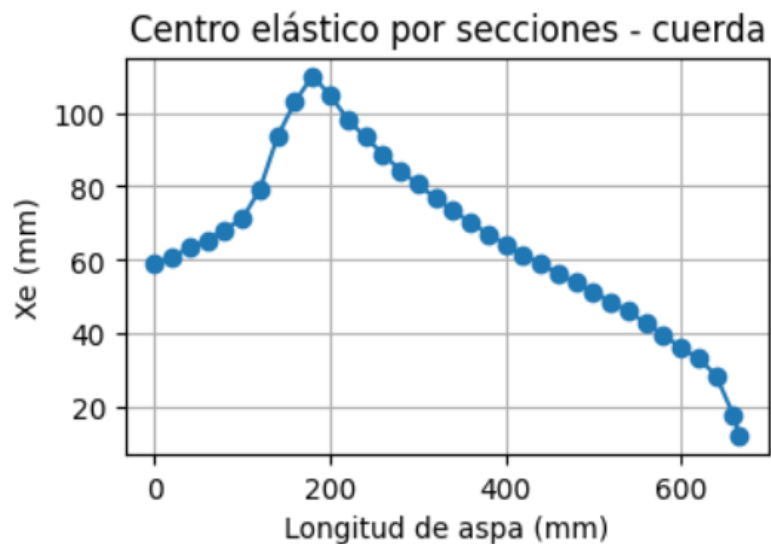


Figura 13: Distribución de rigidez E_{Ixx} a lo largo del asa.

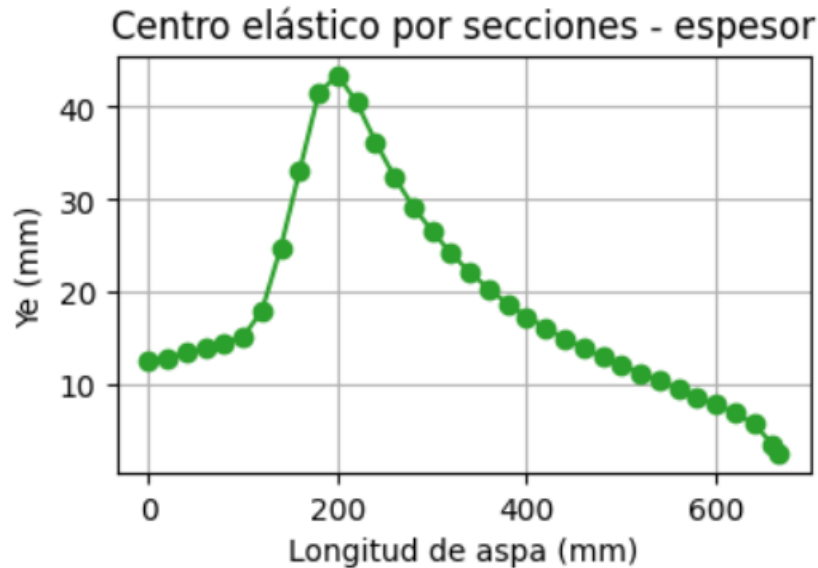


Figura 14: Distribución de rigidez Elyy a lo largo del asa.

Estas son las propiedades son críticas para resistir los momentos flectores debidos a las cargas aerodinámicas. Su variación a lo largo del asa es consistente en base a los resultados mostrados por (Shakya et al., 2019), en donde las rigideces bajan su valor en la zona de la punta del asa y su magnitud máxima se encuentra en la zona de cuerda máxima.

En el escenario de carga de diseño para la simulación en ANSYS, el desplazamiento máximo obtenido de la punta fue de 24.37 mm (Figura 15), lo cual se encuentra dentro del límite aceptable definido por los criterios de diseño, manteniéndose por debajo del 10% de la longitud total del asa (67 mm). Este nivel de desplazamiento confirma que el asa conserva suficiente flexibilidad para absorber las cargas operativas sin experimentar una flexión excesiva que podría comprometer su rendimiento. Al lograr este equilibrio, el diseño asegura tanto la durabilidad como la efectividad funcional en condiciones hidrocineéticas reales.

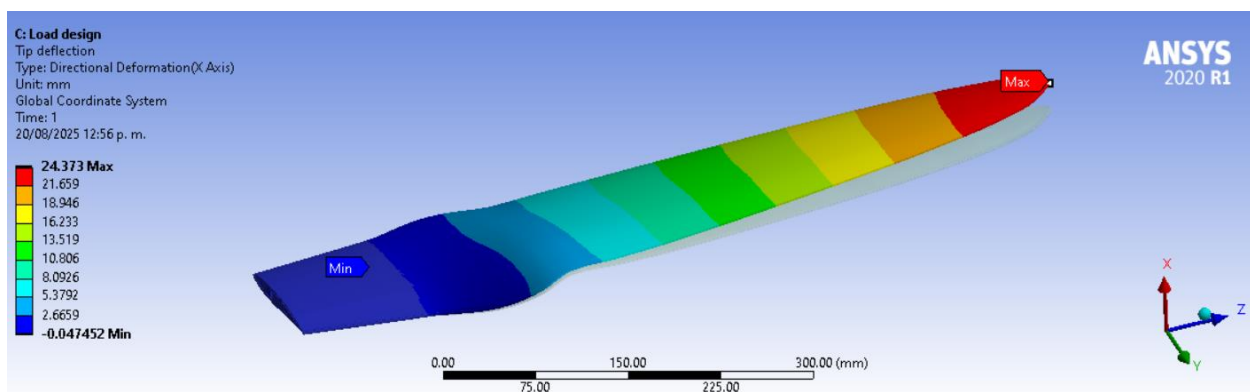


Figura 15: Deflexión de punta por simulación en ANSYS.

Análisis Comparativo Entre Un Modelo Numérico De Viga Basado En Sección 2d Y Una Simulación Por Método FEM 3d De Una Pala Compuesta Bajo Cargas De Flexión

4.2 Análisis Comparativo de la Deflexión:

Una vez caracterizadas las propiedades de las secciones del aspa y calculada su respuesta estructural con ambos modelos, se procede a la comparación directa de los resultados de deflexión. La deflexión máxima en la punta del aspa se una métrica clave para evaluar la rigidez global de la estructura y validar la precisión

del modelo simplificado frente a la simulación de alta fidelidad. La Figura 16 muestra una comparación grafica de la curva de deflexión a lo largo de la envergadura del aspa.

La Tabla 4 presenta los valores de deflexión máxima obtenidos.

Tabla 4: Comparación de la Deflexión en la Punta del Aspa.

	Modelo de Viga	Modelo ANSYS	Diferencia relativa
Deflexión máxima [mm]	23.5	24.37	3.56 %

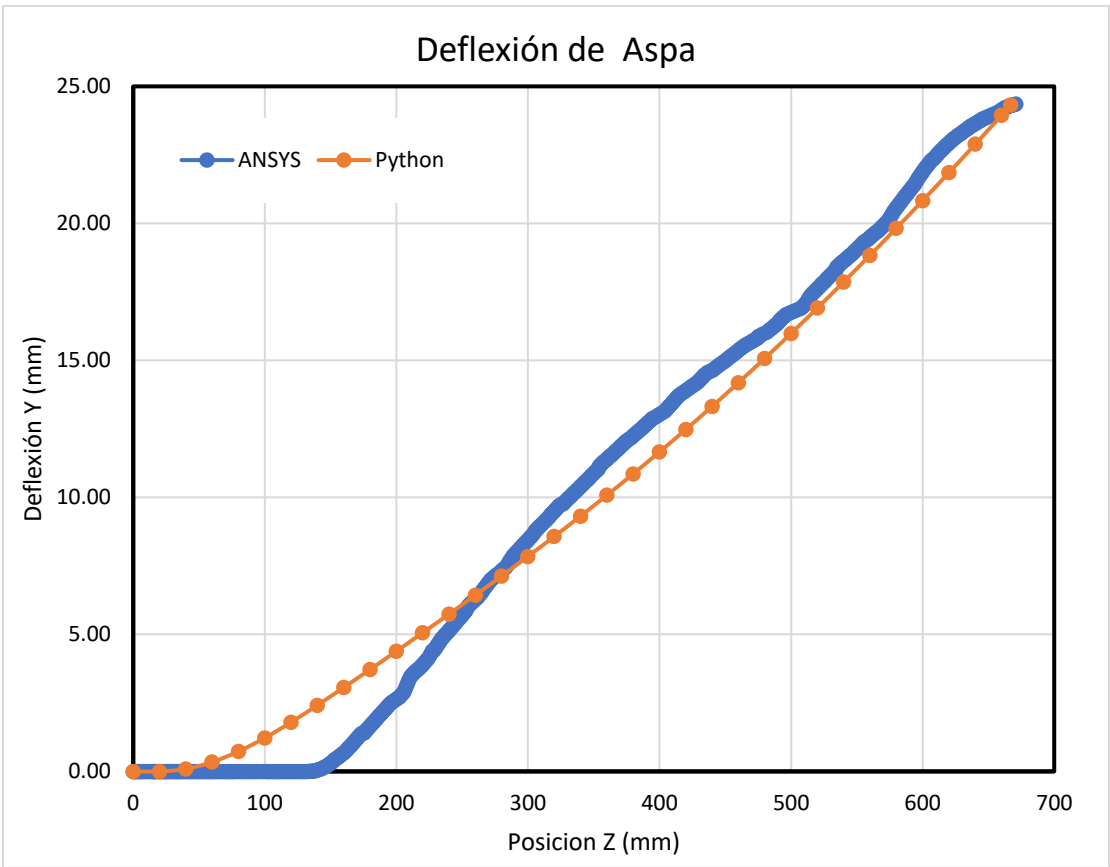


Figura 16: Comparación de la curva de deflexión a lo largo del aspa.

Los resultados muestran una excelente coincidencia entre el modelo de viga simplificado u la simulación de referencia en ANSYS. Con una diferencia de 3.56 % en la predicción de la deflexión máxima, se valida la hipótesis de que el modelo viga es capaz de capturar con alta precisión la deflexión del aspa, la Figura 16 también revela que ambos modelos predicen una deformación muy similar a lo largo de toda la envergadura, lo que refuerza la fiabilidad del enfoque simplificado para análisis preliminares y estudios de optimización.

4.3 Limitaciones del Modelo:

Los resultados han demostrado que el modelo de viga 1D basado en secciones 2D ofrece una predicción muy precisa de la deflexión global para el aspa estudiada. Sin embargo, es fundamental discutir las limitaciones inherentes a este enfoque simplificado, especialmente al considerar su aplicación a geometrías y configuraciones estructurales más complejas.

Efectos Tridimensionales y Geometrías Complejas: La teoría de vigas asume que las secciones transversales permanecen planas después de la deformación (hipótesis de Euler-Bernoulli) o que se deforman de manera predecible (Timoshenko). Esta suposición puede perder validez en regiones con cambios geométricos abruptos, como la transición entre la raíz cilíndrica y el perfil aerodinámico, o en aspas con una curvatura significativa (barrido o *sweep*). En estos casos, los efectos de deformación fuera del plano (alabeo o *warping*) y las concentraciones de esfuerzo locales se vuelven dominantes, y solo un modelo 3D con elementos shell o sólidos puede capturarlos con precisión (Cowper, 1966).

Acoplamiento Elástico y Laminados Complejos: El modelo actual se enfoca principalmente en la flexión. Si bien puede calcular rigideces acopladas como Elxy, su capacidad para predecir comportamientos complejos como el acoplamiento flexión-torsión (bend-twist coupling) es limitada (este fenómeno, a menudo deseado en el diseño de aspas modernas para el control de carga pasivo), aunque existen formulaciones de viga muy sofisticadas, los modelos basados en elementos finitos 2D (shell) o 3D (sólidos) capturan de forma inherente y más precisa los complejos acoplamientos elásticos que surgen de la anisotropía del laminado (Hodges, 2007).

Análisis de Falla e Inestabilidad Estructural: Como se mencionó anteriormente, el modelo de viga no proporciona una distribución detallada de esfuerzos a través del espesor del laminado, lo que impide la aplicación directa de criterios de falla para materiales compuestos. Además, es incapaz de predecir modos de falla por inestabilidad, como el pandeo local (buckling) de los paneles delgados que conforman la piel del aspa. El análisis de estos modos de falla requiere un modelado a nivel de placa o shell, donde se considera la geometría bidimensional del panel y la distribución de esfuerzos en el plano (Daniel & Ishai, 2006).

En resumen, aunque el modelo de viga 1D es una herramienta excepcional para el diseño preliminar, la optimización de la rigidez global y la evaluación rápida de conceptos, su uso debe complementarse con modelos de alta fidelidad para la verificación final del diseño, el análisis de resistencia detallado y la evaluación de geometrías estructuralmente complejas.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha desarrollado y validado un modelo numérico simplificado, basado en la teoría de vigas y el análisis de secciones 2D, para predecir el comportamiento a flexión de un aspa de material compuesto. El objetivo era comparar la precisión y eficiencia de este enfoque frente a una simulación de alta fidelidad con elementos finitos (FEM) de tipo shell en ANSYS. El estudio demostró que es posible obtener una aproximación fiable de la respuesta estructural global con un costo computacional significativamente reducido.

El principal hallazgo cuantitativo del estudio es la excelente concordancia en los resultados de deflexión. El modelo de viga 1D predijo una deflexión máxima en la punta del aspa de 23.5 mm, lo que representa una diferencia de solo un 3.56 % en comparación con el valor de 24.37 mm obtenido en la simulación de referencia de ANSYS. Además, la comparación gráfica de las curvas de deformación a lo largo de la envergadura confirmó que el modelo simplificado captura la respuesta estructural global con gran precisión. La contribución principal de este trabajo es, por tanto, la validación de una herramienta de análisis rápida y eficiente, ideal para las etapas tempranas de diseño y para procesos de optimización donde se deben evaluar numerosas configuraciones de laminado.

A pesar de su eficacia para predecir la deflexión global, es importante reconocer las limitaciones del modelo de viga. Este enfoque no permite capturar fenómenos locales como concentraciones de esfuerzo en zonas de cambio geométrico abrupto, ni puede utilizarse para análisis de falla detallados o la predicción de inestabilidades estructurales como el pandeo, para los cuales el modelo 3D sigue siendo indispensable.

Como trabajo futuro, se proponen varias líneas de mejora y expansión. Primero, se podría refinar el modelo de viga para incluir los efectos de la deformación por cortante (teoría de Timoshenko), lo cual podría mejorar la precisión en aspas de mayor espesor. Segundo, se planea realizar un análisis de resistencia detallado utilizando el modelo de ANSYS y criterios de falla para compuestos como Tsai-Wu o Hashin. Finalmente, la validación experimental de los resultados numéricos mediante ensayos en un prototipo del aspa sería el paso definitivo para confirmar la fiabilidad de ambos modelos.

Referencias

Blasques, J. P. A. A., Bitsche, R., Fedorov, V., & Eder, M. A. (2013). Applications of the BEam Cross section Analysis Software (BECAS). In *Proceedings of the 26th Nordic Seminar on Computational Mechanics* (pp. 46-49).

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Cowper, G. R. (1966). The shear coefficient in Timoshenko's beam theory. *Journal of Applied Mechanics*, 33(2), 335-340. <https://doi.org/10.1115/1.3625046>

Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering mechanics of composite materials* (2nd ed.). Oxford University Press.

Hodges, D. H. (2007). A review of composite rotor blade modeling. *AIAA Journal*, 45(11), 2581-2590. <https://doi.org/10.2514/1.31293>

Análisis Comparativo Entre Un Modelo Numérico De Viga Basado En Sección 2d Y Una Simulación Por Método FEM 3d De Una Pala Compuesta Bajo Cargas De Flexión

Kollár, L. P., & Springer, G. S. (2003). *Mechanics of composite structures*. Cambridge University Press.

León-Muñoz, G. de J. (2018). *Design and analysis of a hybrid composite material blade for a hydrokinetic turbine* [Tesis de maestría, Fachhochschule Aachen y Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial].

Oden, J. T., & Ripperger, E. A. (1981). *Mechanics of elastic structures* (2nd ed.). Hemisphere Publishing.

Reddy, J. N. (2019). *An introduction to the finite element method* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Roark, R. J., & Young, W. C. (2020). *Roark's formulas for stress and strain* (9th ed.). McGraw-Hill.

Shakya, P., Sunny, M. R., & Maiti, D. K. (2019). A parametric study of flutter behavior of a composite wind turbine blade with bend-twist coupling. *Composite Structures*, 207, 764–775. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.064>

Vlasov, V. Z. (1961). *Thin-walled elastic beams*. National Science Foundation.

Wang, L., Liu, X., Guo, L., Renevier, N., & Stables, M. (2014). A mathematical model for calculating cross-sectional properties of modern wind turbine composite blades. *Renewable Energy*, 64, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.029>

Rubio-González, C., José-Trujillo, E., Rodríguez-González, J. A., Alvarez-Zeferino, J. C., & Manzo-Preciado, J. A. (2022). Strain self-sensing capability of a tidal turbine blade fabricated of PU-foam/glass fiber/epoxy composites using MWCNTs. *Journal of Composite Materials*, 42(7–8), 1883–1897. <https://doi.org/10.1177/07316844221127637>

Weisstein, E. W. (n.d.). Polygon area. *MathWorld--A Wolfram Web Resource*. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <https://mathworld.wolfram.com/PolygonArea.html>

Aplicaciones De Redes Generativas Antagónicas En Manufactura Inteligente: Una Revisión Corta

Jesús Miguel Ángel Rodríguez Mendoza¹, Guillermo Ronquillo Lomeli¹ y Ángel Iván García Moreno¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la Cuesta 702, 76125 Querétaro, México
jm.rodriguezm@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. La manufactura es un proceso industrial que exige calidad, eficiencia y capacidad de adaptación ante productos variados y conjuntos de datos limitados. Esta revisión analiza el uso de Redes Generativas Antagónicas (GANs) en cuatro ámbitos prácticos: inspección y detección de defectos, control, gemelos digitales, y aumento de datos. A partir de una revisión bibliográfica en repositorios académicos y técnicos se identificaron trabajos que emplean GANs para generar muestras sintéticas que entrenan detectores, simular fallos poco frecuentes y enriquecer escenarios de simulación. Entre las limitaciones recurrentes se encuentran la brecha entre datos sintéticos y reales, la necesidad de manipulación manual de muestras, el coste computacional y la falta de reportes estadísticos que aseguren reproducibilidad. Como medidas prácticas para su adopción se proponen trazabilidad de los datos generados, criterios automáticos de filtrado, evaluación estadística de estabilidad y pruebas de generalización entre plantas o fabricantes.

Palabras Clave. Redes Generativas Antagónicas, manufactura inteligente, inspección visual, detección de defectos, aumento de datos, gemelos digitales.

1. Introducción

La manufactura inteligente se ha transformado de manera significativa en la última década debido a la convergencia de la automatización, el Internet de las Cosas (IoT), sistemas ciberfísicos y las técnicas de inteligencia artificial. Dentro de este ecosistema, las redes generativas antagónicas (GANs) han emergido como herramientas con un potencial práctico considerable. Una GAN se define como una arquitectura de aprendizaje profundo compuesta por dos redes neuronales en competencia: un generador, cuya función es producir datos sintéticos, y un discriminador, encargado de distinguir entre muestras reales y generadas. A través de un proceso de entrenamiento adversarial, ambas redes se optimizan mutuamente hasta lograr la generación de datos sintéticos con un alto grado de verosimilitud.

Más allá de su capacidad para producir imágenes sintéticas de alta fidelidad, las GANs ofrecen soluciones a problemáticas concretas en el ámbito industrial: suplir la escasez de datos mediante aumento sintético; simular modos de fallo poco frecuentes para entrenar detectores; adaptar modelos entre dominios mediante traducción imagen-a-imagen; enriquecer gemelos digitales con variaciones realistas; y crear bases de datos balanceadas que mejoran el rendimiento de detectores y segmentadores. Estas aplicaciones encajan de forma natural en los flujos productivos contemporáneos, donde la inspección visual automatizada, la monitorización de procesos y la toma de decisiones guiada por datos demandan modelos robustos frente a variaciones de producto, condiciones de iluminación y rareza de defectos.

En el flujo típico de una planta industrial moderna, los pasos se organizan desde la adquisición de señales e imágenes (cámaras, sensores de vibración, termografía, escáneres) y su ingestión en un sistema de ingestión, gestión y etiquetado de datos, hasta el preprocesado, el entrenamiento y la inferencia de modelos, la validación humana y la retroalimentación a sistemas de ejecución de manufactura y autómatas, como los controladores lógicos programables. A esta cadena se integran además subsistemas de robótica industrial (controladores de robots, controladores de servomotores, planificadores de trayectoria) y el área de control de planta (desde la regulación local tipo PID hasta controles predictivos por modelo), que ejecutan decisiones en lazo cerrado sobre actuadores y manipuladores.

Las GANs tienen cabida fundamentalmente en tres puntos de ese flujo. En la fase de datos, generan ejemplos sintéticos que enriquecen conjuntos de entrenamiento y facilitan la detección de anomalías poco frecuentes. En la fase de simulación y gemelo digital, producen variantes realistas que permiten evaluar y ajustar estrategias de control, planificación y coordinación multi-robot antes de intervenir la línea de producción. En la etapa de control y robótica, facilitan la generación de señales sensoriales y trayectorias sintéticas (imágenes, nubes de puntos, perfiles de fuerza/torque, secuencias hápticas) que sirven para entrenar políticas de control (mediante aprendizaje por imitación o por refuerzo) y para la transferencia simulación–real mediante técnicas de adaptación y aleatorización del dominio. Así, las GANs permiten no solo mejorar detectores y segmentadores, sino también: entrenar y robustecer controladores basados en visión y en sensores múltiples frente a variabilidad y ruido; simular perturbaciones y modos de fallo raros para validar la estabilidad y el desempeño de reguladores y planificadores; y generar escenarios adversariales que estresen estrategias de supervisión y seguridad antes de su despliegue físico.

La atención creciente en el tema se refleja en varias revisiones recientes que sintetizan avances, limitaciones y direcciones futuras. Kotholliparambil Haridasan y Jawale (2024) presentan un panorama general de innovaciones y retos de la inteligencia generativa en manufactura, He (2024) se centra en modelos generativos para inspección superficial, Alfaro-Viquez (2025) y Li y Yang (2025) analizan la integración de gemelos digitales con capacidades de inteligencia embebida, Lee y Ko (2025) revisan aplicaciones de aprendizaje generativo en control adaptativo de procesos dinámicos y Eshaghi Chaleshtori (2023) compila técnicas de fusión de datos para diagnóstico industrial. Estas revisiones evidencian la rápida expansión del campo, la diversidad de arquitecturas y dominios de aplicación y la urgencia de estandarizar métricas y protocolos de validación para facilitar la transferencia de resultados académicos a entornos productivos.

En la capa de modelos, las señales generadas reducen el sesgo por clases mayoritarias y aceleran la convergencia de detectores. Combinadas con técnicas de condicionamiento (por clase, por geometría, por propiedades físicas), las GANs facilitan la generación dirigida de muestras que reflejan escenarios de interés operativo. Para la robótica, esto se traduce en conjuntos de datos sintéticos con variaciones de iluminación, oclusión y deformación de piezas, así como perfiles dinámicos útiles para afinar seguimiento de trayectoria, control de agarre y políticas de manipulación; además generan trayectorias y comportamientos de agentes que sirven como demostraciones para aprendizaje por imitación.

La integración de GANs en entornos productivos exige, no obstante, un enfoque pragmático. Desde la ingeniería, es necesario garantizar la trazabilidad de las muestras sintéticas (metadatos que indiquen origen, condiciones de generación y versión del modelo), establecer métricas

objetivas de calidad de generación (por ejemplo, la distancia de Fréchet entre representaciones para imágenes) y aplicar métricas específicas de control, como el error cuadrático medio de seguimiento, el margen de estabilidad o la tasa de fallos en escenarios generados. Es preciso además definir criterios automáticos de filtrado que impidan la introducción de artefactos que degraden detectores o controladores.

Operativamente, las soluciones deben contemplar validación por parte de los operarios y pruebas con hardware en el bucle y con software en el bucle; pipelines formales para la puesta en producción y operación de modelos que incluyan versionado de datos y modelos; despliegue en equipos locales cercanos a la planta cuando la latencia lo requiera; y procedimientos continuos de supervisión para detectar deriva de dominio o degradación del rendimiento de control. A nivel organizacional, la adopción exige coordinación entre los equipos de producción, calidad, tecnología de la información, ciencia de datos y automatización y robótica, así como consideración de aspectos regulatorios, de seguridad funcional y de confianza en los sistemas que, en última instancia, condicionan la aceptación o rechazo de piezas y la intervención de robots en lazo cerrado.

Tanto por sus beneficios (reducción del coste en etiquetado, manejo de rarezas y mejora de la robustez de detectores y políticas de control), como por sus riesgos (brechas entre lo sintético y lo real, coste computacional, necesidad de curación de datos y aparición de falsos positivos en pruebas de control), las GANs se presentan como una tecnología de apoyo que complementa, y no sustituye, las prácticas tradicionales de ingeniería de calidad, validación y control. Su incorporación exige garantías de trazabilidad, métricas objetivas de calidad y procesos de verificación (incluida la validación por operarios y las pruebas con hardware en el bucle) para que las muestras sintéticas aporten valor real y no induzcan sesgos operativos. Esta revisión recopila trabajos representativos que exploran cuatro ámbitos con alto impacto en la manufactura inteligente: inspección y detección de defectos; control y robótica (incluyendo pruebas con hardware en el bucle y transferencia simulación–real); gemelos digitales; y aumento de datos para el entrenamiento de detectores, segmentadores y políticas de control y manipulación robótica.

2. Materiales y Métodos

Para la elaboración de esta revisión, se llevó a cabo una búsqueda destinada a identificar estudios relevantes sobre la aplicación de redes generativas antagónicas en manufactura inteligente. Las consultas se ejecutaron en bases de datos consolidadas (SpringerLink, arXiv, IEEE Xplore, Elsevier/ScienceDirect, Google Scholar y Web of Science) empleando combinaciones de los términos "Generative Adversarial Networks" o "GAN" junto con palabras clave relacionadas con el dominio industrial: "manufacturing", "manufacturing intelligence", "industrial inspection", "anomaly detection", "surface inspection", "defect synthesis", "data augmentation", "digital twin", "predictive maintenance" y "process control". Se consideró la ventana temporal 2014–2025 con el fin de cubrir desde la aparición de las GANs hasta avances recientes aplicables a entornos productivos. Inicialmente se recuperaron trabajos que mencionaban explícitamente el uso de GANs en problemas industriales y, a continuación, se filtraron por título y resumen para eliminar estudios tangenciales.

De los trabajos preliminares se aplicaron criterios de elegibilidad para la selección final. Se priorizaron artículos que presentaran resultados experimentales cuantitativos, aplicaciones prácticas en entornos de fabricación o marcos metodológicos con implicaciones operativas. Se

excluyeron contribuciones que se centraran en tecnologías distintas a las GANs sin discutir su integración con generación adversaria, que no estuvieran disponibles en inglés, o que carecieran de suficiente detalle metodológico para reproducir o evaluar los resultados. Con la intención de cubrir áreas complementarias dentro de la manufactura inteligente se seleccionaron cuatro artículos representativos, uno por cada área de interés: supervisión y detección de defectos, aumento de datos, gemelos digitales y control y automatización.

Cada uno de los artículos elegidos fue analizado siguiendo un protocolo homogéneo. Este protocolo contempló la descripción del objetivo y alcance del estudio, la arquitectura y diseño del generador y del discriminador, las estrategias de condicionamiento o de inserción de contexto cuando procedía (por ejemplo condicionamiento por clase, por ubicación o por propiedades físicas), el procedimiento para integrar muestras sintéticas en imágenes reales, los conjuntos de datos empleados con su origen y tamaño, el preprocesado y normalización de datos, los parámetros de entrenamiento reportados como optimizador, tasas de aprendizaje, número de épocas y tamaño de lote, la infraestructura computacional declarada incluyendo GPUs o CPUs y tiempos aproximados cuando estaban disponibles, las métricas de evaluación utilizadas por ejemplo AUC, mAP, IoU, pixel-AUROC, F1, FID o IS cuando era aplicable, y la disponibilidad de código o modelos para reproducibilidad.

3. Resultados

Para este trabajo se consultaron un total de 20 artículos con aplicaciones de GANs, distribuidos en cuatro categorías temáticas de la manufactura inteligente: aumento de datos (5 trabajos), detección de fallas (6 trabajos), robótica y control (4 trabajos) y gemelos digitales (5 trabajos).

La clasificación de cada artículo se realizó con base en el uso específico de la GAN. Es decir, aunque un estudio pudiera estar vinculado a un dominio diferente (por ejemplo, detección de fallas), si el rol de la GAN se limitaba al aumento de datos, este fue categorizado dentro de dicha área. En el caso de los gemelos digitales, se optó por categorizarlos como tales aun cuando involucraran elementos de las demás áreas. Esto se decidió por dos razones principales: primero, los gemelos digitales suelen integrar de manera natural aspectos de aumento de datos, detección de fallas y control/robótica; segundo, pese a no ser un campo enteramente reciente, el uso de GANs en este ámbito no ha sido tan explorado ni profundizado como en las otras áreas mencionadas. La Tabla 1 resume estos trabajos.

Tabla 1 Revisión del estado del arte

1. Referencia	2. Arquitectura	3. Dataset	4. Aplicación	5. Resultados clave
6. Zhang, G et al., 2021	7. Defect-GAN	8. CODEBRIM; 50,000 imágenes; 6 clases no excluyentes 128×128px	9. Detección de fallas	10. FID StackGAN++: 111.1 CycleGAN: 94.5 Defect-GAN (propuesto): 65.6 Ideal: 25.0

1.Guo, Y et al., 2022	12.ISU-GAN	13.DAGM2007 1000 imágenes en escalas de grises; 512×512 px; 10 clases (3 usadas)	4.Detección de fallas	15.Precisión: 16.vs. ResNet++: Aumentó 0.41% 17.vs. U-Net: Aumentó 2.84%
18.Chen, L et al., 2022	19.DAGAN	20.DS2OS 357,952 muestras de ICS 7 clases SWaT 946,722 muestras de ICS 4 clases	1.Detección de fallas	22.Precisión: >95%
23.Zhang, L et al., 2023	24.Encoder– Decoder GAN basado en AFF	25.MVTec 5354 imágenes a color; 700×700 px a 1024×1024 15 clases	6.Detección de fallas	27.AUC promedio ≈ 94.3%
28.Deng, F et al., 2024	29.DG2GAN	30.CrackForest 118 imágenes a color; 480×320 px MVTec 5354 imágenes a color; 700×700 px a 1024×1024 15 clases	1.Detección de fallas	32.Precisión: Aumentó: De 86.9% a 94.6% y 59.8% a 80.2% respectivamente
33.Kim, T et al., 2025	34.FS-GAN	35.Kolektor Surface- Defect; 36.399 imágenes (52 con defectos, el resto sin defectos); 500×(1240 a 1270) px;	7.Detección de fallas	38.mAP incrementó más de 10.5% AR incrementó 9.5%
39.Jain et al., 2022	40.DCGAN, ACGAN InfoGAN	41.NEU 1,800 imágenes en escala de grises; 200×200 px; 6 clases de defectos en “laminado en caliente”	42.Aumento de datos	43.Precisión Tradicional = 90.28% 44.DCGAN = 95.78% ACGAN = 92.78% 45.InfoGAN = 94.86%

46. Wang, C et al., 2023	47. cTransGAN	48. 2,544 imágenes de PCBs; 3 clases; 418×418 px <i>DeepPCB</i> 1,500 imágenes de PCBs 7 clases; 16k×16k px (640×640 recortadas) 49.	50. Aumento de datos	51. mAP = 96.2%
52. He, X et al., 2022	53. DG-GAN	54. NEU 1,800 imágenes en escala de grises; 200×200 px; 6 clases de defectos en “laminado en caliente” <i>IP-def</i> 400 imágenes de daños en aislamientos; 512×512 px 4 clases	55. Aumento de datos	56. Comparado con YOLOX <i>FID</i> Se redujo en promedio: 16.17 y 20.06 <i>Precisión</i> Aumentó: De 72.1% a 78.2% y 75.2% a 95.6% respectivamente
57. Ghosh, S et al., 2024	58. DCGAN WGAN-GP SNGAN	59. SegPCBX Imágenes de rayos X de PCBs; 60.6 clases	61. Aumento de datos	62. <i>Precisión</i> Mejor: 82.04%
63. Huang, J et al., 2025	64. GAN no especificada	65. 1,386 imágenes de PCBs 6 clases	66. Aumento de datos	7. mAP = 0.49 (general)
68. Ren, H et al., 2020	69. CGAN, LSGAN, BiGAN, DualGAN	70. Configuraciones de robots MICO (3 DoF); ≈60,000 muestras; 5 trayectorias para entrenamiento;	71. Control/ Robótica	72. <i>Precisión</i> MICO IK: RMSE (mejor) ≈ 0.09 ID: Baseline 0.14 Nm vs GANs ≈ 0.22 Nm

		Fetch (8 DoF); ≈60,000 muestras; 1 trayectoria. para entrenamiento		Fetch IK: DualGAN 0.91 vs baseline 0.89 ID: GAN 12.67 vs baseline 12.92
3.Lembono, T et al., 2021	74.GAN	5.Configuraciones de robots Talos (28 DoF) y Panda (7 DoF); 25,000 muestras por robot	76.Control/ Robótica	77.Precisión 78.Panda(Aumentó) 9.Proyección: 98.6% a 100.0% 9. IK: 76.4% a 88.6% 81.Talos(Aumentó) 2.Proyección: 84.4% a 100.0% 3. IK: 82.6% a 100.0% 84.
5.Kushwaha, V et al., 2023	86.Pix2Pix	87.Cornell Grasping 885 Imágenes 280 Clases	88.Control/ Robótica	89.Precisión Incrementada hasta 87.79%
90.Wang, Y et al., 2024	91.GAN-RRT	2.100 mapas (324×257 px); 75 escenarios entrenamiento / 25 de prueba; Rutas demo generadas por voluntarios; Experimento real con robot Xiaopang y 30 participantes	93.Control/ Robótica	94.Homotopía RRT* 75% → NN-RRT 90% → GAN-RRT 94% Likert RRT* 3.36; NN-RRT 3.6; GAN-RRT 4.18
95.Zotov, E et al., 2020	96.CycleStyleGAN	97.40,000 vectores de simulaciones	98.Gemelos digitales	99.Visual
0.Tao, Z et al., 2023	101.GAN	102.Mensajes de señalización y pares estado-acción	103.Gemelos digitales	104.Converge más rápido en las primeras miles de iteraciones

5.Mu, H et al., 2024	06.VQVAE-GAN	107.Vector de condiciones	08.Gemelos digitales	109.RMSE <0.9
0.Muhammad, K. et al., 2024	111.GAN	12.Simulaciones en nube; gemelo digital de red 6G simulado	13.Gemelos digitales	4.Latencia: 100 ms → 70 ms Utilización de banda: 75% → 90% Tasa de error: 5% → 1.5% Precisión predictiva: 80% → 95% Escenarios (selección): 120 ms → 80 ms; Recuperación (fallo): 300 s → 100 s; Detección (ataque): 60 s → 15 s
15.Wang, Q et al., 2025	116.PCGAN	7.Valores de sensores de boiler industrial (Zhejiang); 6 clases; ≈50 muestras; Datos sintéticos generados (ampliación hasta 240)	8.Gemelos digitales	119.Precisión PCGAN 96.28% (mejor).

Detección de fallas

En una planta de manufactura, la detección de fallas o anomalías es una pieza crítica del aseguramiento de la calidad y de la continuidad operacional, ya que permite identificar piezas defectuosas, degradaciones incipientes y modos de fallo antes de que provoquen paros costosos o productos fuera de especificación. Tradicionalmente esto se aborda con inspección humana, reglas basadas en umbrales de sensores o modelos de clasificación entrenados con ejemplos etiquetados; sin embargo, muchas fallas son raras, heterogéneas y costosas de etiquetar, lo que limita la efectividad de enfoques convencionales.

Para abordar esa escasez y heterogeneidad de datos, las propuestas con redes generativas antagónicas han seguido vías complementarias aplicadas a conjuntos concretos. Defect-GAN se orienta a la síntesis realista de defectos para alimentar la inspección automática sobre CODEBRIM, un conjunto de imágenes de puentes de hormigón con anotaciones de defectos (Zhang et al., 2021).

ISU-GAN incorpora módulos de atención y refinamiento para mejorar la localización en superficies con texturas, usando el conjunto de datos DAGM, pensado precisamente para detección de defectos en texturas industriales (Guo et al., 2022). En el dominio de señales y control, DAGAN aplica la idea a series temporales y flujos de control, con foco en escenarios de servicios en la nube e Internet industrial, como DS2OS o SWaT, donde la aplicación busca proteger sistemas frente a anomalías y ataques en tiempo real (Chen et al., 2022). Para visión industrial general, arquitecturas codificador-decodificador con enfoque por atención mejoran la reconstrucción y la segmentación en conjuntos de referencias como MVTec, un banco de pruebas para inspección visual con múltiples clases de fallo (Zhang et al., 2023). Cuando el objetivo son defectos finos en superficies, DG2GAN genera variantes de grietas y texturas, por ejemplo sobre CrackForest, con la intención de aumentar la sensibilidad de detectores ante defectos estructurales muy pequeños (Deng et al., 2024). Finalmente, en entornos con pocas muestras y alta resolución, FS-GAN atiende conjuntos reducidos como Kolektor Surface-Defect para equilibrar clases y mejorar métricas de detección en condiciones reales de planta (Kim et al., 2025).

A pesar de los resultados prometedores, la narrativa general muestra también limitaciones recurrentes que condicionan su adopción industrial: la generación sintética puede introducir sesgos o falsos positivos si no se controla la calidad de las muestras, distintos estudios reportan mejoras basadas en ejecuciones aisladas sin intervalos estadísticos ni múltiples semillas, lo que dificulta evaluar estabilidad.

Anomaly Detection of GAN Industrial Image Based on Attention Feature Fusion

Este trabajo introduce un método no supervisado de detección de anomalías para imágenes industriales que combina un GAN codificador-decodificador con un módulo de Fusión de Características con Atención (AFF, por sus siglas en inglés) y una técnica de aumento de datos tipo *CutPaste* para detectar y localizar defectos en MVTec sin necesidad de entrenar con ejemplos anómalos. La motivación es práctica y bien justificada: la inspección industrial sufre de escasez de muestras de anomalías, alta variabilidad de defectos y un costoso etiquetado, por lo que un GAN basado en reconstrucción que aprende la apariencia normal y marca anomalías mediante residuales resulta apropiado.

Metodológicamente, los autores amplían un generador tipo U-Net/Skip-GANomaly fusionando mapas de características correspondientes del codificador y el decodificador a través de AFF, donde un módulo de atención de canal multi-escala (MS-CAM) construye un mapa de atención a partir de ramas globales (GAP a convoluciones punto a punto a BN a ReLU) y locales, y fusiona características como $Z = X * M(F) + Y * (1 - M(F))$ $Z = X * M(F) + Y(1 - M(F))$. El entrenamiento aplica recortes rectangulares aleatorios con pegado (*cut-and-paste*) (proporción de área 0.02–0.15, con rotación y variación de color opcionales) para simular anomalías.

El modelo optimiza una suma ponderada de pérdida adversaria, pérdida de reconstrucción $L_1(W_{rec} = 40)$ y una pérdida latente L_1 calculada sobre las últimas características convolucionales del discriminador ($W_{adv} = 1, W_{lat} = 1$) y puntúa anomalías con:

$$A(x) = g * L_{rec} + (1 - g) * L_{lat} \quad (1)$$

Normalizada en $[0,1]$. La validación usa el conjunto de datos MVTec AD (15 clases) y reporta AUC de ROC a nivel de imagen como métrica principal, acompañada de mapas de calor residuales cualitativos para localización a nivel de píxel; el artículo informa un AUC promedio $\approx 94.3\%$ (texturas $\approx 97.4\%$, objetos $\approx 92.7\%$) y afirma una mejora de $\sim 4.1\text{--}4.2$ puntos porcentuales sobre el mejor método previo.

Las fortalezas del trabajo incluyen una combinación sensata de fusión basada en atención y aumentación realista, comparaciones empíricas exhaustivas y visualizaciones útiles que indican una mejor reconstrucción y localización. Las debilidades importantes que limitan la reproducibilidad y la solidez de las afirmaciones son la subespecificación de detalles críticos de implementación (número exacto de capas/canales, factor de reducción C_r en MS-CAM, diseño preciso de la rama local de convolución, valor numérico de g , inicialización y semillas aleatorias), ausencia de incertidumbre estadística (sin media $\pm$ desviación estándar sobre múltiples corridas), falta de métricas cuantitativas de localización por píxel (pixel-AUROC, IoU, F1, PRO), y dudas sobre la equidad de las comparaciones cuando los números base provienen de fuentes heterogéneas. Aspectos prácticos de despliegue, como tiempo de entrenamiento real e inferencia, también se omiten.

Las recomendaciones accionables son publicar la arquitectura completa capa por capa y tablas de hiperparámetros (incluyendo g y C_r), liberar código/configuraciones y semillas aleatorias, reportar resultados por clase con media y desviación estándar en múltiples corridas, añadir métricas cuantitativas de localización y curvas PR/ROC, proveer análisis de sensibilidad para W_{rec} y g , aclarar la implementación de la rama local de MS-CAM (convolución espacial vs punto a punto/profundidad), y reportar tiempos de ejecución y uso de memoria; experimentos adicionales que fortalecerían el artículo incluyen pruebas en otros conjuntos de anomalías industriales (BTAD, Kolektor), comparaciones con atención combinada canal+espacial o basada en *transformers*, y estudios de robustez/calibración para las puntuaciones de anomalías.

Aumento de datos

En manufactura, el aumento de datos busca resolver problemas prácticos frecuentes: clases extremadamente raras (defectos poco frecuentes), falta de acceso a muchos escenarios reales por coste o seguridad, y la necesidad de crear sets balanceados que permitan entrenar detectores modernos sin sesgos de clase. Más allá del mero “relleno” de conjunto de datos, el aumento sintético debe producir muestras que respeten la variabilidad física y contextual de las piezas (escala, iluminación, textura, posición) para que los modelos aprendan patrones robustos y no atajos espurios.

Para mitigar la escasez y el desbalance de clases, la investigación ha avanzado desde GANs clásicas hacia soluciones condicionadas y específicas por modalidad. Estudios que comparan arquitecturas tradicionales muestran que los generadores simples siguen siendo efectivos para ampliar conjuntos ópticos y mejorar detectores en escenarios estándar (Jain et al., 2022). A partir de ahí, aparecen propuestas que añaden condicionamiento y mecanismos de atención para conservar coherencia semántica al reinsertar parches generados en placas y componentes reales, lo que facilita su uso en inspección de circuitos impresos (Wang et al., 2023). Otros trabajos se centran en aumentar la fidelidad y diversidad de defectos finos, como grietas o fallas estructurales, mediante arquitecturas diseñadas para preservar textura y detalle (He et al., 2023). La síntesis también ha

mostrado utilidad en modalidades distintas a la imagen visible: por ejemplo, la generación para radiografías de placas permite entrenar detectores en condiciones no ópticas (Ghosh et al., 2024). Al mismo tiempo, estudios en conjuntos pequeños y alta resolución ponen de manifiesto que la ganancia depende mucho de la calidad del conjunto y del protocolo de evaluación (Huang et al., 2025). Por tanto, la trayectoria de la literatura va desde la ampliación genérica hasta técnicas condicionadas y por modalidad, y subraya que el éxito práctico exige cuidado en el diseño del generador, en el condicionamiento de la síntesis y en la validación experimental.

No obstante, el valor real del aumento sintético en planta depende fuertemente de controles metodológicos que no siempre están presentes en los trabajos publicados: existe riesgo de que las muestras generadas que no coinciden con variaciones de manufactura reales, sesgos por filtrado manual de parches sintéticos, ausencia de métricas cuantitativas de calidad del generador, y reportes experimentales basados en una sola corrida sin medias ni desviaciones que permitan juzgar estabilidad. Además, para aplicaciones industriales es crucial documentar tiempos de generación, memoria e impacto en inferencia y despliegue. Por ello, las recomendaciones prácticas que emergen de la revisión son claras: reportar métricas de calidad de generación y diversidad además de las métricas de tarea ejecutar múltiples semillas y reportar intervalos de confianza, automatizar el cribado de muestras sintéticas, y evaluar la generalización antes de confiar la técnica en producción.

Conditional TransGAN-Based Data Augmentation for PCB Electronic Component Inspection

Este trabajo presenta un método llamado TransGAN condicional (cTransGAN) para la aumentación de datos orientada al reconocimiento de componentes electrónicos en PCBs y a la detección de defectos, con el objetivo de aumentar la cantidad y diversidad del conjunto de entrenamiento y así mejorar el rendimiento en la detección de objetos pequeños y de difícil visualización en placas. La motivación está fundamentada en que la inspección de PCBs padece de pocas muestras etiquetadas, objetos de tamaño minúsculo, fondos complejos y fuerte desbalance de clases, por lo que generar parches sintéticos condicionados por clase para enriquecer los datos de entrenamiento es una dirección práctica y sensata. Se construye la cTransGAN combinando la arquitectura puramente basada en Transformers de TransGAN para generador y discriminador con embebidos de clase extraídos de un discriminador tratado como clasificador; estos embebidos aprendidos, en lugar de etiquetas *one-hot*, se concatenan a las entradas del generador y del discriminador para que la red produzca muestras condicionadas en la clase objetivo. El modelo de aumentación de datos deforma y reescala parches anotados, los usa para entrenar cTransGAN y luego vuelve a insertar los parches generados en imágenes reales de PCB para producir imágenes aumentadas completamente anotadas para entrenar detectores. La validación se hizo en dos conjuntos de datos, un conjunto propio de PCB con tres clases (optoacoplador, capacitor y diodo) y el conjunto público DeepPCB de defectos, y se evaluaron tres detectores (Faster R-CNN con ResNet101, YOLOv3 con DarkNet-53 y SCNet con ResNet101) bajo varias configuraciones (sin aumentación, aumentación por procesamiento de imagen, TransGAN, cGAN y cTransGAN). Los resultados muestran mejoras constantes con aumentación basada en GANs, siendo cTransGAN frecuentemente la mejor opción: en el conjunto propio SCNet más cTransGAN alcanza aproximadamente 96.2% de mAP y en DeepPCB la mejor configuración reporta alrededor de 98.8% de mAP, comparable o ligeramente superior al estado del arte citado, con mejoras por modelo frente a la línea base típicamente en el rango de 0.7 a 2.7 puntos de mAP según el conjunto de datos.

Las ideas clave son, por un lado, condicionar TransGAN con embebidos de clase aprendidos en lugar de etiquetas simples para captar mejor la semántica de clase, y por otro lado el modelo práctico que regenera e inserta parches específicos de clase en las imágenes originales manteniendo la consistencia de las anotaciones. Entre las fortalezas se cuentan una motivación práctica clara, un diseño razonable que aprovecha la generación basada en Transformers, comparaciones empíricas exhaustivas en varios detectores y conjuntos de datos, y la publicación del código que mejora la reproducibilidad. No obstante, hay limitaciones importantes: faltan detalles de implementación y evaluación, por ejemplo no se reportan métricas cuantitativas de calidad del generador como FID o IS, los criterios de selección o filtrado de parches sintetizados antes de su inserción están poco detallados y los resultados se presentan como mAP de una sola corrida sin incertidumbre estadística (no hay medias ni desviaciones estándar sobre semillas múltiples). También se echa en falta una ablación que aísle claramente el beneficio de los embebidos aprendidos frente a condicionar con etiquetas *one-hot* u otras estrategias simples, existe el riesgo de sesgo por la selección manual de muestras generadas que los autores admiten y que reduce la escalabilidad, y no se reportan tiempos de entrenamiento ni de inferencia ni consumos de memoria, información relevante para despliegues industriales. Adicionalmente, el trabajo ofrece poco análisis de casos de fallo (por ejemplo cuándo los parches sintéticos generan contextos irreales o inducen falsos positivos) y discute de forma incompleta los posibles efectos sobre la generalización a placas y variaciones de manufactura no vistas.

Para mejorar la solidez del estudio convendría reportar métricas de calidad del generador y evaluaciones perceptuales humanas, ejecutar múltiples semillas y reportar medias y desviaciones estándar de mAP para evaluar estabilidad, realizar ablaciones que comparen embebidos aprendidos contra etiquetas *one-hot* o condicionales alternativos, automatizar o cuantificar el paso manual de filtrado de parches usando criterios automáticos como la confianza del discriminador o umbrales de similitud perceptual, medir tiempos y memoria de entrenamiento/inferencia para valorar la practicidad, incluir diagnósticos de localización (precisión por umbrales IoU y curvas AP por clase) y un análisis de errores que muestre modos de fallo comunes, y probar la generalización cruzada (entrenar con aumentación en un tipo de PCB y evaluar en otro) para explorar robustez.

Como extensiones sugerentes se podrían explorar generaciones con conciencia de ubicación y escala para que los parches pegados se integren mejor en el contexto local, comparar cTransGAN con otros modelos generativos condicionales como StyleGAN2-ADA o modelos de difusión condicional en términos de calidad y diversidad, e integrar modelos de anotación automática (supervisión débil o propagación de etiquetas sintéticas) para reducir el cuello de botella de la selección y etiquetado manual. En conjunto, el trabajo ofrece un esquema de aumentación con utilidad práctica que produce ganancias consistentes de mAP en tareas de detección en PCBs y aporta la idea interesante de condicionar TransGAN con embebidos de clase aprendidos, aunque se beneficiaría mucho de métricas de calidad de generación más sólidas, reportes estadísticos y ablaciones que aislen el efecto de los embebidos, documentación o automatización del filtrado de muestras y análisis de tiempos y generalización para argumentar mejor su aplicabilidad industrial.

Gemelos Digitales

En los últimos años, los gemelos digitales (digital twins, DT) se han consolidado como una capa estratégica para cerrar el lazo continuo entre lo real y lo virtual en manufactura: permiten simular, predecir y optimizar comportamiento de equipos y procesos antes de actuar sobre la planta. Los

modelos generativos se emplean para enriquecer estos gemelos con escenarios sintéticos realistas: señales de vibración, fallos raros, variaciones de proceso o imágenes de inspección en condiciones extremas que serían costosas o peligrosas de generar en la realidad. Estas capacidades hacen que los DT enriquecidos con IA puedan usarse no sólo para visualización, sino para entrenamiento de detectores, estrés de políticas de control y análisis de sensibilidad de parámetros de proceso.

Para enriquecer los gemelos digitales con escenarios críticos y datos difíciles o peligrosos de obtener en planta, la literatura reciente aporta ejemplos concretos y complementarios. Zotov y colaboradores emplean una variante de *StyleGAN* para reproducir firmas de mecanizado y vibración, con el fin de generar escenarios de fallo que facilitan pruebas de diagnóstico y calibración de sensores (Zotov et al., 2020). Mu y su equipo usan modelos generativos para simular distorsiones en procesos de fabricación aditiva y reportan una reconstrucción con error reducido, lo que evidencia que la síntesis puede producir señales útiles para entrenar y validar modelos de control (Mu et al., 2024). Tao y colegas aplican redes adversarias sobre mensajes de señalización y pares estado acción para acelerar la convergencia en la construcción del gemelo de una red, lo que aporta ventajas en la sincronización de gemelos distribuidos (Tao et al., 2023). Muhammad et al. muestran que integrar generación adversaria en gemelos de red puede mejorar métricas operativas como latencia, utilización de banda, detección de anomalías y tiempos de recuperación ante fallo, lo que ilustra el potencial de estas técnicas a escala de sistema (Muhammad et al., 2024). Un ejemplo aplicado a instrumentación industrial es el trabajo de Wang et al., que combina un generador condicionado y datos reales para ampliar series de sensores en calderas y lograr un diagnóstico con elevada precisión, lo que evidencia la utilidad práctica de la síntesis para tareas críticas de seguridad (Wang et al., 2025).

Los modelos generativos pueden aportar una capa valiosa al diseño y operación de gemelos digitales, reduciendo necesidad de datos reales y enriqueciendo escenarios críticos, pero su adopción industrial exige controles de calidad, optimizaciones computacionales y protocolos claros de validación que aseguren que lo generado aporta valor operativo real y no sólo ganancia aparente en métricas experimentales.

RCT-Twin-GAN Generates Digital Twins of Randomized Control Trials Adapted to Real-world Patients to Enhance their Inference and Application

Este trabajo presenta RCT-Twin-GAN, un modelo basado en GANs tabulares condicionado que busca generar “gemelos digitales” de ensayos clínicos aleatorizados (RCT) adaptados a las distribuciones de covariables observadas en historias clínicas electrónicas (EHR), de modo que los efectos estimados en el RCT puedan trasladarse a poblaciones del mundo real. La motivación es clara: los RCT son el estándar de evidencia, pero frecuentemente subrepresentan grupos clínicamente relevantes, por lo que disponer de una cohorte sintética que combine la estructura de un RCT con las covariables de la población real facilita evaluar la generalidad y estimar efectos en subpoblaciones poco representadas. Metodológicamente, el autor parte de CTGAN y lo adapta en varias direcciones: cambia la función de pérdida hacia MAE para mejorar la generación de variables continuas, permite condicionar simultáneamente en múltiples covariables discretas y continuas usando utilidades de la librería SDV (CPA), entrena sobre 65 covariables extraídas del ensayo TOPCAT y condiciona con distribuciones de 3 445 pacientes EHR de Yale, y explora distintos esquemas de condicionamiento (1, 3, 5, 7, 10 covariables, discretas o continuas). La evaluación combina medidas de similitud multivariante (distancia de Gower), balance de covariables (MASMD),

concordancia de correlaciones (MAD de coeficientes de Spearman y “CorrAcc”) y análisis de supervivencia, mostrando que los RCT-Twin condicionados con covariables de EHR aproximan mejor esas covariables al EHR que el RCT original (por ejemplo MASMD de las 5 covariables condicionadas 0.008 vs 0.63), preservan el mecanismo de aleatorización entre brazos y reproducen el efecto global observado en TOPCAT (razón de oportunidad a 5 años 0.89 en RCT vs 0.85 en RCT-Twin).

Entre las aportaciones novedosas se cuentan la generación dirigida de un RCT sintético condicionado a distribuciones EHR múltiples y mixtas, la adaptación de CTGAN a este contexto tabular clínico y la demostración práctica de que un gemelo RCT puede retener efecto y al mismo tiempo representar mejor a pacientes del mundo real. Las aplicaciones son inmediatas y relevantes: evaluar la generalidad de resultados de RCT a poblaciones hospitalarias, identificar subgrupos para ensayos futuros, apoyar decisiones regulatorias o de política clínica y, en general, servir como herramienta de inferencia causal complementaria en datos del mundo real. Las fortalezas del estudio incluyen un planteamiento metodológico razonado, comparación frente a modelos previos (CTGAN, EHR-M-GAN), uso de múltiples métricas de similitud y la reproducción empírica del efecto del tratamiento. Sus limitaciones importantes son la fuerte dependencia del conjunto de covariables condicionadas debido al coste computacional (los tiempos de generación crecen de forma marcada, p. ej. 947 s para 500 filas con 5 variables discretas frente a 25 610 s con 10 variables continuas), la elección de EHR hospitalario que puede representar un subconjunto más enfermo que la población general, la imposibilidad práctica de condicionar sobre todas las variables por restricción de tiempo, la potencial variabilidad muestral en las distancias observadas y la falta de discusión amplia sobre sensibilidad a la imputación de datos (usando MissForest), al mecanismo de ausencia de datos y a posibles sesgos residuales que afectan la validez causal. Como sugerencias prácticas para fortalecer el estudio se recomiendan, entre otras, validar el enfoque en otros RCT y EHR de distintas instituciones, realizar análisis de sensibilidad a la selección de covariables condicionadas y a la imputación, automatizar la selección óptima de condicionantes, cuantificar incertidumbres mediante re-muestreo o múltiples semillas y reportar esos intervalos, explorar optimizaciones computacionales o generación por fila para reducir tiempos, incorporar métricas adicionales de calidad de generación para datos tabulares y, si el objetivo es inferencia causal, complementar con métodos que controlen la confusión residual o con análisis de heterogeneidad de efectos por subgrupos. En conjunto, RCT-Twin-GAN representa un avance metodológico prometedor para traducir resultados de ensayos a poblaciones reales, pero su utilidad práctica exigirá pruebas adicionales de robustez, eficiencia y generalización.

Control/Automatización

El control y la automatización constituyen el corazón de la manufactura moderna, ya que de ellos depende que los sistemas de producción operen de forma segura, eficiente y estable frente a variaciones de producto, perturbaciones externas y condiciones límite. Los modelos generativos han comenzado a explorarse como apoyo en este dominio, principalmente en dos direcciones: la generación de escenarios sintéticos que permitan entrenar lazos de control más robustos y la creación de representaciones internas que faciliten la adaptación de manipuladores y planificadores de trayectoria sin necesidad de recopilar datos exhaustivos en planta.

La investigación reciente aporta ejemplos que muestran cómo estas técnicas pueden ampliar las capacidades de robots y planificadores. Ren y Ben-Tzvi (2020) demostraron que variantes de GANs pueden aprender la cinemática inversa y la dinámica de manipuladores como

MICO y Fetch, alcanzando desempeños competitivos frente a métodos tradicionales y mostrando que la síntesis puede reducir la dependencia en modelos analíticos. Lembono et al. (2021) extendieron este enfoque hacia configuraciones de robots con múltiples grados de libertad, como Talos y Panda, y evidenciaron que la generación adversaria permite cubrir distribuciones de configuraciones complejas, con mejoras notables en proyección e inversión cinemática. En el ámbito del agarre, Kushwaha et al. (2023) utilizaron Pix2Pix para generar rectángulos de sujeción plausibles en el conjunto Cornell Grasping, lo que permitió elevar la precisión de predicciones de contacto, un aspecto crítico en tareas de manipulación fina. Finalmente, Wang et al. (2024) exploraron la planificación de trayectorias sociales para robots de servicio mediante un esquema GAN-RRT, mostrando que la generación de trayectorias sintéticas puede incrementar tanto la tasa de éxito como la aceptación subjetiva por parte de usuarios humanos en escenarios colaborativos.

Estos avances revelan un potencial claro, pero también subrayan retos abiertos para que la generación adversaria se convierta en un recurso confiable en control y automatización. Las validaciones suelen limitarse a simulación y no siempre se reportan pruebas en lazo cerrado bajo perturbaciones reales. Existe riesgo de que modelos entrenados con datos sintéticos pierdan robustez frente a variaciones físicas no modeladas, como deformaciones o contactos inesperados. La trazabilidad y la reproducibilidad resultan esenciales en contextos industriales, donde la seguridad no puede depender de muestras sintéticas sin validación cruzada. Además, la integración con el lazo de control requiere mecanismos adicionales para traducir lo generado en acciones seguras, ya sea a través de filtros de robustez, validadores físicos o supervisión humana automatizada. Sin embargo, su maduración hacia aplicaciones industriales exige validaciones físicas rigurosas, métricas de estabilidad y protocolos de seguridad que garanticen que lo aprendido por el generador se traduce en comportamientos confiables en planta.

Integrating the Generative Adversarial Network for Decision Making in Reinforcement Learning for Industrial Robot Agents

Este trabajo propone una estrategia para que agentes robóticos aprendidos por refuerzo se adapten a cambios físicos (por ejemplo variaciones de carga) sin necesidad de reentrenamiento completo: primero se entrena un agente con Q-learning para una condición base y se extrae su tabla Q; esa tabla se usa como “imagen” para entrenar un DCGAN que aprende a generar nuevas tablas Q a partir de un vector de ruido, de modo que, variando la media y la desviación del ruido gaussiano, se obtienen Q-tables distintas que se pueden probar en el entorno sin volver a ejecutar Q-learning.

La validación es de tipo piloto en simulación con el entorno CartPole-v1: comparando el agente original ante cambios de masa en carro y pértiga, el uso de Q-tables generadas por la GAN logró aumentar la actuación media por episodio de aproximadamente 52 pasos a alrededor de 297 pasos y en ocasiones alcanzar casi el máximo de 500 pasos, lo que muestra que la idea funciona en este caso de prueba. La innovación radica en tratar Q-tables como objetos generativos (aplicando convoluciones) y en explotar el vector de ruido del generador como palanca para adaptar comportamientos sin reentrenar la política; conceptualmente esto ofrece una vía práctica para reducir costes computacionales y tiempos de puesta a punto ante variaciones de carga en aplicaciones industriales. Sin embargo, el estudio tiene limitaciones claras: la selección del vector de ruido se hace por ensayo y error (looping aleatorio y rechazo de tablas pobres), no existe una función automática que traduzca parámetros físicos (masa, longitud, etc.) al vector de ruido óptimo, los experimentos se limitan a un entorno sencillo y discretizado (CartPole con reducción de dimensión del Q-table), faltan repeticiones estadísticas, mediciones de variabilidad y análisis de robustez frente a ruido o errores de percepción, y no se discuten cuestiones críticas para despliegue

real como seguridad, latencia, consumo de recursos y escalabilidad a espacios de estado/acción continuos o agentes más complejos.

Para avanzar hacia aplicaciones industriales sería conveniente explorar versiones condicionadas (por ejemplo una GAN condicional que reciba parámetros físicos o embebidos del entorno), aprender un mapeo directo desde parámetros del robot al vector de ruido, automatizar la búsqueda óptima mediante optimización bayesiana o aprendizaje por imitación en el espacio del ruido, evaluar en simuladores más realistas y en robots físicos, reportar medias y desviaciones sobre múltiples semillas y escenarios, medir tiempos de generación e inferencia y estudiar la seguridad y estabilidad de las políticas generadas. En conjunto, la propuesta constituye un experimento convincente y de bajo coste computacional conceptual para adaptación rápida de políticas ante cambios de carga, pero requiere desarrollos adicionales, especialmente en automatización del condicionamiento y validación estadística y física antes de considerarse madura para entornos productivos.

4. Discusión

Los estudios analizados muestran que el principal aporte de las GANs en manufactura no radica solo en su capacidad de generar datos sintéticos, sino en cómo estas muestras condicionadas influyen en el desempeño de modelos posteriores y en la reducción de brechas de validación. En inspección visual, los beneficios se evidencian en mejoras de sensibilidad y métricas como mAP, aunque la efectividad real en planta depende más del control de calidad de los datos sintéticos que de la arquitectura empleada. En gemelos digitales, el valor añadido consiste en crear variantes realistas que permiten probar estrategias de planificación y control antes de la implementación física, lo que reduce riesgos operativos y costes de experimentación.

El análisis también revela limitaciones recurrentes. En control y robótica, la transición de simulación a entorno real sigue siendo un punto débil: pocos trabajos reportan protocolos *hardware-in-the-loop* o métricas específicas de transferencia como RMSE de seguimiento, tasas de éxito en manipulación o tiempos de convergencia. En todos los ámbitos se observa escasez de reportes estadísticos robustos, curvas de aprendizaje, pruebas con múltiples semillas o escalamiento de trayectorias, lo que compromete la reproducibilidad. Estas carencias explican por qué resultados prometedores en laboratorio no siempre se trasladan a entornos productivos.

La gobernanza de lo sintético emerge como requisito indispensable. La trazabilidad de cada muestra, incluyendo versión del modelo, parámetros de condicionamiento y metadatos de evaluación, es necesaria para evitar que artefactos degradados contaminen detectores o controladores. Se recomienda combinar validación humana, operarios que determinen la relevancia de fallos, con filtros automáticos basados en la confianza del discriminador o en métricas objetivas, por ejemplo, la distancia de Fréchet en espacios de representación para imágenes o el error cuadrático medio de seguimiento para señales. Este doble nivel de control incrementa la plausibilidad y la utilidad operativa de las muestras.

La comparación con modelos generativos alternativos aporta matices importantes al panorama. Xu y colaboradores (2025) muestra que, en la tarea concreta de generación para placas de circuito impreso con condicionamiento geométrico, los modelos de difusión condicionada, *ControlNet* y una variante de *Stable Diffusion*, alcanzan mayor fidelidad estructural que las

aproximaciones habituales basadas en redes adversarias. Xu no realiza un enfrentamiento directo exhaustivo contra varias GAN, pero sus resultados sugieren que en problemas donde la geometría y la preservación de detalle son críticos conviene evaluar modelos de difusión o diseños híbridos. En la práctica, esto invita a explorar configuraciones donde un codificador de difusión proporcione una representación latente que luego sea afinada mediante aprendizaje adversarial, o donde *ControlNet* actúe como condicionador del generador adversarial. Para decidir cuándo preferir difusión, adversarial o enfoques mixtos son necesarios experimentos comparativos reproducibles que reporten métricas estandarizadas, por ejemplo, FID, mAP en tareas *downstream* y esquemas *Train on Real / Synthetic* (entrenamiento en sintético y prueba en real), y que midan además la caída de desempeño al pasar de simulación a realidad.

Para que las mejoras reportadas se traduzcan en valor industrial es imprescindible reforzar la cultura de reproducibilidad: publicar arquitecturas y semillas, liberar código y datos cuando sea posible y documentar protocolos HIL/SIL. Sin estas prácticas la heterogeneidad de métricas y la falta de transparencia metodológica seguirán siendo barreras para la adopción de soluciones generativas en manufactura inteligente.

5. Conclusiones

Las redes generativas antagónicas han mostrado aplicaciones prometedoras en manufactura inteligente: desde la ampliación de datos para entrenar detectores y la generación de escenarios de fallo para gemelos digitales, hasta la síntesis de trayectorias y señales que facilitan el entrenamiento de políticas de control. Estos aportes resultan valiosos en contextos donde los datos reales son escasos, costosos de obtener o representan eventos poco frecuentes.

Sin embargo, la madurez de estas técnicas para un uso industrial sigue siendo parcial. Persisten brechas en la transferencia de simulación a entorno real, ausencia de protocolos estandarizados de validación *hardware-in-the-loop*, y limitaciones en la reproducibilidad debidas a la falta de reportes estadísticos sistemáticos y a la escasa liberación de arquitecturas, semillas y código.

Para avanzar hacia su adopción práctica es necesario establecer criterios claros de gobernanza y trazabilidad de lo sintético: registrar metadatos completos de cada muestra generada, aplicar filtros automáticos basados en métricas objetivas y complementar estas medidas con validación humana que garantice relevancia operativa. En paralelo, deben consolidarse protocolos de evaluación con métricas comparables entre estudios, que incluyan tanto indicadores técnicos (FID, mAP, RMSE de seguimiento, tasa de éxito en manipulación, tiempo de convergencia) como métricas operativas relevantes para gemelos digitales (latencia, recuperación ante fallos, precisión predictiva).

Las líneas futuras más prometedoras apuntan a la integración de condicionamiento físico explícito en los generadores, al desarrollo de enfoques híbridos que combinen GANs con otras arquitecturas generativas y a la estandarización de marcos de validación reproducibles. Con estos avances, las GANs no sustituirán la ingeniería tradicional, pero sí la complementarán: ofreciendo un medio seguro y flexible para ensayar escenarios de riesgo, acelerar la validación de controladores y enriquecer el despliegue de gemelos digitales en la manufactura inteligente.

Referencias

- Zhang, G., Cui, K., Hung, T. & Lu, S. (2021). Defect-GAN: High-Fidelity Defect Synthesis for Automated Defect Inspection. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.15158>
- Guo, Y., Zhong, L., Qiu, Y., Wang, H., Gao, F., Wen, Z. & Zhan, C. (2022). Using ISU-GAN for unsupervised small sample defect detection. *Scientific Reports*, 12, 11604. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15855-7>
- Chen, L., Li, Y., Deng, X., Liu, Z., Mingyang, L. & Zhang, H. (2022). Dual Auto-Encoder GAN-Based Anomaly Detection for Industrial Control System. *Applied Sciences*, 12(10), 4986. <https://doi.org/10.3390/app12104986>
- Zhang, L., Dai, Y., Fan, F. & He, C. (2023). Anomaly Detection of GAN Industrial Image Based on Attention Feature Fusion. *Sensors*, 23(1), 355. <https://doi.org/10.3390/s23010355>
- Deng, F., Luo, J., Fu, L., Huang, Y., Chen, J., Li, N., Zhong, J & Lam, T. (2024). DG2GAN: improving defect recognition performance with generated defect image sample. *Scientific Reports*, 14, 14787. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64716-y>
- Kim, T., Lee, J., Gong, S., Lim, J., Kim, D. & Jeong, J. (2025). A Novel FS-GAN-Based Anomaly Detection Approach for Smart Manufacturing. *Machines*, 13(1), 21. <https://doi.org/10.3390/machines13010021>
- Jain, S., Seth, G., Paruthi, A., Soni, U & Kumar, G. (2022). Synthetic data augmentation for surface defect detection and classification using deep learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33, 1007–1020. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01710-x>
- Wang, C., Huang, G., Huang, Z. & He, W. (2023). Conditional TransGAN-Based Data Augmentation for PCB Electronic Component Inspection. *Journal of Sensors & Imaging*. <https://doi.org/10.1155/2023/2024237>
- He, X., Chang, Z., Zhang, L., Xu, H., Chen, H. & Luo, Z. (2022). A Survey of Defect Detection Applications Based on Generative Adversarial Networks. *IEEE Access*, 10, 113493–113512. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9930483>
- Ghosh, S., Hasan, Md., Craig, P., Roy, A., Varshney, N., Koppal, S., Dalir, H. & Asadizanjani, N. (2024). Optimizing deep learning performance in PCB x-ray inspection through synthetic data tuner. *Applications of Machine Learning (Proc. SPIE Vol. 13138, 131380N)*. <https://doi.org/10.1117/12.3027380>
- Huang, J., Zhao, F. & Chen, L. (2025). Defect Detection Network In PCB Circuit Devices Based on GAN Enhanced YOLOv11. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.06879>
- Ren, H., & Ben-Tzvi, P. (2020). Learning inverse kinematics and dynamics of a robotic manipulator using generative adversarial networks. *Robotics and Autonomous Systems*, 124, 103386. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103386>
- Lembono, T. S., Pignat, E., Jankowski, J., & Calinon, S. (2021). Learning constrained distributions of robot configurations with generative adversarial network. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2011.05717>
- Kushwaha, V., Shukla, P., & Nandi, G. C. (2023). Generating quality grasp rectangle using Pix2Pix GAN for intelligent robot grasping. *Machine Vision and Applications*, 34, 15. <https://doi.org/10.1007/s00138-022-01362-2>
- Wang, Y., Kong, Y., Chi, W., & Sun, L. (2024). Socially adaptive path planning based on generative adversarial network. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2404.18687>
- Zotov, E., Tiwari, A., & Kadirkamanathan, V. (2020). Towards a Digital Twin with Generative Adversarial Network Modelling of Machining Vibration. *En Proceedings of the 21st EANN 2020 Conference*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48791-1_14
- Tao, Z., Xu, W., Huang, Y., Wang, X., & You, X. (2023). Wireless network digital twin for 6G: Generative AI as a key enabler. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.17451>

Mu, H., He, F., Yuan, L., Hatamian, H., Commins, P., & Pan, Z. (2024). Online distortion simulation using generative machine learning models: A step toward digital twin of metallic additive manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100563>

Muhammad, K., David, T., Nassisid, G., & Farus, T. (2024). Integrating generative AI with network digital twins for enhanced network operations. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Miami. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.17112>

Wang, Q., Zhang, X., Lu, J., Xiao, G., Ren, Y. & Li, W. (2025). DT-driven physically constrained GAN for industrial boiler fault diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74. <https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3558806>

Xu, Y., Wu, H., Liu, Y. & Liu, X. (2025). Printed Circuit Board Sample Expansion and Automatic Defect Detection Based on Diffusion Models and ConvNeXt. *Micromachines*, 16(3), 261. <https://doi.org/10.3390/mi16030261>

Karras, T., Laine, S., & Aila, T. (2018). *A style-based generator architecture for generative adversarial networks*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.04948>

Kotholliparambil Haridasan, P., & Jawale, H. (2024). Generative AI in Manufacturing: A Review of Innovations, Challenges and Future Prospects. *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science*. <https://doi.org/10.51219/JAIMLD/praveen-haridasan/321>

He, Y. (2024). A Survey on Surface Defect Inspection Based on Generative Models in Manufacturing. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14156774>

Alfaro-Viquez, D. (2025). A Comprehensive Review of AI-Based Digital Twin Applications in Manufacturing: Integration Across Operator, Product, and Process Dimensions. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics14040646>

Li, J., & Yang, S. X. (2025). Digital twins to embodied artificial intelligence: review and perspective. *Intelligent Robotics*, 5(1), 202–227. <http://dx.doi.org/10.20517/ir.2025.11>

Lee, S. K., & Ko, H. (2025). Generative Machine Learning in Adaptive Control of Dynamic Manufacturing Processes: A Review. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.00210>

Eshaghi Chaleshtori, A. (2023). Data Fusion Techniques for Fault Diagnosis of Industrial Machines: A Survey. *Computational Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.22124/cse.2023.23757.1040>

Aquanova: Monitoreo Autónomo Inteligente De Agua Con IA Y Energía Solar

Juan Roberto Alexander Corona¹ y Sergio Ulises Garza Selvera¹

IEST Anáhuac, Avenida Dr. Burton E. Grossman 501, 76125 Tamaulipas, México
juan.alexander@iest.edu.mx

Resumen. AQUANOVA es un sistema autónomo de monitoreo y evaluación de cuerpos de agua que integra sensores, energía solar e inteligencia artificial para proporcionar datos en tiempo real sobre parámetros físicos y químicos del agua. El proyecto surge ante la necesidad de contar con herramientas precisas, confiables y de bajo costo para la gestión ambiental en lagunas, ríos y reservorios, contribuyendo a la toma de decisiones sustentables. El prototipo desarrollado realiza mediciones automáticas de variables como pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad, procesando la información a través de un sistema de inteligencia artificial que analiza y grafica los resultados en una plataforma web accesible. Los ensayos realizados demostraron una alta correlación entre los datos obtenidos por AQUANOVA y los análisis de laboratorio certificados, validando su precisión y confiabilidad. Además, el sistema posee operación autónoma con retorno programado y capacidad de control manual o vía GPS, permitiendo su implementación en distintos cuerpos de agua sin supervisión constante. Este proyecto representa un avance significativo en la combinación de tecnologías ambientales y digitales, ofreciendo soluciones efectivas para la gestión de recursos hídricos y la preservación del ecosistema acuático. Su diseño modular facilita escalabilidad y adaptabilidad, abriendo la posibilidad de implementar múltiples unidades para monitoreo regional simultáneo.

Palabras clave: Monitoreo, IA, agua, energía, sensores

1 OBSERVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la región del sur de Tamaulipas, varios cuerpos de agua presentan deterioro en su calidad, afectando la flora, fauna y la salud de la población que depende de estos recursos. Las lagunas, ríos y otros cuerpos de agua muestran diferencias significativas en parámetros como turbidez, oxígeno disuelto y conductividad, reflejando contaminación y desequilibrio ambiental. La falta de monitoreo constante y de herramientas accesibles para medir la calidad del agua impide que autoridades y comunidades tomen decisiones informadas para su conservación y uso sustentable. Esto genera riesgos de salud, pérdida de biodiversidad y limitaciones en actividades económicas como la pesca y el turismo local.

Estudios recientes destacan que los métodos tradicionales de monitoreo son costosos, requieren personal especializado y ofrecen información limitada en tiempo real, lo que retrasa la respuesta ante eventos críticos de contaminación (INEGI, 2022; CONAGUA, 2023). Además, la ausencia de datos precisos dificulta la planeación de estrategias de conservación y la evaluación del impacto de políticas públicas.

Por lo tanto, se identificó la necesidad de un sistema autónomo, accesible y confiable que permita monitorear en tiempo real los parámetros de calidad del agua, facilitando la gestión ambiental, la toma de decisiones y la protección de los ecosistemas acuáticos.

2 Marco Teórico

La gestión y monitoreo de cuerpos de agua es un componente crítico para la preservación ambiental y la salud pública. La calidad del agua se evalúa a partir de parámetros físicos, químicos y biológicos, como pH, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad y sólidos sedimentables, los cuales reflejan el estado ecológico y la aptitud del agua para diversos usos. Los métodos tradicionales de análisis requieren equipos de laboratorio especializados, son costosos y no permiten monitoreo continuo, lo que limita la capacidad de respuesta ante eventos de contaminación.

El desarrollo de sistemas autónomos de monitoreo ha permitido superar estas limitaciones. Estos sistemas integran sensores electrónicos, plataformas de adquisición de datos y algoritmos de análisis automatizados, ofreciendo mediciones en tiempo real y reduciendo la necesidad de intervención humana constante. Los sensores más utilizados incluyen electrodos para pH, sensores ópticos para turbidez y conductímetros para conductividad, cuya precisión depende de la calibración y el mantenimiento adecuados.

La inteligencia artificial y los algoritmos de análisis de datos permiten interpretar grandes volúmenes de información, detectar anomalías y generar recomendaciones para la gestión ambiental. La energía solar se ha incorporado como fuente sostenible, permitiendo operación autónoma en zonas remotas. A partir de esta revisión, se acepta que un sistema modular, autónomo y con integración de sensores y análisis basado en IA es una solución eficiente y escalable para el monitoreo continuo de cuerpos de agua, proporcionando datos precisos, confiables y accesibles para la toma de decisiones sustentables.

3 Propuesta Alternativa De Solución

La propuesta para solucionar el problema de falta de monitoreo continuo y accesible de cuerpos de agua es desarrollar AQUANOVA, un sistema autónomo de monitoreo de calidad del agua. Este prototipo integra sensores para medir pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad, conectados a un sistema de adquisición de datos que procesa la información mediante inteligencia artificial.

El sistema funciona de manera autónoma, utilizando energía solar para su operación en zonas remotas, y puede ser controlado manualmente o mediante rutas programadas vía GPS. Los datos recopilados se transmiten en tiempo real a una plataforma web, donde se visualizan gráficas y reportes que permiten a autoridades y comunidades tomar decisiones informadas sobre el manejo y conservación de los cuerpos de agua. El diseño modular de AQUANOVA facilita la escalabilidad, permitiendo implementar múltiples unidades simultáneamente en diferentes cuerpos de agua para obtener un monitoreo regional. Además, su bajo costo y facilidad de instalación buscan superar las limitaciones de los métodos tradicionales de laboratorio, ofreciendo una herramienta confiable, precisa y accesible para la preservación del ecosistema acuático y la gestión sustentable de recursos hídricos.

4 Elemento Creativo De Innovación

El principal elemento innovador de AQUANOVA es la integración de sensores ambientales con inteligencia artificial y energía solar en un sistema autónomo y modular para monitoreo de cuerpos de agua. A diferencia de los métodos tradicionales, que requieren análisis de laboratorio costosos y personal especializado, AQUANOVA permite mediciones en tiempo real, continuas y precisas, con la posibilidad de monitoreo remoto mediante una plataforma web.

El prototipo está compuesto por:

- Sensores de pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad, que detectan la calidad del agua.
- Unidad de procesamiento con IA, que analiza los datos, detecta anomalías y genera reportes automáticos.
- Módulo de comunicación, que transmite la información a la plataforma web.
- Sistema de energía solar, que permite operación autónoma sin necesidad de conexión eléctrica.
- Chasis flotante modular, que facilita el ensamblaje, transporte y escalabilidad para múltiples cuerpos de agua.

El valor agregado radica en que AQUANOVA no solo mide parámetros ambientales, sino que interpreta la información, facilita la toma de decisiones y es adaptable a distintos ecosistemas acuáticos. Comparado con sistemas similares, AQUANOVA destaca por su bajo costo, autonomía total, escalabilidad y análisis inteligente de datos, características que lo hacen más eficiente y accesible que cualquier sistema convencional de monitoreo.

5 Factibilidad Técnica

La realización del prototipo AQUANOVA es altamente viable tanto técnica como materialmente. Los sensores de pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad, así como el microcontrolador y los módulos de comunicación, son componentes accesibles y de fácil adquisición en el mercado local e internacional. El sistema de energía solar utiliza paneles compactos y baterías recargables, tecnologías ampliamente disponibles. El ensamblaje del prototipo es sencillo gracias a su diseño modular, que permite integrar los sensores, la unidad de procesamiento y la plataforma flotante de manera segura y eficiente. Las pruebas iniciales y la calibración de los sensores requieren instrumentos estándar de laboratorio ambiental, los cuales ya se han utilizado con éxito en los prototipos previos.

Durante este primer año de desarrollo, se lograron construir dos prototipos funcionales, lo que demuestra que la técnica y los materiales empleados permiten replicar y mejorar el sistema sin dificultades significativas. Esto confirma la factibilidad del proyecto para su implementación a mayor escala, asegurando que el prototipo pueda ser operado en distintos cuerpos de agua con recursos y conocimientos disponibles actualmente.

6 Plan De Desarrollo/ Metodología

La metodología para el desarrollo de AQUANOVA se basó en un enfoque de diseño y prueba iterativa, integrando las etapas de investigación, construcción del prototipo, pruebas y análisis de resultados. Se siguió la siguiente secuencia:

- Semana 1-2: Investigación y análisis de parámetros de calidad de agua relevantes; definición de sensores y componentes necesarios.
- Semana 3-4: Diseño del prototipo y elaboración de planos del sistema modular flotante y su ensamblaje.
- Semana 5-6: Adquisición de componentes, montaje inicial de sensores, microcontrolador y módulo de comunicación.
- Semana 7-8: Integración de energía solar y pruebas de funcionamiento autónomo en laboratorio.
- Semana 9-10: Pruebas piloto en cuerpos de agua seleccionados, recolección de datos y calibración de sensores.
- Semana 11-12: Análisis de resultados, ajuste de algoritmos de inteligencia artificial y optimización del prototipo según retroalimentación.
- Semana 13: Documentación de resultados, elaboración de reportes y preparación para presentación del proyecto.

Resultados obtenidos:

- Prototipo funcional capaz de medir pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad.
- Datos en tiempo real accesibles vía plataforma web.
- Sistema autónomo con energía solar y rutas programadas mediante GPS.
- Registro completo en bitácora de trabajo de cada etapa de diseño, pruebas y mejoras, que permita evaluar la eficiencia, confiabilidad y escalabilidad del prototipo.

Este plan aseguro un desarrollo ordenado, replicable y verificable, permitiendo validar la funcionalidad y efectividad de AQUANOVA antes de su implementación a mayor escala.

7 Metas

1. **Escalamiento del prototipo funcional:** Implementar múltiples unidades de AQUANOVA en distintos cuerpos de agua de la región, aprovechando el diseño modular y autónomo, para obtener un monitoreo más amplio y continuo.
2. **Mejora de precisión y confiabilidad:** Optimizar los sensores y algoritmos de inteligencia artificial basándose en los datos recopilados del prototipo inicial, asegurando mayor exactitud y consistencia en las mediciones.

- 3. **Automatización avanzada y control remoto:** Integrar funciones adicionales de control manual y programación de rutas vía GPS para mejorar la autonomía y adaptabilidad del sistema.
- 4. **Difusión y accesibilidad de datos:** Desarrollar un sistema de visualización más intuitivo y dinámico en la plataforma web, permitiendo que comunidades, autoridades y empresas puedan interpretar rápidamente los resultados.
- 5. **Impacto ambiental y social:** Usar los datos obtenidos para generar alertas tempranas de contaminación, promover estrategias de conservación y sensibilizar a la población sobre la importancia del cuidado de los recursos hídricos.

Alcances:

- Expansión del prototipo a monitoreo regional.
- Mejoras en precisión, autonomía y presentación de datos.
- Base para estudios comparativos y generación de información estratégica sobre calidad del agua.

Análisis Financiero

Tabla 1: Costos (mxn)

INSUMOS / COMPONENTES	COSTO ESTIMADO (MXN)
Sensores (pH, turbidez, oxígeno, conductividad)	\$1,200
Microcontrolador y módulos de comunicación	\$800
Panel solar y baterías	\$1,000
Chasis flotante modular	\$600
Cableado y conectores	\$200
Plataforma web y software	\$500
Otros (herramientas, ensamblaje)	\$300
Subtotal	\$4,600
Precio de venta sugerido (con utilidad ~30%)	\$5,980

Análisis De La Ventaja Competitiva

Actualmente, los sistemas de monitoreo de agua disponibles en el mercado son equipos de laboratorio portátiles o estacionarios, que requieren personal especializado, mantenimiento constante y presentan altos costos de adquisición y operación. Algunos competidores ofrecen sensores individuales para pH o turbidez, pero rara vez integran todas las mediciones en un solo sistema ni permiten monitoreo remoto en tiempo real.

La ventaja competitiva de AQUANOVA radica en su integración completa y autonomía:

- Mide pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad simultáneamente, mientras que la mayoría de los competidores mide un parámetro por equipo.
- Funciona de manera totalmente autónoma con energía solar, eliminando la necesidad de conexión eléctrica constante y personal permanente.
- Integra inteligencia artificial que analiza los datos y genera reportes automáticos, algo que los sistemas tradicionales no ofrecen.
- Los datos se presentan en plataforma web accesible, ofreciendo visualización inmediata para autoridades, empresas y comunidades, lo que no ofrecen los equipos de laboratorio convencionales.

AQUANOVA se diferencia por ser un sistema todo-en-uno, inteligente, autónomo, accesible y escalable, características que lo hacen único en el mercado y proporcionan valor agregado real frente a soluciones existentes, asegurando su implementación eficiente en la gestión y preservación de recursos hídricos.

Investigación De Mercado

- **Sector y segmento:** AQUANOVA está dirigido principalmente a autoridades ambientales, institutos de investigación, comunidades locales y empresas dedicadas a la gestión de recursos hídricos en la región del sur de Tamaulipas, donde la calidad del agua es un tema crítico para la salud pública y el desarrollo económico.
- **Producto (Product):** El sistema autónomo de monitoreo de calidad del agua, capaz de medir pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad en tiempo real, con análisis de datos mediante inteligencia artificial y plataforma web accesible.
- **Precio (Price):** El costo del sistema será competitivo frente a los métodos tradicionales de laboratorio, ofreciendo un alto valor por menor inversión, considerando su autonomía, escalabilidad y reducción de necesidad de personal especializado.
- **Plaza (Place):** La implementación se enfocará en cuerpos de agua estratégicos de Altamira, Tampico y Ciudad Madero, con posibilidad de expansión regional, facilitando el acceso a información ambiental confiable para autoridades y comunidades.
- **Promoción (Promotion):** La difusión del proyecto se realizará mediante presentaciones a autoridades locales, talleres comunitarios, publicaciones en redes sociales y participación en congresos e iniciativas ambientales, resaltando la innovación, autonomía y confiabilidad del prototipo.
- **Grado de aceptación:** El análisis preliminar indica que existe alta receptividad, dado que los actores involucrados reconocen la necesidad de herramientas accesibles y confiables para el monitoreo de agua, y AQUANOVA aporta innovación, eficiencia y reducción de costos frente a alternativas tradicionales.

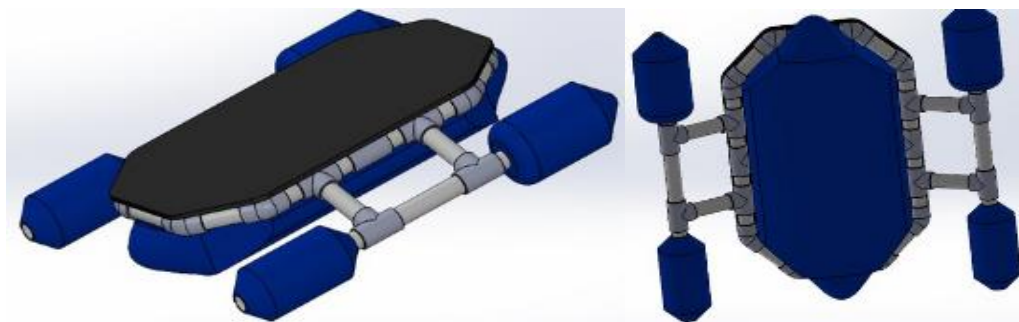
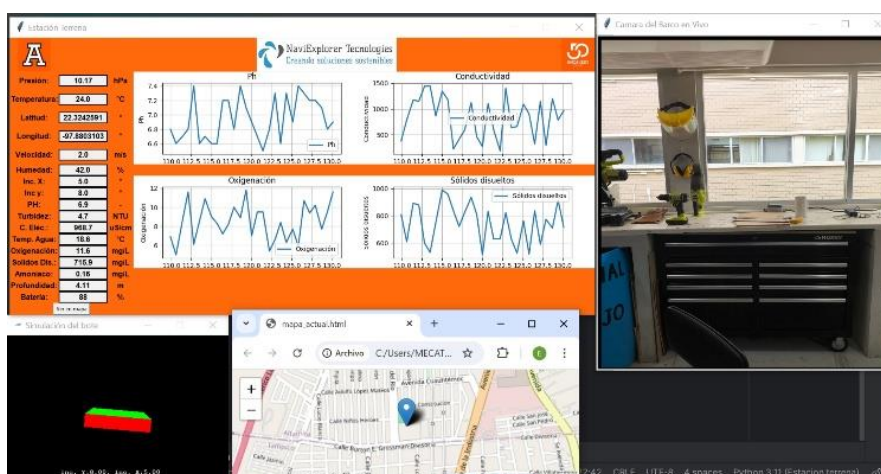


Figura 1 Esquema ilustrativo del proyecto.



• **Figura 2** Prototipo AQUANOVA funcional.

•



• **Figura 3** Interfaz del sistema autónomo (estación terrena)

ANEXOS

Tabla 2. Comparación Prototipo vs Laboratorio

Parámetro	Champayán Prototipo	Champayán Laboratorio	Chairel Prototipo	Chairel Laboratorio
pH	7.42	7.40	7.21	7.23
Turbidez (EBC)	46.5	46.4	52.3	52.8
Temperatura (°C)	23.4	23.5	24.2	24.0
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	724	723	813	815
Sólidos sedimentables (ml/L)	1.1	1.0	1.3	1.2
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.8	7.9	6.5	6.6
Redox ORP (mV)	210	212	195	198
Color (EBC)	18.0	17.8	24.0	23.5
Nivel de agua (m)	1.85	1.84	2.12	2.10
Conductividad térmica (mS/cm)	0.75	0.76	0.82	0.83

Observaciones clave

- La **Laguna del Champayán** mostró mejores condiciones de oxigenación y menor turbidez, reflejando menor impacto antrópico.
- La **Laguna del Chairel** presentó mayor conductividad y turbidez, posiblemente por descargas residuales urbanas. Las diferencias entre el prototipo y el laboratorio fueron mínimas (± 0.2 unidades en promedio), lo que valida la precisión del sistema.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua. (2021). Estadísticas del agua en México 2021. SINA/Sector hídrico. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf> files.conagua.gob.mx
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2020: Tamaulipas. INEGI. INEGI
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Panorama sociodemográfico de Tamaulipas: Censo de Población y Vivienda 2020. INEGI. INEGI
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Monitoreo de la calidad del agua – Informe técnico. Subdirección General Técnica, CONAGUA. hidrobiologica.izt.uam.mx
- Flores Magdaleno, H., Can Chulim, A., Olguín López, J. L., Mendoza Saldívar, I., Luna Fletes, J. A., Cruz Crespo, E., ... Ramírez Romero, J. M. (2024). Aplicación de un índice de calidad del agua (ICA) en la cuenca del río Ayuquila-Armería en México. Hidrobiológica, 34(2). <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/1528> hidrobiologica.izt.uam.mx
- Determinación histórica de índices de calidad del agua en... (2023). Analítica ambiental y monitorización de agua en México. SciELO. SciELO México
- Estudio integral de la calidad del agua en el... (2020). Calidad del agua según NOM-001-SEMARNAT. SciELO. SciELO México
- Gestión del agua urbana en Tamaulipas. (2022). Análisis introductorio sobre gestión urbana del agua. Dialnet. Dialnet
- Sistema Sensor para el Monitoreo Ambiental Basado en Redes Neuronales. (2019). arXiv. Rubio, J. de J., Hernández-Aguilar, J. A., Avila-Camacho, F. J., Stein-Carrillo, J. M., & Melendez-Ramírez, A. arXiv
- AquaSight: Automatic Water Impurity Detection Utilizing Convolutional Neural Networks. (2019). arXiv. Gupta, A., & Ruebush, E. arXiv
- Desinfección solar del agua. (2025). Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Desinfecci%C3%B3n_solar_del_agua Wikipedia
- Proyecto de Vigilancia de la Calidad Microbiológica del Agua. COFEPRIS. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/proyecto-agua-de-calidad-bacteriologica>.

Automatización Del Dosificado De Soluciones Con Ayuda De Un Robot Colaborativo

Manuel Jesus Heredia Rios^{1*}, Isaí Jesús Rios Rosas², Francisco Domingo Calvo López², Enrique Pérez Gutiérrez¹, David Pinto Avendaño³, Humberto Salazar Iburgüen⁴, María Judith Percino Zacarías¹

¹ Unidad de Polímeros y Electrónica Orgánica, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

² Facultad de Electrónica, Decanato de Ingeniería Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México.

³ Dirección de Innovación y Transferencia del conocimiento, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

⁴ Centro Interdisciplinario de Investigación y Enseñanza de la Ciencia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

*col539773@colaborador.buap.mx

Resumen: En el presente trabajo se programó e implementó una rutina utilizando un robot colaborativo Yumi IRB 14000 de la compañía ABB para la manipulación de una micropipeta con el objetivo de automatizar procesos de dosificación de soluciones en un laboratorio de química. Para evaluar su desempeño, se llevaron a cabo pruebas utilizando diferentes disolventes, así como rutinas a distintas velocidades de operación. Esto permitió analizar tanto la precisión como la reproducibilidad del sistema bajo diferentes condiciones de trabajo. Los resultados demostraron que el robot es capaz de dispensar volúmenes de manera continua, estable y con un margen de error reducido, lo que valida su eficacia como herramienta de automatización en entornos experimentales. La implementación de este tipo de sistemas colaborativos no solo optimiza tareas rutinarias, sino que también reduce la variabilidad asociada al factor humano y aumenta la seguridad en la manipulación de reactivos.

Palabras Clave: automatización, dosificación, robot colaborativo.

1. Introducción

El creciente desarrollo de la Industria 4.0, también conocida como la cuarta revolución industrial (Masconi, 2015; Sommer, 2015; Díaz et al., 2017), ha impulsado la adopción de tecnologías avanzadas, entre las cuales destacan los robots colaborativos o Cobots (García Ortega, 2021). Estos dispositivos, diseñados para interactuar de manera segura y eficiente con humanos y otras máquinas, han demostrado ser herramientas versátiles en diversos procesos industriales y de investigación (Liu et al., 2024; Taesi et al., 2023). Su capacidad para realizar tareas de colaboración hombre-máquina y máquina-máquina ha abierto nuevas posibilidades en la automatización inteligente.

Courtney y Gudipati (2024) y Jiang et al. (2024) describen diversas aplicaciones de la robótica, la automatización y la inteligencia artificial con proyecciones a corto, mediano y largo plazo, tanto en el ámbito de la investigación como en la industria. A medida que estas tecnologías evolucionan, las tareas que deberán desempeñar los sistemas robóticos serán cada vez más complejas, incluyendo actividades críticas como la dispensación precisa de medicamentos (Shashiashvili, N, 2025), la

fabricación de dispositivos que requieren condiciones de baja contaminación (Musa et al., 2025) o en la experimentación como lo es, la celda de procesos experimentales para el crecimiento de nano cristales (NC) RAINBOW diseñada por Xu et al. (2025).

En este contexto, resulta esencial que los robots sean capaces de manipular una amplia variedad de herramientas y adaptarse a distintos entornos de implementación. Por lo que, en el presente artículo se centra en el uso del robot colaborativo Yumi IRB 14000 de ABB, un sistema compuesto por dos brazos robóticos, cada uno con 7 grados de libertad lo que permite movimientos controlados y altamente precisos (ABB, s.f.).

Este robot fue programado para realizar tareas reproducibles en entornos de laboratorio, específicamente en la dosificación (depósito) de sustancias. Para ello, se utilizaron diferentes disolventes (agua destilada, agua/etanol 1:2, acetona) con el objetivo de evaluar la reproducibilidad del proceso de dosificación. Se analizaron parámetros clave, como la velocidad de desplazamiento, la cantidad de solución succionada y depositada (en gramos), así como la ejecución de la rutina por un tiempo prolongado.

2. Materiales y método

2.1 Materiales

El principal objeto de estudio, es analizar la viabilidad de la aplicación del robot colaborativo para la dosificación de soluciones, por lo que este será el sistema central del estudio realizado. El robot Yumi IRB 14000 (Figura 1), está equipado con dos brazos y grippers programables, lo que permite la manipulación precisa de herramientas e instrumentos de laboratorio, esto lo convierte en una herramienta versátil para tareas de automatización.



Figura 1. Robot ABB YuMi IRB 14000.

Para el depósito de las soluciones se utilizaron micropipetas con capacidad de 100-1000 μL . Para verificar la masa del volumen dosificado, se empleó una balanza analítica (OHAUS, s.f.). Previamente, se calibró el peso en gramos para los volúmenes dosificados (Krishnan, 2019; CENAM, 2016). En la Tabla 1 se presentan el valor de la masa obtenida (en μg) para cada volumen (en μL).

Tabla 1. Equivalencia entre microlitros de solución y microgramos.

Solución	Ml	μg
Agua destilada	100	100
Agua destilada/etanol 1:2	100	93
Acetona	100	84

2.2 Programación del robot colaborativo

La programación del robot colaborativo puede realizarse de tres formas: mediante el proceso de guiado, a través del FlexPendant o utilizando el software Robot Studio (ABB Operating manual, s.f.). Dado que la sincronización y la precisión son aspectos críticos para garantizar la eficiencia del proceso de depósito, en este caso la programación se llevó a cabo utilizando el FlexPendant y el software Robot Studio. La programación se hace de forma secuencial, guardando cada punto de posición en la que sea deseado definir las trayectorias del robot con ayuda del FlexPendant, mientras que en RobotStudio se lleva a cabo la modificación de parámetros (velocidad, desplazamiento, fuerza, etc.) e instrucciones específicas directamente en el código fuente, lo que brinda un control preciso y detallado sobre cada etapa de la programación del robot (ABB Robotics, 2018).

En la Figura 2 se muestra un diagrama simplificado del programa desarrollado para el robot, el cual describe el flujo de operaciones en el proceso de depósito de soluciones. El diagrama ilustra las rutinas programadas para cada brazo del robot. El programa fue desarrollado de manera secuencial, asignando al brazo derecho —encargado de sostener la micropipeta— la mayoría de las operaciones. Una vez que este brazo se posiciona al final de una trayectoria, envía una señal para activar la rutina del brazo izquierdo. Este último ejecuta movimientos a baja velocidad y con aproximación fina, destinados principalmente a presionar el émbolo de la micropipeta. Cuando alcanza la posición en la que cesa la presión sobre el émbolo, el brazo izquierdo envía una señal que permite reanudar la rutina del brazo derecho. Esta estrategia de programación asegura la correcta coordinación de ambos brazos, posibilitando tanto la aspiración de la solución como el depósito controlado, lo que a su vez permite evaluar el error de dosificación con ayuda de la balanza analítica.

2.3 Definición del espacio de trabajo

La definición del espacio de trabajo es un aspecto fundamental en los procesos automatizados, ya que el objetivo de la automatización es reducir la dependencia de un operador o supervisor durante períodos prolongados. En su lugar, sensores, actuadores y robots deben realizar las tareas de producción de manera autónoma dentro de un área delimitada, lo que además contribuye a la prevención de accidentes (FEMEVAL, s.f.).

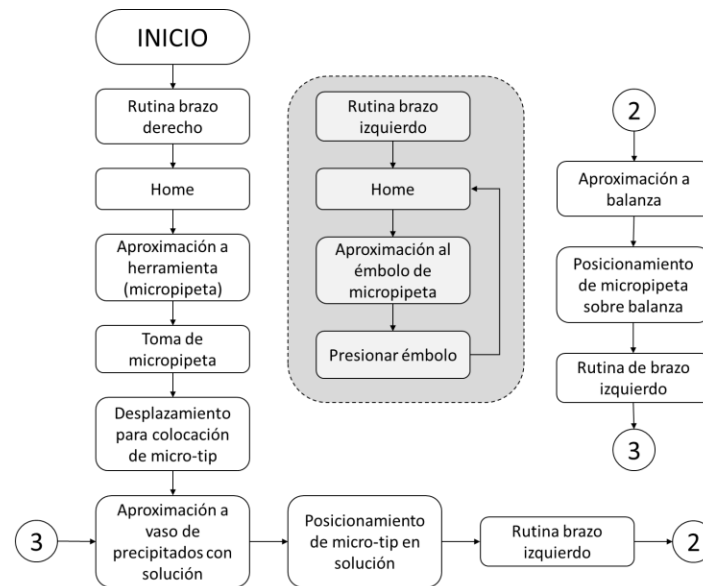


Figura 2. Diagrama del algoritmo de control implementado en el robot YUMI IRB 14000.

En la Figura 3 se muestra el espacio de trabajo definido para el robot IRB 14000, donde las herramientas e instrumentos de laboratorio están colocados sobre una mesa de trabajo.

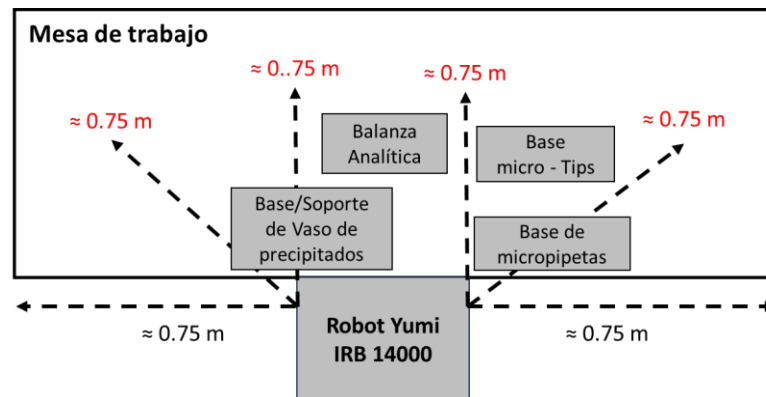


Figura 3. Definición del espacio de trabajo.

Para una definición precisa del espacio de trabajo es indispensable considerar los límites mecánicos de los actuadores que controlan los movimientos del robot, a fin de evitar sobreesfuerzos que puedan comprometer su integridad. Como se muestra en la figura 3, la distancia máxima de operación segura para cada brazo es de 0.75 m, por lo que el espacio de trabajo se encuentra delimitado dentro de este rango. Esta restricción asegura que el robot pueda operar de manera continua durante periodos prolongados, sin riesgo de fallos mecánicos ni de activación de los protocolos de protección que interrumpen la ejecución de la rutina programada (ABB, s.f.; ABB Robotics, 2018).

3 Resultados

Para la recolección de la solución depositada se empleó una cápsula de porcelana con una masa inicial de 32.89 g, considerada como valor de tara. Este valor de referencia permitió determinar con precisión la masa neta correspondiente al volumen dispensado en cada prueba de depósito automatizado.

Con el fin de validar la capacidad de aspiración de la micropipeta, se realizaron inicialmente ensayos de succión manual (Tabla 2), registrando la masa del volumen succionado. Posteriormente, se ejecutó el proceso de succión y depósito de manera automatizada (Depósito, Tabla2), lo que permitió comparar el volumen succionado de forma manual y el realizado por el robot Yumi. Con ello fue posible evaluar la precisión, consistencia y repetibilidad del sistema automatizado, para esta primera parte se utiliza agua destilada.

En las tablas 2-6, se muestran los resultados obtenidos al dosificar 800 μl , 600 μl , 400 μl , 200 μl y 100 μl . Vale la pena mencionar que las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, lo cual debe tomarse en cuenta ya que, debido a la presión de vapor del etanol y la acetona puede evaporarse rápidamente y cambiar el volumen (y la masa) depositada, en un lapso de tiempo corto (Manzur & Cardoso, 2015; Universidad Veracruzana, 2022; UNAM, s.f.).

Tabla 2. Depósito automatizado de agua destilada (~800 μl)

No. De muestra	Succión (μl)	Depósito (μl)	Dif (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	797.12	788.25	1.12	25.8
2	797.12	788.65	1.07	25.8
3	797.12	788.76	1.05	25.8
4	797.12	788.74	1.06	25.8
5	797.12	788.61	1.07	25.8
Error promedio (%)			1.07	

Tabla 3. Depósito automatizado de agua destilada (~600 μl)

No. De muestra	Succión (μl)	Depósito (μl)	Dif (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	598.65	591.84	1.14	25.8
2	598.65	591.81	1.15	25.8
3	598.65	591.88	1.14	25.8
4	598.65	591.91	1.13	25.8
5	598.65	591.85	1.14	25.8
Error promedio (%)			1.14	

Tabla 4. Depósito automatizado de agua destilada (~400 μ l)

No. De muestra	Succión (μ l)	Depósito (μ l)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	398.47	393.85	1.17	25.8
2	398.47	393.92	1.15	25.8
3	398.47	393.87	1.16	25.8
4	398.47	393.9	1.15	25.8
5	398.47	393.89	1.16	25.8
Error promedio (%)			1.16	

Tabla 5. Depósito automatizado de agua destilada (~200 μ l)

No. De muestra	Succión (μ l)	Depósito (μ l)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	198.16	193.25	2.51	25.8
2	198.16	193.26	2.50	25.8
3	198.16	193.37	2.45	25.8
4	198.16	193.54	2.36	25.8
5	198.16	193.28	2.49	25.8
Error promedio (%)			2.46	

Tabla 6. Depósito automatizado de agua destilada (~100 μ l)

No. De muestra	Succión (μ l)	Depósito (μ l)	Dif (%)	Temperatura (°C)
1	98.8	95.8	3.08	25.8
2	98.8	95.4	3.50	25.8
3	98.8	95.65	3.24	25.8
4	98.8	95.54	3.35	25.8
5	98.8	95.37	3.53	25.8
Error promedio (%)			3.34	

La Figura 4 muestra de forma gráfica las variaciones observadas entre el volumen succionado y el volumen depositado durante el proceso automatizado, tomando en cuenta el porcentaje de error promedio (EP), obtenido después de 5 depósitos consecutivos.

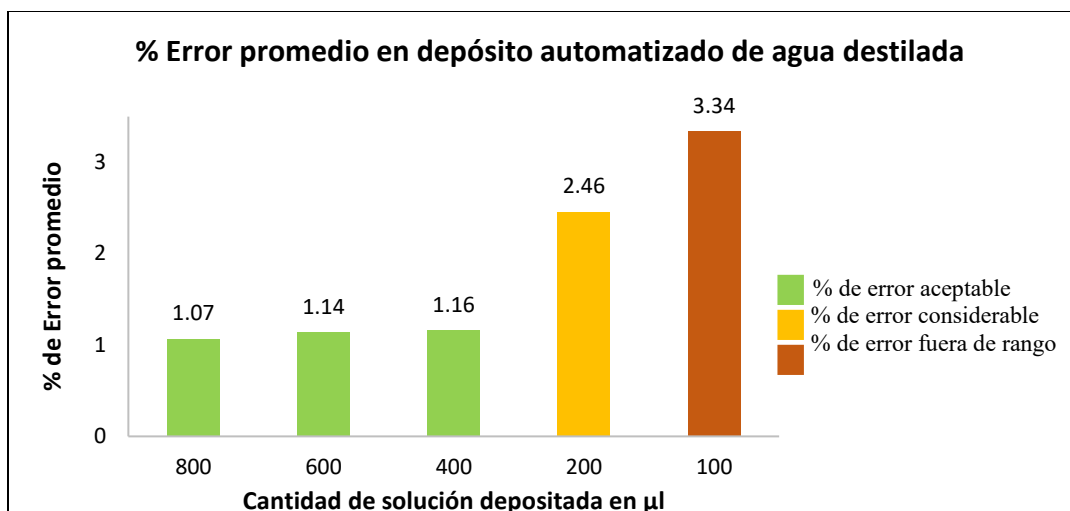


Figura 4. Gráfica de porcentaje de error promedio en el depósito automatizado de agua destilada.

En la gráfica mostrada en la figura 4, se aprecia que el porcentaje de error promedio (EP), incrementa de 1.07% para 800 μl , hasta un 3.34% para 100 μl , esto puede deberse a que para volúmenes pequeños la precisión de la micropipeta tiene mayor variación. Además, se observó que debido al volumen tan pequeño fue evidente la evaporación del agua (Manzur & Cardoso, 2015).

Para esta primera prueba, se estableció una velocidad del punto central de la herramienta (tool center point, TCP) para cada desplazamiento del brazo derecho a 1000 mm/s, para el brazo izquierdo, la velocidad de aproximación a la micropipeta también fue fijada a 1000 mm/s, mientras que al hacer contacto con el émbolo se fijó una velocidad lineal de 20 mm/s, tanto para la presión como para la liberación del émbolo. En los depósitos subsecuentes, se aumentó la velocidad a 5000 mm/s, la velocidad para presionar el émbolo, se conservó en 20 mm/s, en la gráfica mostrada en la figura 5 se muestra el EP, para el depósito de agua destilada a mayor velocidad.

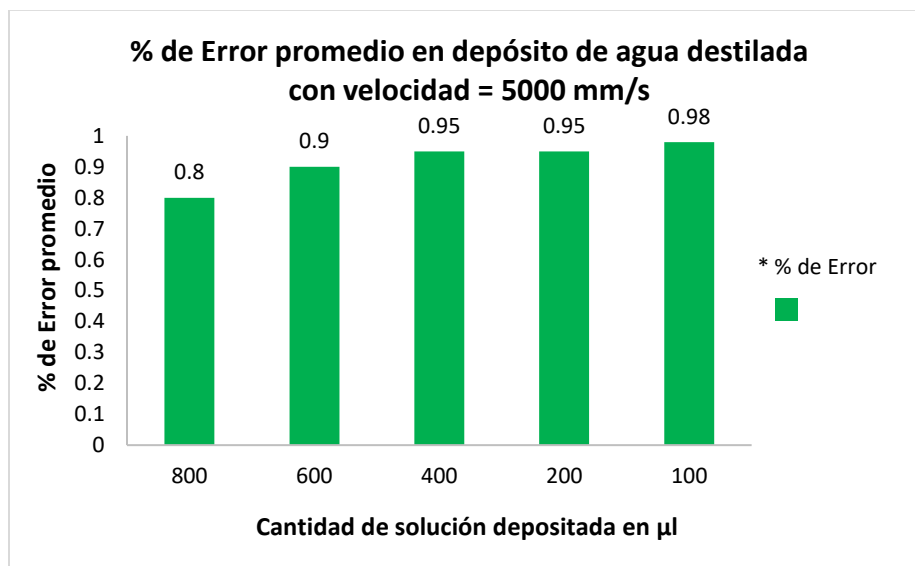


Figura 5. Porcentaje de EP, para el depósito de agua con aumento de velocidad.

La gráfica anterior muestra que, con el aumento de velocidad, el EP disminuye considerablemente, estando por debajo del 1%, incluso para volúmenes de 200 μl y 100 μl , donde el error parece ser más grande en comparación con los volúmenes de 800 μl , 600 μl y 400 μl , sin embargo, esto es aceptable ya que no se pierde una cantidad considerable de solución.

Para el caso de las soluciones agua/etanol 1:2, y de la acetona, los resultados se muestran la gráfica de la figura 6, se aumentó la velocidad a 6000 mm/s, y se analizaron hasta 10 ciclos de succión-depósito, para volúmenes de 500 μl y 100 μl

La figura 6, muestra que, para la solución agua/etanol (línea verde), hay una variación en el EP del 0.51% a 0.63% esto porque, al disminuir el volumen, la evaporación de la solución es mucho más rápida, la temperatura ambiente para el depósito de esta solución se registró en 23.7 °C, sin embargo, se aprecia que es posible realizar hasta 10 depósitos continuos sin variaciones significativas o un aumento en el EP, manteniéndose por debajo del 1%.

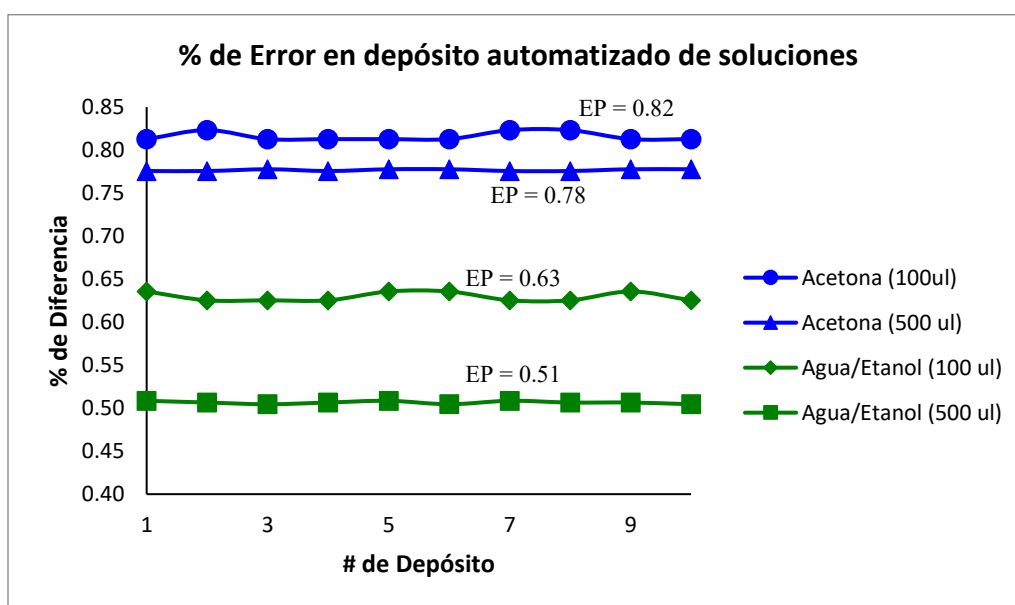


Figura 6. Porcentaje de error para el depósito automatizado de soluciones.

Para el caso de la acetona, en la figura 6 se presenta que el EP, es más grande en comparación de la mezcla agua/etanol 1:2, esto debido a la presión de vapor de la acetona, que es mayor que la del agua y el etanol (UNAM, s.f.), haciendo que se evapore mucho más rápido, sin embargo, para los 10 depósitos que se estudiaron, no se presentan cambios significativos ni aumento en el error.

Al tener un $EP < 1\%$, con disoluciones que presentan evaporaciones mucho más rápidas, con respecto al agua destilada, se considera viable la aplicación del robot colaborativo para su incorporación en procesos más complejos.

4 Conclusiones

En el presente estudio se incorporó un robot colaborativo con la finalidad de automatizar la manipulación de instrumentos de laboratorio, utilizando como caso de prueba una micropipeta. El

propósito principal fue analizar su precisión y repetibilidad durante la entrega controlada de disolventes. Para ello, se emplearon líquidos con distintos puntos de ebullición y se programaron rutinas de operación a velocidades variables, buscando reducir las desviaciones asociadas al proceso de dispensación. Los resultados mostraron que el sistema robótico puede realizar la transferencia de volúmenes de manera continua y estable, manteniendo un error promedio mínimo, lo que confirma su viabilidad para tareas experimentales de mayor complejidad. Entre las aplicaciones potenciales se encuentran la síntesis automatizada de materiales orgánicos y la deposición de capas funcionales, etapas clave en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, tales como celdas solares (OSCs) y diodos emisores de luz orgánicos (OLEDs).

Referencias

- Mosconi, F. (2015). *The new European industrial policy: Global competitiveness and the manufacturing renaissance*. Routledge.
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution—Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512–1532. <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>
- Díaz, R. B., Francolí, J. F., & Martínez, C. P. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía Industrial*, 406, 151–164.
- García Ortega, B. (2021). *Industria 4.0. La cuarta revolución industrial*. [Libro en línea]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/353437543_Industria_40_La_cuarta_revolucion_industrial
- Liu, L., Guo, F., Zou, Z., & Duffy, V. G. (2024). Application, development and future opportunities of collaborative robots (cobots) in manufacturing: A literature review. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(4), 915–932. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2236823>
- Taesì, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT applications—Recent advances and challenges. *Robotics*, 12(3), 79. <https://doi.org/10.3390/robotics12030079>
- Courtney, P., & Gudipati, R. (2024). Automating discovery: Laboratory automation, high-throughput experimentation, diagnostics and laboratory robotics/AI. *euRobotics*. <https://eu-robotics.net/wp-content/uploads/ONLINE-v6-2024-06-laboratory-robotics-paper.pdf>
- Jiang, J., et al. (2024). Artificial intelligence and automation to power the future of chemistry. *Cell Reports Physical Science*, 5(6), 102049. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102049>
- Shashiashvili, N. (2025). Precise drug dosing technologies and robotization in clinical pharmacy. *Sociopolitologos*, 2(18). <https://doi.org/10.52340/splogos.2025.02.18>
- Musa, Y., Tantawi, K., Mikhail, M., Ma, J., Alharthi, D., Flatt, L., & Potter, L. (2025). Semiconductor manufacturing industry: Assessment, challenges, and future trends. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35222.05449>
- Xu, J., Moran, C.H.J., Ghorai, A. et al. (2025). Autonomous multi-robot synthesis and optimization of metal halide perovskite nanocrystals. *Nat Commun* **16**, 7841 <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63209-4>
- ABB. (s. f.). Product manual – IRB 14000 YuMi [PDF]. ABB AB. <https://library.e.abb.com/public/fc0d5c31604f48ed998229f626f72036/3HAC052983%20PM%20IRB%2014000-es.pdf>
- OHAUS. (s. f.). Explorer® semi-micro balances [PDF]. Recuperado de <https://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=28112>
- Krishnan, K. U., Adishes, M., Navaneethakrishnan, L., & Manjunathan, R. (2019). Calibration of micropipettes through gravimetric solution and its beneficial impact on research. *BioTechnology: An Indian Journal*, 15(5), 115.

CENAM. (2016). Guía técnica sobre trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en los servicios de calibración de recipientes volumétricos por el método gravimétrico. CENAM. https://ada.educatic.unam.mx/pluginfile.php/8005/mod_assign/intro/7.%20Guia%20CENAM%20volumen%202016.pdf

ABB. (s. f.). Operating manual – IRB 14000 YuMi [PDF]. ABB AB. <https://cdn.pennair.com/media/2023/11/3HAC052986-OM-IRB-14000-en.pdf>

ABB Robotics. (2018). Manual de referencia técnica: Instrucciones, funciones y tipos de datos de RAPID. RobotWare 6.

FEMEVAL. (s. f.). Guía de seguridad en el uso de robots industriales [PDF]. Recuperado de https://www.femeval.es/dam/jcr:fd091e5f-3c97-42fd-9981-680e8232a645/Guia_Robots.pdf

Manzur, A., & Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. Revista Mexicana de Física, 61(1), 31–34. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Universidad Veracruzana. (2022). Acetona [PDF]. <https://www.uv.mx/pozarica/cq/files/2022/04/2.-Acetona.pdf>

UNAM. (s. f.). Etanol [PDF]. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/12etanol.pdf>

Clasificación De Patrones Mioeléctricos Usando Señales EMG Con Adaptabilidad Multibrazalete Mediante Redes Neuronales Híbridas

Ximena Trujillo Arroyo^{1*}, Alberto Vázquez Cervantes¹, Leonardo Hernández-Flores¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
x.trujillo@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. Las personas con amputaciones de miembro superior afrontan desafíos funcionales y psicosociales al readaptar sus actividades diarias con la extremidad colateral y simultáneamente, dominar su prótesis inteligente que exige calibraciones frecuentes, practica intensiva y supervisión clínica continua. En los últimos años, la inteligencia artificial (IA) ha evolucionado notablemente en el reconocimiento de patrones de señales electromiográficas (EMG) multicanal, permitiendo un control protésico natural y preciso; no obstante, persisten limitaciones técnicas de entrenamiento a nivel muscular para cada usuario. Para abordar estas barreras, se propone el diseño e implementación de un software clínico-investigación que adquiere y sincroniza en tiempo real señales EMG captadas con los brazaletes Myo y Sichiray e integra un modelo híbrido de aprendizaje profundo entrenado para reconocer patrones musculares, registrando métricas fisiológicas cuantificables, mejorando la rehabilitación de las personas y teniendo la adaptabilidad en hardware con ambos brazaletes.

Palabras Clave: Amputaciones de miembro superior, inteligencia artificial (IA), señales electromiográficas (EMG), patrones musculares.

1. Introducción

El aumento global en el número de personas que sufren amputaciones ha sido un factor determinante para el impulso y desarrollo de tecnologías emergentes [1] orientadas al control de las prótesis inteligentes, entre ellas destacan la EMG, IA y programación. Estas tecnologías en conjunto buscan solucionar las diversas problemáticas que persisten en los softwares de rehabilitación actuales para pacientes con pérdida de miembro superior transradial derecho.

En este contexto, los softwares de rehabilitación son utilizados como una herramienta previa la protetización para entrenar la musculatura residual del muñón [2]: su función principal es que el paciente asocie la activación de determinados grupos musculares con gestos o comandos de movimiento. No obstante, estas soluciones presentan dos limitaciones recurrentes.

Primero, suelen restringirse a un repertorio de 6–8 patrones de movimiento, rango del estado del arte ha señalado como insuficiente [3] para preparar al usuario en tareas funcionales consideradas básicas. Segundo, algunos softwares de rehabilitación están acoplados a un único hardware [4] (brazaletes o sensor específico), lo que reduce la interoperabilidad, encarece la adopción y limita la adaptabilidad clínica.

Clasificación De Patrones Mioeléctricos Usando Señales EMG Con Adaptabilidad Multibrazalete Mediante Redes Neuronales Híbridas

Frente a ello, el presente trabajo propone el diseño, implementación y validación de un sistema multiplataforma de uso clínico e investigativo que permite la adquisición y sincronización en tiempo real de señales de electromiografía de superficie (sEMG) captadas con brazaletes disponibles comercialmente (Myo y Sichiray). Este proyecto contempla que, en etapas futuras, la salida del sistema se proyecte sobre un modelo de mano en entorno de realidad aumentada, con la capacidad de registrar métricas fisiológicas cuantificables y de habilitar la interoperabilidad con diferentes brazaletes sEMG. Estas características lo distinguen de las soluciones clínicas actualmente disponibles; no obstante, este último aspecto queda fuera del alcance del presente trabajo.

2. Objetivo

Desarrollar y validar un sistema multiplataforma para la adquisición, sincronización y clasificación de señales EMG multibrazalete, mediante un modelo híbrido de redes neuronales profundas, capaz de identificar patrones musculares funcionales en tiempo real y proyectarlos en una interfaz de realidad aumentada, con independencia del dispositivo de adquisición utilizado.

3. Metodología

Este proyecto adopta una metodología estructurada en seis etapas, dispuestas de forma secuencial para garantizar trazabilidad y rigor. Su panorama general se presenta en el visual abstract (**Figura 1**), mientras que en las subsecciones siguientes se detalla cada fase.

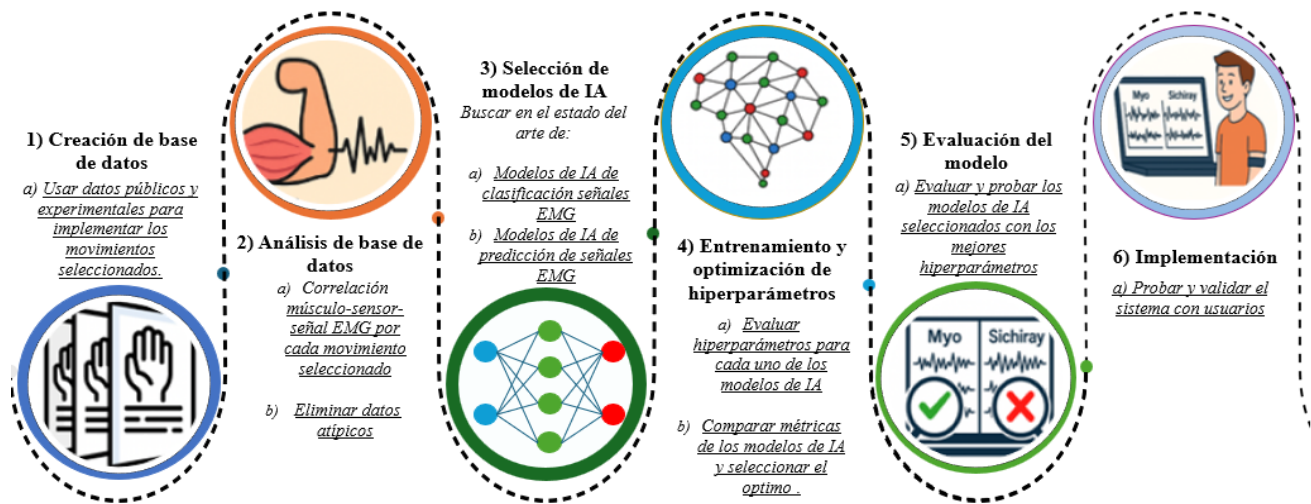


Figura. 1 Visual abstract de la metodología del proyecto

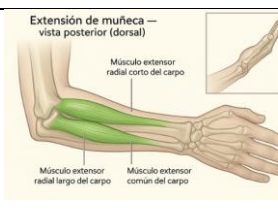
4. Resultados

4.1 Creación de bases de datos

Los resultados de esta primera fase se sustentan en la selección y evaluación de 7 patrones de movimiento básicos descritos en neurofisioterapia, aprendizaje motor y desarrollo de software [5- Clasificación De Patrones Mioeléctricos Usando Señales EMG Con Adaptabilidad Multibrazalete Mediante Redes Neuronales Híbridas

6]. Estos gestos constituyen el núcleo de la base de datos, que en la versión final se ampliarán a 15 patrones, con el fin de evitar restringir el aprendizaje del usuario y favorecer una interacción funcional, adaptable y escalable hacia nuevos gestos que favorezcan en la curva de aprendizaje del usuario y en su memoria muscular. La tabla 1 se presenta los primeros 7 movimientos incorporados al repositorio, y de los cuales a partir de estos se iniciará el análisis de los modelos de inteligencia artificial. Estos siete patrones musculares actúan como anclas de validez del sistema por ser gestos ampliamente estudiados y respaldados por softwares de rehabilitación.

Tabla 5. Gestos incorporados para la primera fase del análisis [7]

Nombre del gesto	Músculos Activados	Zona muscular activada
<u><i>Puño cerrado</i></u>	• Músculo flexor profundo de los dedos. • Músculo flexor superficial de los dedos. • Músculo flexor largo del pulgar.	 Músculo flexor profundo de los dedos Músculo flexor superficial de los dedos Músculo flexor largo del pulgar
<u><i>Palma extendida (Extensión de dedos)</i></u>	• Músculo extensor común de los dedos. • Músculo extensor largo del pulgar. • Músculo extensor corto del pulgar	 Músculo extensor común de los dedos (II-V) Músculo extensor largo del pulgar (EPL) Proyección dorsal (extensores)
<u><i>Flexión de muñeca</i></u>	• Músculo flexor radial del carpo. • Músculo flexor ulnar del carpo.	 Músculo flexor radial del carpo (FCR) Músculo flexor ulnar del carpo (FCU) Flexión de muñeca – Vista anterior (volar)
<u><i>Extensión de muñeca</i></u>	• Músculo extensor radial corto del carpo. • Músculo extensor radial largo del carpo. • Músculo extensor ulnar del carpo.	 Extensión de muñeca – vista posterior (dorsal) Músculo extensor radial corto del carpo Músculo extensor radial largo del carpo Músculo extensor común del carpo

4.2

<u>Desviación radial</u>	• Músculo extensor radial largo del carpo. • Músculo extensor radial corto del carpo. • Músculo flexor radial del carpo.	
<u>Desviación cubital</u>	• Músculo flexor ulnar del carpo. • Músculo extensor ulnar del carpo.	
<u>Oposición del pulgar</u>	• Músculo oponente del pulgar • Músculo abductor corto del pulgar • Músculo flexor corto del pulgar	

Análisis de bases de datos

La *Figura 2* muestra el posicionamiento de los brazaletes de electromiografía (EMG) en la mano derecha. Se evaluaron dos configuraciones de colocación, para captar la activación de las señales EMG de los grupos musculares objetivos. En concordancia con el estado del arte, cada patrón muscular se procesó en ventanas de 250 ms (*Figura. 3*), favoreciendo un compromiso adecuado entre resolución temporal y estabilidad para extracción de características descriptivas (media, mediana, y moda).

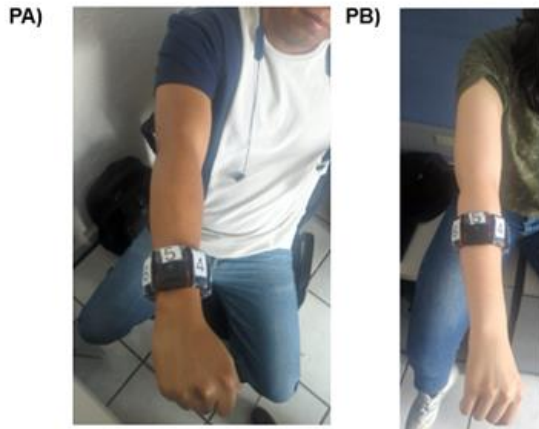


Figura. 2 Posicionamiento del brazalete

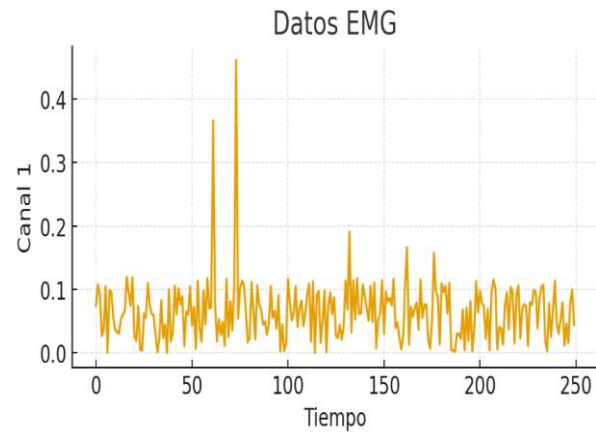


Figura.3 Señales EMG Data (Canal 1)

Además, se construyeron matrices de correlación (*Figura 4*) para examinar la activación relativa entre sensores y el movimiento. Este procedimiento permitió caracterizar la distribución de los datos, identificar relaciones intercanales y sustentar su utilidad para etapas posteriores de normalización y entrenamiento de modelos de redes neuronales.

Dado que las señales electromiográficas son sensibles a múltiples fuentes de variabilidad (*Figura 5*), se consideraron los siguientes factores:

- Ruido: Generado por artefactos como pulseras, anillos o algunos dispositivos electrónicos
- Tejido adiposo alto: Generado por un índice de masa corporal alto (IMC).
- Fatiga muscular: Generada por el sobreesfuerzo y sobre entrenamiento al realizar gesticulaciones continuas sin el tiempo adecuado de descanso.
- Impedancia: Generada por la piel del usuario por el sudor, vellos o grasa corporal.

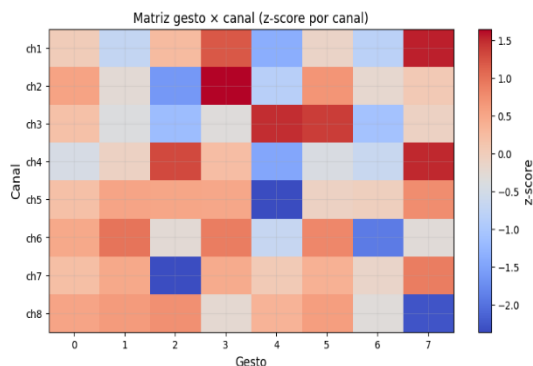


Figura.4 Matriz de correlación

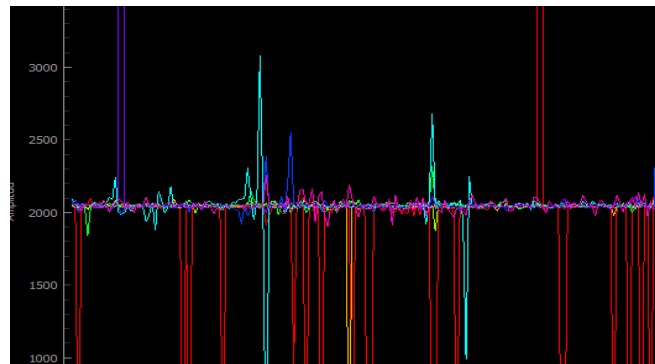


Figura.5 Señales EMG con deformación (8 canales)

4.3 Selección y diseño de modelos de IA

Con base en la revisión del estado del arte [6], se seleccionaron diferentes arquitecturas de redes neuronales orientadas al procesamiento de señales EMG. En primer término, se adoptaron las redes neuronales convolucionales (CNN) como modelo principal, dada su capacidad para identificar patrones locales en datos secuenciales y espaciales propios de la actividad muscular (patrones mioeléctricos). De forma complementaria, se evaluaron perceptrones multicapa (MLP), adecuados para establecer relaciones no lineales a partir de características estadísticas extraídas de las señales, y modelos tipo Transformers, cuya arquitectura resulta eficiente para capturar dependencias de largo alcance en series temporales, proporcionando representaciones contextuales más robustas de los gestos musculares.

El tratamiento de los datos incluyó un proceso sistemático de preprocesamiento y normalización de las señales. Bajo este esquema, se implementó un prototipo de CNN previamente reportado en la literatura y adaptado a la base de datos del brazalete Myo, alcanzando una precisión inicial aproximada del 70 %. Los modelos alternativos (MLP y Transformers) se siguen evaluando, con el propósito de evaluar el desempeño relativo de cada arquitectura en la clasificación de gestos musculares (*Figura 6*).

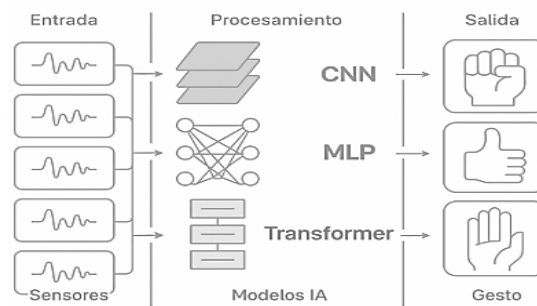


Figura 6 Esquema de reconocimiento de gestos a partir de EMG

4.4 Optimización con Optuna

Los resultados de esta subsección se emplearon en optuna para optimizar los hiperparámetros de las arquitecturas evaluadas, ejecutando búsquedas sistemáticas orientadas a elevar la precisión, la estabilidad y la capacidad de generalización de los modelos de inteligencia artificial.

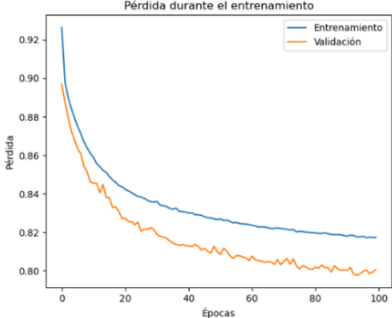
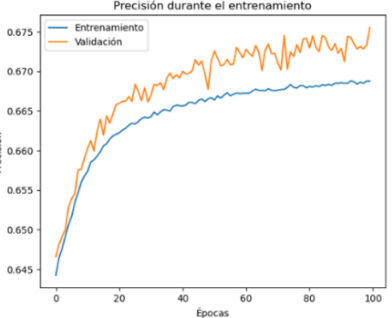
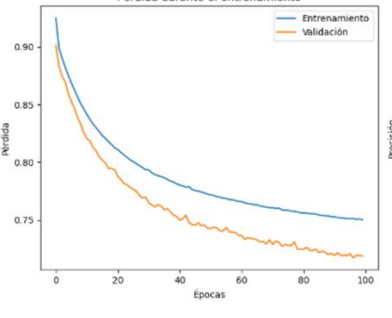
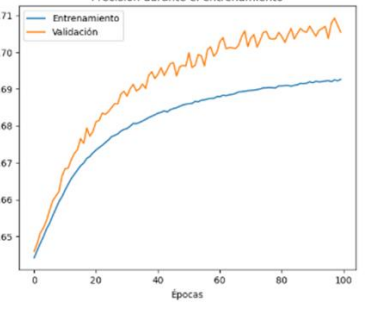
En la CNN se ajustaron el número de épocas, la tasa de aprendizaje, el tamaño de lote, la cantidad y el tamaño de filtros, la función de activación y la profundidad convolucional, con el fin de maximizar la extracción de rasgos especiotemporales de la EMG. Para la MLP se exploraron el número de capas ocultas y de neuronas por capa, las funciones de activación, los esquemas de regularización (*dropout* y *L12*) y el optimizador, mejorando el procesamiento de características estadísticas derivadas de los registros. Finalmente, para los transformadores se configuraron el número de cabezas de atención, la dimensión de la incrustación, la profundidad del codificador, la

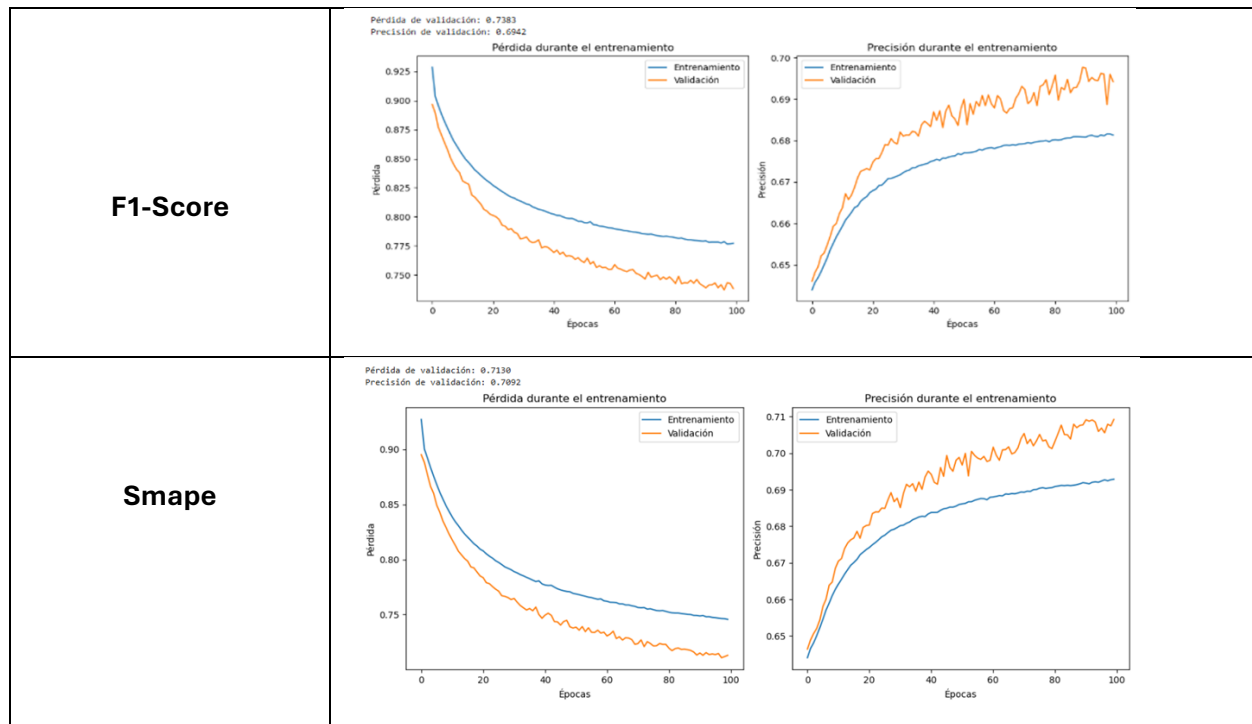
tasa de desactivación (*dropout*) y el tamaño de la ventana de atención, con el fin de aprovechar el mecanismo de autoatención en la captura de dependencias de largo alcance entre canales.

El ajuste de hiperparámetros sirve para controlar la capacidad del modelo y evita tanto el subajuste como el sobreajuste, optimizar la convergencia (velocidad y estabilidad) mediante tasa de aprendizaje y tamaños de lote adecuados, mejorar la generalización a través de regularización y validación sólidas, aumentar la robustez reduciendo la varianza entre corridas y ganar eficiencia computacional al equilibrar coste y rendimiento. Además, permite alinear el modelo con la naturaleza de la tarea; en EMG, la selección de ventanas de 250 ms ofreciendo un compromiso apropiado entre resolución temporal y estabilidad para la extracción de rasgos.

Para la validación se utilizaron métricas ya consolidadas en la literatura y ampliamente empleadas en electromiografía (EMG), *Tabla 1*, para evaluar el desempeño de modelos de reconocimiento de gestos: *accuracy*, *RMSE*, *F1-score* y *smape*. Tras es el ajuste con optuna, el *accuracy* paso de 67.56% a 72.26%; el *RMSE* se mantuvo en 70.55 % con pérdidas de validación más estable; el *F1-score* alcanzo 69.42% y el *smape* registró 70.92%. Estas métricas son complementarias: *accuracy* refleja la proporción de aciertos globales; *F1-score* equilibra precisión y exhaustividad en clases potencialmente desbalanceadas; *RMSE* captura la magnitud promedio del error y finalmente *smape* que cuantifica el error porcentual simétrico robusto a escalas.

Tabla 1. Métricas de optimización para hiperparámetros

Métrica de evaluación	Graficas obtenidas del modelo
Accuracy	Pérdida de validación: 0.8005 Precisión de validación: 0.6756 Pérdida durante el entrenamiento  Precisión durante el entrenamiento 
RMSE	Pérdida de validación: 0.7185 Precisión de validación: 0.7055 Pérdida durante el entrenamiento  Precisión durante el entrenamiento 



4.5 Evaluación comparativa

En los experimentos realizados, la arquitectura de red neuronal de la *CNN* optimizada tomando *Smape* y *accuracy* como métricas objetivas mostró el mejor compromiso en rendimiento y consistencia, mientras que las evaluaciones con *RMSE* y *F1-score* arrojaron desempeños intermedios. La metodología demostró la factibilidad de integrar señales EMG procedentes de los brazaletes electromiográficos (Myo y sichiray) en un sistema de IA multiplataforma, con adaptación entre sujetos y frente a la variabilidad fisiológica. En conjunto, la optimización de hiperparámetros con optuna potenció la capacidad predictiva, la robustez y la generalización de arquitecturas, reforzando su aplicabilidad al reconocimiento de patrones musculares en EMG.

4.6 Implementación

Los resultados de esta primera etapa se pueden visualizar en las Figura 7 y Figura 8, en donde se establece como tal el proceso de captura y respuesta electromiográfico por el gesto “Puño cerrado”. La Figura 7 muestra la postura estandarizada y empleada durante la adquisición de la señal (muñeca neutra y flexión de los dedos durante 5 segundos cumpliendo con el protocolo establecido para la adquisición de las señales), esta condición es necesaria para lograr la repetibilidad evitando así distorsión de la señal.

La figura 8 presenta el registro EMG multicanal correspondiente del usuario, que tras un preprocesamiento convencional como lo son filtrado, normalización de datos y segmentación en ventanas de 250 ms, se logran observar ráfagas periódicas de alta amplitud durante la fase de

contracción, compatibles con la activación muscular de la zona, seguido de retornos a líneas base en la relajación.

La coherencia entre canales y la estabilidad del patrón establecen una colocación adecuada en la banda de electrodos y una relación señal-ruido eficiente para la extracción de características para su posterior clasificación mediante el modelo de IA.



Figura 7 Gesto implementado (Puño)

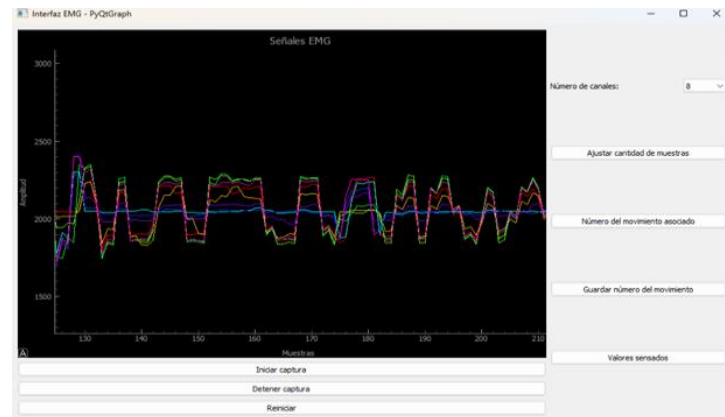


Figura 8 Patrón mioeléctrico generado por el gesto implementado

5. Conclusiones

La propuesta metodológica describe el proceso de normalización de señales EMG procedentes de distintos dispositivos y un modelo híbrido orientado a entornos de rehabilitación. El modelo CNN reduce de manera significativa la carga de recalibraciones, mejora la fiabilidad en el reconocimiento de gestos y agiliza su implementación en escenarios clínicos y de investigación. El sistema propuesto contribuye al campo del control mioeléctrico al ofrecer un reconocedor desacoplado del hardware, capaz de adaptarse a diversas plataformas de adquisición sin necesidad de rediseñar el núcleo de clasificación.

La aplicación de este enfoque garantiza una mayor reproducibilidad experimental y una menor dependencia de condiciones específicas de calibración, lo que incrementa la robustez frente a variaciones inter-sujeto e inter-sesión. Los análisis exploratorios realizados sobre la base de datos demuestran la existencia de patrones consistentes entre canales, una distribución equilibrada de clases en la mayoría de los gestos y la presencia de correlaciones inter-electrodo que podrán aprovecharse en un trabajo a futuro si se desea implementar un modelo en realidad aumentada.

Referencias

Yuan, B., Hu, D., Gu, S., Xiao, S., & Song, F. (2023). The global burden of traumatic amputation in 204 countries and territories. *Frontiers in Public Health*, 11, 1258853. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1258853>

Rodríguez, K. A., Moreira, J. V. da S., Pinheiro, D. J. L. L., Dantas, R. L. M., Santos, T. C., Nepomuceno, J. L. V., Nogueira, M. A. R. J., Cavalheiro, E. A., & Faber, J. (2022). Embodiment of a virtual prosthesis through training using an EMG-based

human-machine interface: Case series. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 870103. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.870103>

Lee, K. H., Min, J. Y., & Byun, S. (2021). Electromyogram-based classification of hand and finger gestures using artificial neural networks. *Sensors*, 22(1), 225. <https://doi.org/10.3390/s22010225>

Pizzolato, S., Tagliapietra, L., Cognolato, M., Reggiani, M., Müller, H., & Atzori, M. (2017). Comparison of six electromyography acquisition setups on hand movement classification tasks. *PLOS ONE*, 12(10), e0186132. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186132>

Ninapro. (n.d.). Ninapro. Recuperado el 17 de agosto de 2025, de <https://ninapro.hevs.ch/>

Dorgham, M. (2024). Hand movement classification based on EMG signals using machine learning and deep learning [GitHub repository]. GitHub. <https://github.com/mhmdorgham/Hand-Movement-Classification-based-on-EMG-Signals-using-Machine-learning-and-Deep-learning>

Frank H. Netter, M. (2007), *Atlas de anatomía humana*. Barcelona: Elsilver.

Control Milimétrico De Cobots Mediante Comandos De Voz

Ángel Gabriel Salinas Martínez^{1,*}, Heber Isidro Morales Lugo¹ y Ángel Iván García Moreno¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

*angel.salinas@cidesi.edu.mx

Resumen. La interacción entre humanos y robots, también conocida como HRI por sus siglas en inglés, ha evolucionado en los últimos años, dejando de lado las interfaces físicas tradicionales y adoptando nuevas modalidades que permiten una interacción natural y de forma remota. El reconocimiento automático del habla o ASR por sus siglas en inglés, es una de las principales tecnologías que se han explorado para su integración en estas nuevas modalidades, ya que elimina la necesidad de conocimientos técnicos especializados en programación de robots y ofrece ventajas operativas clave, como la posibilidad de corregir de inmediato las trayectorias mal planificadas o realizar ajustes en tiempo real para compensar desviaciones causadas por condiciones imprevistas durante su generación. Esta flexibilidad reduce los tiempos de reconfiguración e incrementa la seguridad de los operadores al minimizar el contacto físico directo. Este trabajo propone un sistema de HRI utilizando el ASR para controlar con precisión milimétrica los movimientos de un robot colaborativo (cobot) UR3e en un entorno de manufactura de PCB's (Printed Circuit Board). Para ello, se emplea un modelo pre-entrenado de Vosk y se evalúa el desempeño de la HRI mediante un enfoque cuantitativo, en el que distintos usuarios emiten comandos verbales de diversas formas para indicar al cobot la dirección en la que debe moverse.

Palabras Clave: Reconocimiento de voz, Interfaces humano-robot, Robots colaborativos.

1. Introducción

Actualmente, en Industria 4.0, los sistemas de manufactura han evolucionado hacia entornos cada vez más flexibles e inteligentes. Esta transformación ha impulsado la necesidad de sistemas de HRI más naturales e intuitivos, entre los cuales destaca el uso de comandos de voz como medio de interacción directa con los sistemas industriales (Rogowski et al., 2020). Si bien existen diversos enfoques para el control de robots mediante lenguaje natural, la mayoría de las propuestas se han limitado a tareas de manipulación básica o interacción contextual, sin abordar con profundidad los desafíos asociados a la programación de trayectorias con precisión milimétrica o a la integración en celdas reales de manufactura (Yengantiwar et al., 2023; Köttler et al., 2025). Esta limitación es relevante en operaciones donde el robot debe trasladar materia prima hacia distintas estaciones del proceso productivo. En estas etapas, aun con trayectorias pre-programadas, los robots suelen requerir ajustes manuales para posicionar el material con exactitud sobre racks con dimensiones estrictas, lo que incrementa los tiempos de ciclo y depende principalmente de la percepción visual del operador.

En el Laboratorio Nacional de Investigación en Tecnologías Digitales (LANITED) se ha desarrollado una celda de manufactura para la producción de prototipos PCB's que integra procesos automatizados de maquinado, aplicación de pasta, montaje y refluído. Dentro de esta celda, el traslado de la materia prima entre estaciones es la premisa que se tiene para la continuidad sin paradas de la producción, ya que un desajuste de pocos milímetros puede afectar la alineación en etapas posteriores y comprometer la calidad del producto.

Este estudio presenta el desarrollo y la implementación de un sistema de control milimétrico para cobots a través de comandos de voz. Esta propuesta se valida en el LANITED mediante el uso de la celda de PCBs como banco de pruebas experimental, demostrando su capacidad para resolver el problema del ajuste manual al permitir que el operador indique desplazamientos precisos en lenguaje natural, sin necesidad de mover físicamente el cobot.

2. Materiales y métodos

La estrategia propuesta detalla el proceso para desarrollar una HRI que permite controlar el movimiento de un cobot UR3 con resolución milimétrica mediante comandos de voz. La estrategia comprende tres fases, las cuales se describen gráficamente en la Figura 1.



Figura 1. Fases para el desarrollo de la HRI mediante comandos de voz.

Fase 1: Entrada

La unidad de entrada consiste en un micrófono YEYIAN con cancelación de ruido ambiental y una frecuencia de muestreo de 192kHz, lo que garantiza una captura clara de comandos de voz. El micrófono está posicionado a una distancia óptima de 30 cm del usuario para maximizar la relación señal-ruido (SNR).

Fase 2: Procesamiento

La unidad de procesamiento se divide en dos, una mini PC intel NUC y el controlador del robot compuesto por la caja de control (control box) y el teach pendant. Las especificaciones técnicas de cada unidad están descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de unidades de procesamiento.

Especificación	Mini PC NUC	Controlador UR
Procesador	Intel Core i7 de 11ª generación	Intel Celeron 1047UE Dual-Core
Memoria RAM	64 GB	4 GB
Almacenamiento	2 TB SSD	16 GB SSD
Sistema Operativo	Windows 10	Linux (Polyscope)

Sobre la mini PC NUC se ejecuta un programa en C# que utiliza el modelo de reconocimiento de voz Vosk (vosk-model-small-es-0.42), el cual soporta comandos en español con alta precisión (Sorolla Bayod, 2025). Los comandos se traducen en instrucciones que se escriben en tres registros del controlador del cobot. Cada valor escrito en los registros representa milímetros de desplazamiento. Los registros tienen las siguientes funciones:

- **Registro 0:** Controla el eje 'Z' y acepta valores positivos para arriba y negativos para abajo.
- **Registro 1:** Controla el eje 'Y' y acepta valores positivos para derecha y negativos para izquierda.
- **Registro 2:** Controla el eje 'X' y acepta valores positivos para enfrente y negativos para atrás.

En el controlador del cobot se ejecuta un programa que monitorea continuamente los tres registros. Al detectar un cambio en alguno de ellos, envía un comando de movimiento al robot mediante URScript (lenguaje nativo de robots UR). De esta manera, el controlador se convierte en el elemento clave que traduce los comandos provenientes del procesamiento de voz en acciones precisas sobre el cobot, garantizando que cada instrucción verbal se materialice en un movimiento con la magnitud y dirección deseadas.

Fase 3: Salida

El cobot UR3 es el actuador final que ejecuta movimientos cartesianos precisos en respuesta a los valores escritos en los registros del controlador. Su operación se restringe exclusivamente a traslaciones lineales en los ejes X, Y y Z, sin contemplar rotaciones (roll, pitch, yaw).

Los desplazamientos toman como referencia el sistema de coordenadas de la base del cobot (frame base), asegurando que los movimientos sean absolutos y consistentes con el entorno de trabajo. La velocidad de movimiento es una constante predefinida en el programa ejecutado por el controlador.

3. Resultados

En esta sección se describen los resultados del desarrollo del sistema de control milimétrico mediante comandos de voz. Primero, se detalla el funcionamiento de la aplicación que se encarga de hacer el reconocimiento de comandos verbales, posteriormente el funcionamiento del programa que monitorea continuamente los registros que permiten realizar un movimiento sobre el cobot y finalmente la validación de la eficiencia del sistema.

Sobre la mini PC NUC corre una aplicación de consola (CLI) que inicialmente se conecta al controlador del cobot mediante el protocolo RTDE (Real-Time Data Exchange) para suscribirse a los tres registros del controlador que se asocian a un eje cartesiano específico. La elección del protocolo RTDE se sustenta en su capacidad para acceder y actualizar los registros del controlador con frecuencias de hasta 500 Hz, lo que garantiza una comunicación en tiempo real y confiable entre la mini-PC y el cobot en contraste con la habilitación de sockets TCP/IP cuya transmisión de comandos se da a menor frecuencia.

La aplicación integra un modelo Vosk para el reconocimiento de voz en tiempo real. Cuando el modelo detecta un comando de movimiento, se extraen dos parámetros clave de la oración reconocida: la dirección (ej. "arriba", "derecha") y la magnitud/distancia (en milímetros), utilizando expresiones regulares y un diccionario de palabras a números para interpretar valores tanto numéricos como textuales (ej. "cinco" → 5 mm). Posteriormente, tomando como referencia la dirección, se hace una validación para determinar si la magnitud se considera positiva o negativa. Finalmente, la magnitud (convertida a metros) se escribe en el registro correspondiente. Para garantizar estabilidad, los registros se reinician a 0 después de cada operación. En la figura 2 se muestra el flujo correspondiente a lo anteriormente descrito.

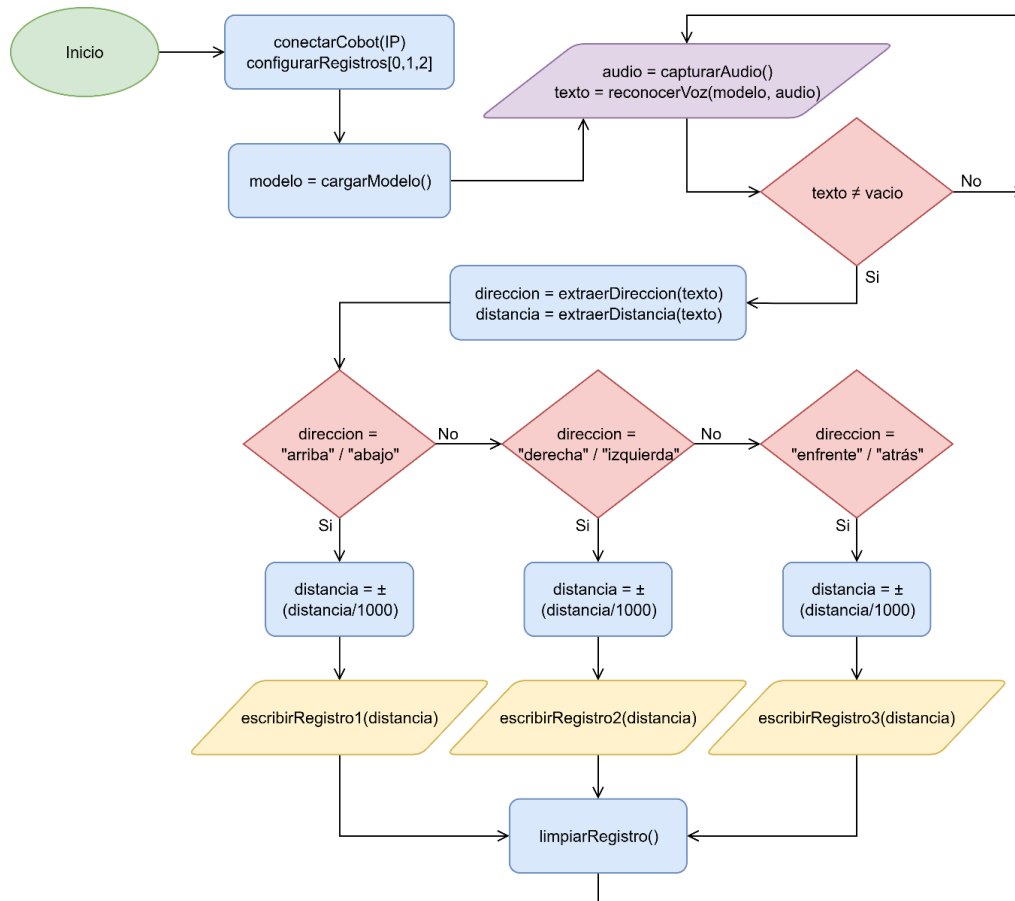


Figura 2. Flujo de la aplicación que ejecuta el modelo de reconocimiento de voz.

El programa que se ejecuta directamente en el controlador del cobot (ver figura 3) tiene como función principal leer en tiempo real los registros de entrada y convertir esos valores en movimientos relativos del robot considerando el sistema de referencia base del mismo y la posición de la herramienta. Las variables var_x , var_y y var_z se relacionan a los registros RTDE correspondientes a los ejes cartesianos X, Y y Z, expresados en metros.

Para detectar cambios, se mantienen copias internas de estas variables (var_1 , var_2 , var_3) que se comparan en un bucle continuo. Cuando alguno de los valores leídos difiere de su copia, el sistema interpreta que hay un nuevo comando pendiente de ejecutar. En ese momento, el programa actualiza las copias, calcula la nueva posición objetivo del efector final a partir de la posición actual de la herramienta ($obtenerPoseTCP()$) y un desplazamiento definido con $pose()$, fijando únicamente traslación y manteniendo sin cambios la orientación de la herramienta para, finalmente, obtener una posición resultante dadas la suma de la pose actual con el desplazamiento calculado ($sumarPose()$) y el robot se mueve de forma lineal relativa hacia la nueva posición ($mover()$).

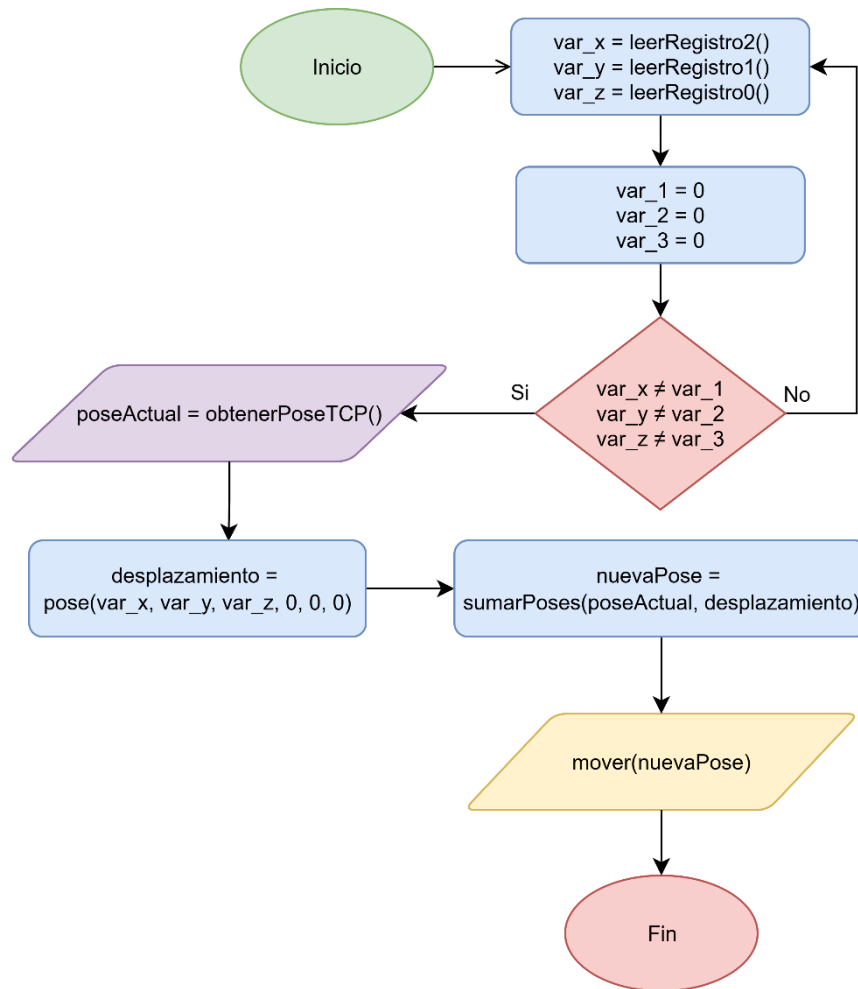


Figura 3. Flujo del programa que se ejecuta en el controlador del cobot.

El sistema de HRI basado en ASR fue evaluado mediante pruebas con 20 usuarios, cada uno realizando 10 repeticiones de comandos de voz con variaciones en su pronunciación y estructura lingüística. Los resultados demostraron que el modelo Vosk interpretó correctamente los comandos, con una precisión de 99.33% para reconocer las direcciones (ver figura 4 a)) y 98.75% para reconocer distancias (ver figura 4 b)). Además, los usuarios destacaron la intuitividad del sistema y su capacidad para corregir errores mediante instrucciones verbales simples, validando su usabilidad en entornos de manufactura.

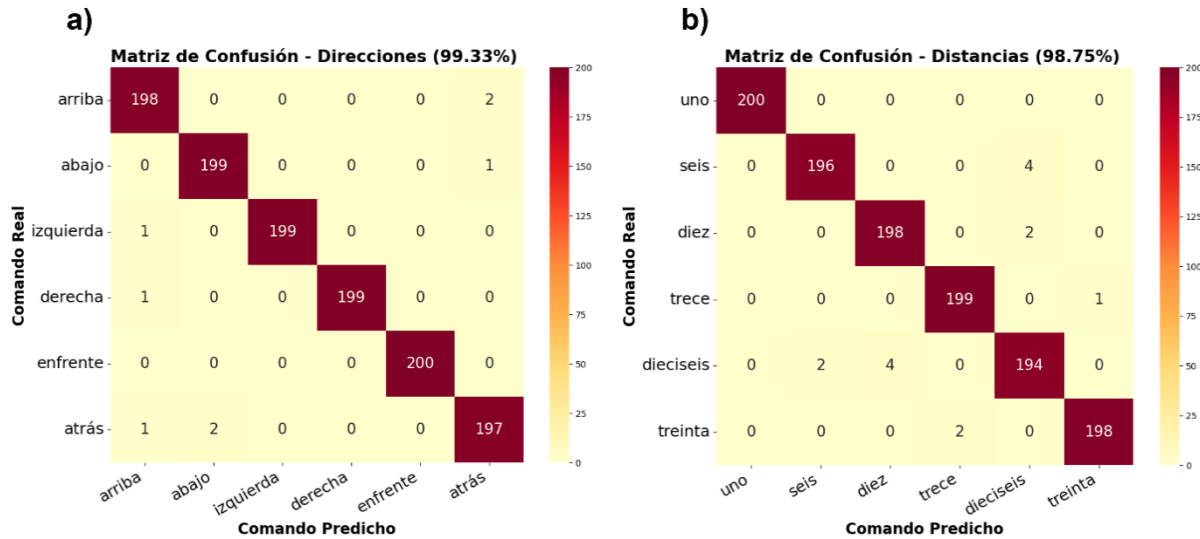


Figura 4. Evaluación del rendimiento del sistema de HRI.

4. Conclusiones

Al implementar un sistema de control por voz con precisión milimétrica mediante el modelo Vosk, se obtuvo una interfaz intuitiva que elimina barreras técnicas y mejora la interacción humano-robot. Además, el uso de expresiones naturales para definir direcciones y magnitudes de desplazamiento permite prescindir de la navegación por botoneras o teach pendant, reduciendo tanto los tiempos muertos como la complejidad de la programación de robots para usuarios sin experiencia.

Como parte del control del cobot, se logró habilitar una nueva funcionalidad que permite su operación de forma no tradicional. Si bien el alcance del proyecto fue principalmente demostrativo, enfocado en un caso de uso específico dentro del LANITED, la implementación abre la posibilidad de extender esta capacidad para el guardado de posiciones y su posterior reproducción como trayectorias cortas, estableciendo así un principio de programación rápida para el cobot.

En cuanto a trabajos futuros, se plantea la incorporación del control radial de la posición final de la herramienta, con el fin de completar las seis condiciones cartesianas necesarias para definir un vector de posición, otorgando así una mayor versatilidad al ajustar la orientación de la herramienta durante las tareas de manipulación. Asimismo, se propone evaluar el sistema en un entorno real y aplicar procesos de fine tuning al modelo de reconocimiento de voz, con el propósito de robustecer su desempeño y garantizar su fiabilidad en escenarios de producción más exigentes.

Agradecimientos: Agradecemos al Laboratorio Nacional de Investigación en Tecnologías Digitales (LANITED) por proporcionarnos el espacio y la infraestructura necesaria para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado por el proyecto F003-322609 (LANITED).

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Sika, K., Abinеш, A., Harideepan, N., & Saravanan, K. (2024). Interactive control of a robotic arm using voice recognition. *Journal of Electronics and Informatics*, 6(3), 240–252. <https://doi.org/10.36548/jei.2024.3.003>
- Rogowski, A., Bieliszczuk, K., & Rapcewicz, J. (2020). Integration of Industrially-Oriented Human-Robot Speech Communication and Vision-Based Object Recognition. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(24), 7287. <https://doi.org/10.3390/s20247287>
- Kötter, D., Teknetas, D., Kolditz, M., Petrovic, O. & Brecher, C. (2025). Flexible voice control for collaborative robotics. *at - Automatisierungstechnik*, 73(5), 341-351. <https://doi.org/10.1515/auto-2025-0008>
- Sorolla Bayod, V. (2025). Desarrollo de un sistema conversacional con IA para el control de drones mediante voz (Trabajo de Fin de Grado). Universitat Politècnica de Catalunya.

Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores

Berenice Rodríguez Angeles¹, Luis Ángel Jiménez López¹, Rolando Javier Venegas Camarena¹, Jorge Armando Ramírez Barcenas¹, Jesús Javier Alcantar Peña¹, Carlos Tovar Albarrán¹ y Juan Manuel González Carmona¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
juan.gonzalez@cidesi.edu.mx

Resumen. Este trabajo se centra en el diseño e implementación de equipos modulares de evaporación térmica, diseñados para la enseñanza de los procesos de fabricación de recubrimientos de materiales metálicos y semiconductores. El objetivo es desarrollar un sistema rentable, escalable y adaptable que permita a estudiantes e investigadores adquirir experiencia práctica con técnicas de deposición de películas delgadas, un proceso crucial en microelectrónica, optoelectrónica e ingeniería avanzada de materiales. El sistema propuesto cuenta con una arquitectura modular, que permite la personalización y flexibilidad en diferentes configuraciones de deposición, incluyendo configuraciones de fuente única, fuente múltiple y co-evaporación. Integra sistemas de control automatizados, monitorización de procesos en tiempo real y herramientas de caracterización in situ para mejorar la precisión y la reproducibilidad. Además, incorpora funciones de operación remota e interfaces digitales, lo que lo convierte en una herramienta innovadora para la formación en semiconductores modernos. Con el desarrollo de esta tecnología propietaria, se busca reducir la dependencia de sistemas importados, fomentar la soberanía tecnológica y mejorar la experiencia nacional en técnicas de procesamiento de semiconductores. La implementación sigue una hoja de ruta estructurada, Sin embargo en esta primera etapa se muestra el diseño de detalle y el diseño conceptual, para la posterior creación de prototipos, las pruebas, la optimización y finalmente la implementación en instituciones educativas y de investigación. Esta iniciativa conecta el conocimiento teórico con la aplicación práctica, preparando a los futuros ingenieros y científicos para los avances más vanguardistas en microelectrónica y nanotecnología, a la vez que fortalece la infraestructura nacional para la investigación y la innovación en semiconductores.

Palabras Clave: Evaporación térmica, semiconductores, recubrimientos delgados.

1. Introducción

Los equipos de evaporación térmica son ensambles versátiles y simples para la generación de recubrimientos delgados de materiales metálicos y semiconductores. La evaporación térmica es un método que permite generar vapor de un material al calentarlo. Su principio físico corresponde al efecto de calentamiento de Joule, donde se hace pasar una corriente eléctrica a través de un

Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores

recipiente, el cual se calienta evaporando su contenido. Este procedimiento se debe realizar en alto vacío, básicamente por dos razones: i) al eliminar las moléculas de la atmosfera, los elementos evaporados pueden recorrer una gran distancia sin sufrir de choques o sin ser dispersados y llegar al sustrato para generar islas que luego coalescen y ii) promover la pureza del material depositado y controlar su composición y microestructura.

Teniendo esto en cuenta, un sistema de evaporación cuenta con mínimo los siguientes sistemas:

- Sistema de vacío. El sistema de vacío se compone de: a) un reactor: este debe tener el suficiente volumen para albergar el portamuestras (con o sin sistema de calentamiento y/o rotación), según sea el caso las celdas de efusión, canoas o evaporador por haz de electrones o de iones, un monitor de espesores, puertos para sistemas de bombeo, gases de trabajo y de venteo, sensores, sistema eléctrico, puertos ópticos u otros necesarios para el monitoreo del proceso de evaporación. Adicionalmente, deberá ser lo suficientemente robusto para sostener la presión de trabajo sin sufrir fatiga (térmica y mecánica) y ser resistente a la corrosión. Finalmente debe mantener un acabado final con bajas rugosidades ($0.8 \leq Ra \leq 1.2 \mu m$), debido a que las asperezas incrementan el ángulo de contacto con sustancias acuosas y hacen que el sistema de bombas pierda eficiencia.
Se han utilizado dos tipos de materiales para generar reactores para evaporación térmica: Campana transparente de pirex, ideal para enseñanza, fácil de limpiar, temperaturas del sustrato $< 200^\circ C$. Campana metálica típicamente de acero inoxidable: versátil, modificable y modulable, resistente a la temperatura y a la corrosión, temperatura del sustrato hasta de $350^\circ C$ (temperaturas superiores necesitan sistema de enfriamiento).
- Sistema de bombeo: El sistema de bombeo se compone de dos etapas, la primera se encarga de la generación de vacío en el régimen viscoso ($\sim 10^{-2}$ mbar), generalmente se utilizan bombas mecánicas de paletas. La segunda etapa se encarga de la generación de vacío en su régimen molecular ($> 10^{-2}$ mbar), generalmente compuesto de una bomba turbomolecular, una bomba difusora, una bomba criogénica o una combinación. La presión de trabajo de un sistema de evaporación para dispositivos semiconductores está entre 10^{-6} y 10^{-11} mbar.
- Compuerta de control: Permite controlar el flujo de gas desde el reactor hasta el sistema de bombeo de alto y ultra-alto vacío y proteger las bombas de gradientes de presión que pueden deteriorar su funcionamiento.
- Sistema de temperatura: permite incrementar la temperatura del reactor (y del sustrato), especialmente útil cuando se desea alta homogeneidad del recubrimiento. Indispensable si se desea llegar a presiones por debajo de 10^{-6} mbar. Este puede hacerse por medio de lámparas (incremento puntual de la temperatura) o por medio de resistencias (incremento global de la temperatura del reactor).
- Sistema de enfriamiento: Cuando se utiliza un sistema para incrementar la temperatura del sustrato o del reactor, es indispensable refrigerar el reactor con el fin de evitar la fatiga térmica. Es indispensable usarlo cuando se deposita material con temperaturas superiores a los $250^\circ C$. El enfriamiento se puede hacer por aire o por agua, siendo el enfriamiento por agua el más eficiente.

- Sistema de evaporación: Este sistema se encarga de entregar la potencia necesaria para que el material se evapore. Consta de una fuente de corriente eléctrica, que debe encontrarse entre los 10 y 100 A y con una potencia final (que depende del material a evaporar) de al menos 10 kW. Dentro del sistema de evaporación se encuentra el elemento que sostiene el material a evaporar o la materia prima del recubrimiento. Este puede venir en forma de crisol o canoa, caja o filamento. Sin embargo, los elementos más comunes son los filamentos, las canoas o botes (para materia prima en pelets o filamentos) y las celdas de efusión (para materia prima líquida). Otros sistemas de evaporación más complejos se pudieran clasificar como: Evaporación por haz de electrones, evaporación por haz de iones y evaporación por láser.
- Sistema de monitoreo y control: En el sentido de monitorear el proceso de evaporación, se hacen necesarios una serie de sensores y sus controladores:
- Sensores de presión: Es necesario determinar de forma precisa los valores de presión de trabajo. Debido al amplio rango de presión a trabajar, es posible combinar sensores tipo pirani, cátodo frío, tipo penning o manómetros capacitivos. El rango de presión a medir para la evaporación térmica es desde 1000 mbar a 10⁻¹¹ mbar. Idealmente, se necesitaría tener medidas representativas para controlar la presión del reactor y la sesión a la salida de la bomba de medio y alto vacío (ya sea una bomba turbomolecular, difusora o criogénica), esto con el fin de proteger el funcionamiento de las bombas.
- Sensores de monitoreo de espesor:
 - Sensores de flujo: los cristales de cuarzo se utilizan con un circuito oscilador para determinar la tasa de deposición, utilizando la densidad y el factor Z de cada material.
 - Espectroscopia de emisión inducida por electrones (EIES): Analiza la longitud de onda y la intensidad de la luz emitida por la recombinación de un electrón y un ion.
 - Medidor de ionización (ionization gauge): determina la presión del haz de material depositado directamente en la posición del depósito.
 - Espectroscopia de masa: toma una muestra del flujo de material por elementos individuales.
 - Difracción de electrones por reflexión de alta energía (RHEED): Determina la tasa de depósito, el espesor de la película y su parámetro de red.
 - Elipsometría: mide el cambio de la polarización de la luz cuando se refleja en la superficie del material. Permite determinar el espesor y la constante dieléctrica in-situ. Adicionalmente permite trabajar con multicapas.

2. Requerimientos

Los requisitos del sistema de evaporación térmica descrito en este trabajo se derivaron directamente de una revisión bibliográfica exhaustiva de la técnica (su alcance y limitaciones), así como de un estudio de mercado y un análisis comparativo de equipos comerciales líderes en la industria. La revisión bibliográfica abarcó artículos de revisión y estudios técnicos que detallan los principios físicos subyacentes, las fuentes de evaporación, la compatibilidad de los materiales y las condiciones operativas típicas necesarias para obtener películas delgadas homogéneas y reproducibles. Este proceso permitió la identificación de las especificaciones técnicas mínimas. Paralelamente, el estudio de mercado incluyó un examen de catálogos y hojas de datos de

fabricantes establecidos (p. ej., Kurt J. Lesker, Angstrom/Korvus y otros), un análisis de las tendencias comerciales en los mercados de PVD y evaporación (incluyendo el tamaño del mercado, el crecimiento y los requisitos industriales) y una comparación de las configuraciones ofrecidas por los fabricantes (canoas/crisol, integración de caja de guantes, módulos de haz de electrones, automatización y software). Esta comparación permitió que las necesidades académicas y de instrucción (flexibilidad, seguridad y facilidad de operación), así como las necesidades industriales (reproducibilidad, escalabilidad y mantenimiento), se tradujeran en requisitos de sistema mensurables y priorizados.

Los principales requerimientos encontrados fueron: El equipo de evaporación térmica debe ubicarse en un espacio cerrado y semi limpio. El área recomendada de trabajo deberá ser de 2.5 m x 2.5 m, así mismo contar con instalación eléctrica de 120 V a 24 V para su conexión y funcionamiento. Voltaje de instalación: 120 a 24 Volts.

El equipo de evaporación térmica deberá contar con un sistema de tierra física (alto voltaje) incorporado en la bancada del sistema. Las dimensiones de la envolvente del equipo de evaporación térmica evaporador deberán ser: 1550 mm largo x 850 mm ancho x 1600 mm alto.

La bancada del sistema de evaporación deberá construirse con perfil tubular de acero (PTR – color TBD) de 5x5 cm, cuyas dimensiones deben ser 1550 mm largo x 850 mm ancho x 1000 mm alto (de piso a parte superior de la bancada). Deberán incluirse 8 soportes inferiores que resistan el peso de los subsistemas mecánicos y comerciales.

La cámara de vacío deberá tener las siguientes características:

- El material de la cámara deberá ser acero inoxidable 304.
- El factor de seguridad (F.S) en la cámara de vacío debe ser de 3.5.
- El espesor de las paredes de la cámara deberá ser de 1.58 cm.
- La arquitectura o forma de la cámara deberá ser en forma rectangular con dimensiones interiores de 670 mm de largo, 300 mm de ancho y 300 mm de fondo.
- La cámara deberá ser hermética y lograr un alto vacío de 10^{-6} mbar.
- El acabado superficial interior deberá ser de Ra 0.8 μm .
- Acabado de superficies interiores: Sandblastado fino y electropulido Ra 0.8
- El acabado superficial de alta calidad facilita alcanzar el vacío requerido sin atrapar moléculas de gas en sus irregularidades.
- La cámara en su interior debe tener 2 láminas de acero inoxidable por cada cara y cada lámina debe sujetarse mediante tornillería, ya que para los periodos de mantenimiento las láminas deberán removerse para su posterior limpieza.
- Los tornillos que sujetan las láminas interiores, deben tener un barreno central de 2 mm, pasado a lo largo del tornillo.
- Las láminas laterales en el interior de la cámara deberán tener rejillas con periferia circular. Evitar que durante el proceso las partículas dañen la bomba turbo molecular.

Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores

- La cámara deberá tener un sistema de izaje para manipulación.
- Deberá incorporarse un o-ring de viton (diámetro 5.33 mm nominal).
- Deberá incorporarse en cada puerto pasa muro un sello de viton y/o cobre según sea la necesidad.
- La cámara de vacío deberá contar con 10 puertos pasamuros, se especifican los siguientes:
 - Pasamuro extendible manual (portasustrato),
 - Pasamuro termopar,
 - Pasamuro rotatorio manual,
 - Best plate 1 in - poste de evaporación,
 - Best plate 1 in - sensor de espesor,
 - Pasamuro Compuerta de alto vacío manual,
 - Sensor de presión.
 - Pasamuro de fluido (gases),
 - Pasamuro de sobrepresión/venteo,
 - Pasamuro mirilla,

La envoltura interior quedará definida por el tamaño de oblea de 10.16 mm de diámetro, considerando espacios para los electrodos y sensores, deberá contar con una lámina de obturación que rote en el interior.

Respecto a las condiciones de operación la cámara evaporadora deberá cumplir con lo siguiente:

- El tiempo en alcanzar el vacío deberá ser de 24 horas.
- La temperatura de operación deberá ser de 50° a 2000° Celsius.
- La presión de operación deberá ser de (10^{-6} mbar).
- Los únicos materiales que deberán utilizarse para producir los recubrimientos delgados dentro de la cámara de vacío serán:
 - Aluminio (Al) – pellets.
 - Oxido de Aluminio (Alúmina) – pedaceria
 - Cromo (Cr) – Pedaceria.
 - Oxido de Cromo - pedaceria
 - Silicio (Si) puro pedaceria (random).
 - Oxido de Silicio pedaceria.

- Temperatura de evaporación de los materiales de trabajo: según tabla 1.
- La cantidad de pellets o pedacería de materiales que debe incorporarse en cada canoa, deberá ser de 1 a 2 gramos por material recubrimiento.
- El tiempo de operación para cada recubrimiento deberá ser de 4 horas por ejercicio.
- El sistema de evaporación térmica contar con un sistema de enfriamiento mediante un chiller con capacidad de 5 a 7 litros enfriado por agua.
- El espesor de la película (recubrimiento), deberá ser de 10 hasta 500 nanómetros.
- El sistema de evaporación térmica debe cumplir con especificaciones ergonómicas que garanticen la ejecución del proceso.

Tabla 1. Temperaturas y presiones para la evaporación de diferentes materiales

Material	Temperatura (°C)	Presión (mbar)
Aluminio (Al)	821	10-6
Óxido de Aluminio (Al₂O₃)		
Cromo (Cr)	977	10-6
Óxido de Cromo		
Silicio (Si)	1147	10-6
Óxido de Silicio		

El sistema de evaporación térmica debe cumplir con las condiciones de seguridad para el operario, el equipo y las instalaciones.

Las variables de control que se deberán considerar en el equipo de evaporación térmica son:

- Potencia de la fuente,
- Flujo de gas.

Los parámetros que deberán visualizarse en el monitor del sistema de evaporación deberán ser:

- Temperatura,
- Presión,
- Flujo de gas,
- Tipo de gas,
- Tasa de depósito vs tiempo,
- Contador,

- Cierre de puerta,
- Estado de la bomba turbo molecular,
- Estado de la bomba mecánica,
- Refrigeración,
- Obturador,
- Receta y/o recetas.

Deberán incorporarse elementos de sujeción (piezas) para asegurar la posición de las canoas (chalupas para depósito de material). Estas piezas deberán ser de cobre electrolítico. Siendo un equipo con finalidad didáctica y de aprendizaje es importante evitar procesos automatizados de modo que el estudiante comprenda el funcionamiento y operación.

En esta etapa del trabajo se presentará el diseño de detalle del sistema de evaporación térmica. Una vez definidos los requerimientos técnicos a partir de la revisión bibliográfica y del análisis comparativo de equipos comerciales, se cuenta con los elementos necesarios para avanzar de la fase conceptual hacia la especificación puntual de cada subsistema. El diseño de detalle incluye la definición de materiales, dimensiones, componentes mecánicos y electrónicos, así como la integración de los sistemas de vacío, fuentes de evaporación, control de parámetros de proceso y seguridad operativa. Esta fase es esencial para garantizar que el prototipo cumpla con las especificaciones de desempeño, confiabilidad y escalabilidad previamente establecidas, además de permitir la elaboración de planos constructivos y la selección de proveedores y procesos de manufactura adecuados.

3. Resultados

La figura 1 muestra una vista general del evaporador térmico diseñado. En esta se puede observar la cámara de vacío y la bancada general, la cual alberga los sistemas de control de potencia, presión, flujo de gas, control de espesor del recubrimiento y la computadora que se encargará de incluir el sistema de control maestro. Adicionalmente el gabinete donde se ubicarán los sistemas de control y comunicación entre los diferentes sensores. Adicionalmente se observa el espacio reservado para la ubicación de los sistemas de transformación de energía. Esta distribución permitirá la correcta manipulación de las variables de control, con un diseño ergonómico y simple, que permitirá a los estudiantes entender y controlar cada paso del proceso de depósito de un recubrimiento.

La figura 2 muestra el diseño de detalles de la cámara de depósito con los sistemas más importantes. En esta se puede observar la posición del portasustratos giratorio con posibilidad de extenderse y modificar la distancia de depósito, la compuerta de atrición para controlar la presión, la bomba turbomolecular que controla el vacío en la etapa molecular, los sensores de presión y espesor, con los cuales se controlará el espesor de la capa y el tiempo de depósito, el obturador que permite dar inicio al depósito una vez se estabilice la tasa y los postes donde se ubicará el dispositivo utilizado para ubicar el material a evaporar, los cuales se conectan con cables de alta potencia a la fuente de evaporación.

Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores

El diseño de tecnología propietaria en cámaras de vacío para evaporación térmica ofrece ventajas significativas al permitir soluciones a medida que abordan directamente las necesidades específicas de investigación e industria, en lugar de depender de sistemas comerciales genéricos. Los diseños permiten optimizar la geometría de la cámara, los sistemas de bombeo y las configuraciones de la fuente para mejorar la uniformidad de la película, las tasas de depósito y la eficiencia en el uso del material, a la vez que reducen el riesgo de contaminación. Además, brindan flexibilidad para integrar diagnósticos avanzados, subsistemas modulares y estrategias de control personalizadas que optimizan la reproducibilidad y la escalabilidad del proceso.

Desde una perspectiva estratégica, el desarrollo de tecnología de vacío propietaria fortalece la independencia tecnológica, reduce la dependencia de proveedores extranjeros y fomenta el potencial de generación de propiedad intelectual, posicionando al propietario de la tecnología a la vanguardia de la innovación en la fabricación de películas delgadas para materiales metálicos, semiconductores y funcionales.

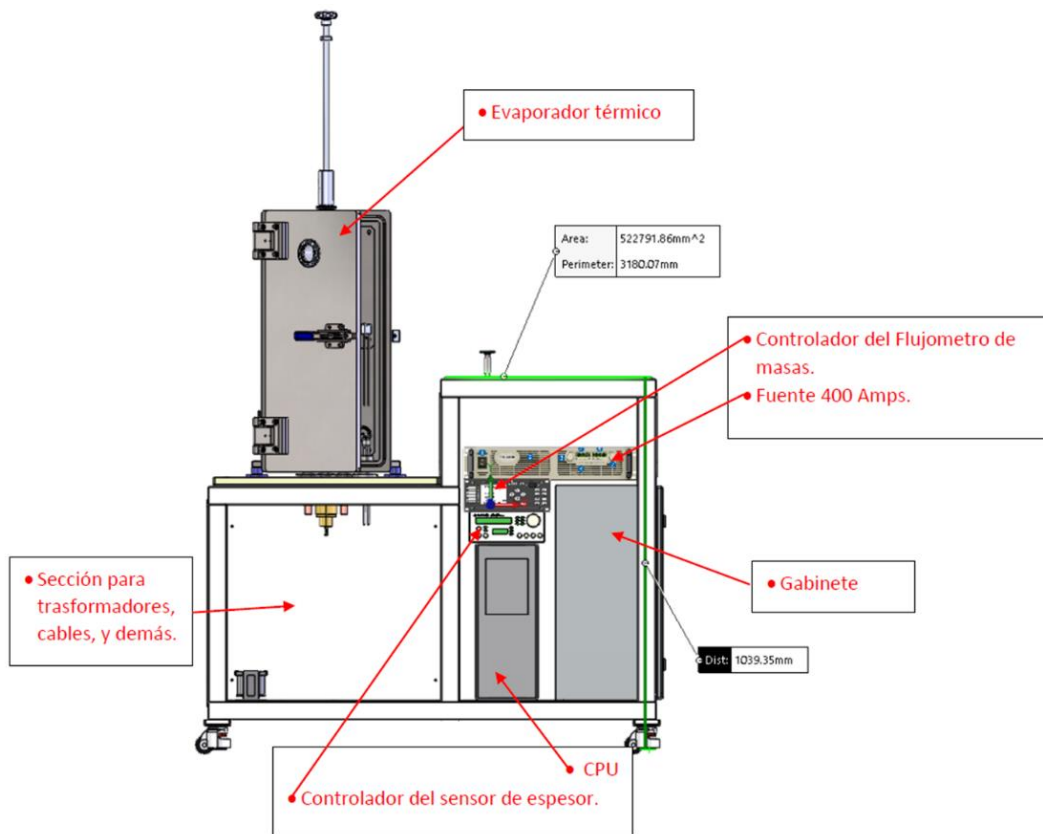


Figura 1. Vista general del equipo de evaporación térmica.

La figura 3 muestra el proceso lógico que se utilizará para obtener recubrimientos de materiales metálicos y semiconductores. Inicialmente, los puntos donde se deben tomar decisiones claves se concentran en la determinación de los valores de presión y la continuidad eléctrica entre el circuito de evaporación térmica.

Posteriormente se realizan las actividades relacionadas con la preparación del material base, en este caso pellets de metal puro, tales como Ti, Al o Cr. Este material base determinará el tipo de película a obtener, ya sea metálica (Ti, Al o Cr) o semiconductora (TiOx, AlOx o CrOx). Posteriormente es indispensable obtener un valor de presión que se encuentre en el orden de 1×10^{-6} mbar, que permita obtener una atmosfera libre de contaminantes y asegurar la calidad del material resultante. Esto se realiza mediante el control de la bomba mecánica y la bomba turbomolecular.

A partir de este punto, el proceso se divide en dos partes. Si el recubrimiento es metálico, se procede a incrementar la potencia al circuito de evaporación, hasta obtener una señal constante y estable en el sensor de espesor. Este sensor permitirá determinar la cantidad de material en el tiempo que se evapora (en Å/seg) y permitirá controlar el espesor total de la capa. Existen gran cantidad de reportes que indican tanto las temperaturas de evaporación como la presión de trabajo para evaporar diferentes materiales (Mattox, D. M. 2010). Por otro lado, si es necesario depositar una capa con características semiconductoras, será necesario incluir una atmosfera de oxígeno dentro del reactor. Esta se controla a través de flujómetros de masa y la compuerta de atrición con el fin de obtener una cantidad controlada de gas y una presión controlada, la cual debe encontrarse alrededor de 1×10^{-4} mbar.

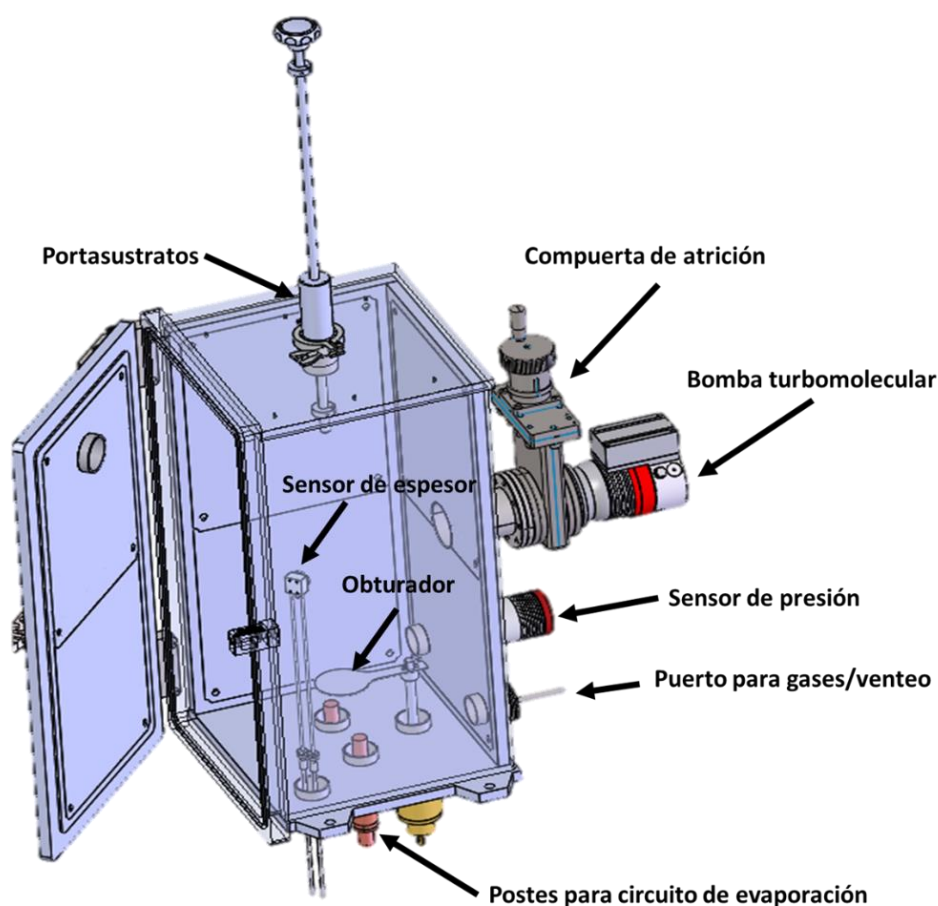


Figura 2. Detalle de la cámara de vacío.

Finalmente, indiferente de la naturaleza del proceso, es necesario mantener el vacío mientras se obtiene una temperatura cercana al valor del ambiente, para proceder a ventear la cámara y reiniciar el proceso de depósito.

A diferencia de los equipos comerciales actualmente disponibles, el sistema propuesto se caracteriza por su enfoque modular y adaptable, diseñado específicamente para aplicaciones de docencia, investigación aplicada y transferencia tecnológica. Mientras que los equipos comerciales tienden a ser altamente especializados, de elevado costo y con configuraciones cerradas que limitan su flexibilidad, el presente desarrollo prioriza la versatilidad en la integración de subsistemas, así como una arquitectura abierta que facilita modificaciones y actualizaciones futuras. Además, se enfatiza la simplicidad de operación y mantenimiento, lo que reduce significativamente los costos de capacitación y operación frente a sistemas industriales tradicionales. De este modo, el diseño de detalle aquí presentado no solo cubre los requerimientos técnicos identificados, sino que también responde a la necesidad de contar con un equipo más accesible, escalable y orientado a la formación de capital humano, sin sacrificar la reproducibilidad y confiabilidad de los procesos de evaporación térmica.

4. Conclusiones

El diseño propietario del equipo de evaporación térmica demuestra la viabilidad de desarrollar sistemas modulares y ergonómicos que facilitan la comprensión y el control preciso de los parámetros de deposición, reforzando así su aplicabilidad en contextos de investigación y formación académica.

La integración de unidades avanzadas de monitorización y control, que incluyen sensores de presión, flujo de gas y espesor de película, garantiza una alta reproducibilidad y fiabilidad en la deposición de recubrimientos metálicos y semiconductores, lo que permite la optimización sistemática de las propiedades de las películas delgadas.

La configuración de la cámara de vacío, que incorpora soportes de sustrato ajustables, obturadores y fuentes de evaporación de alta potencia, proporciona la flexibilidad necesaria para optimizar las condiciones de crecimiento de la película, mejorando la uniformidad del recubrimiento y la eficiencia de la deposición.

La capacidad del sistema para funcionar tanto en ultra alto vacío como en atmósferas reactivas controladas destaca su versatilidad, lo que permitirá la fabricación de recubrimientos que abarcan desde metales puros hasta óxidos complejos con propiedades estructurales y funcionales ajustables.

El desarrollo de tecnología de vacío propietaria contribuye significativamente a la independencia tecnológica, reduciendo la dependencia de equipos comerciales importados, fomentando oportunidades para la generación de propiedad intelectual y consolidando una posición estratégica en el campo de la deposición de películas delgadas para materiales avanzados.

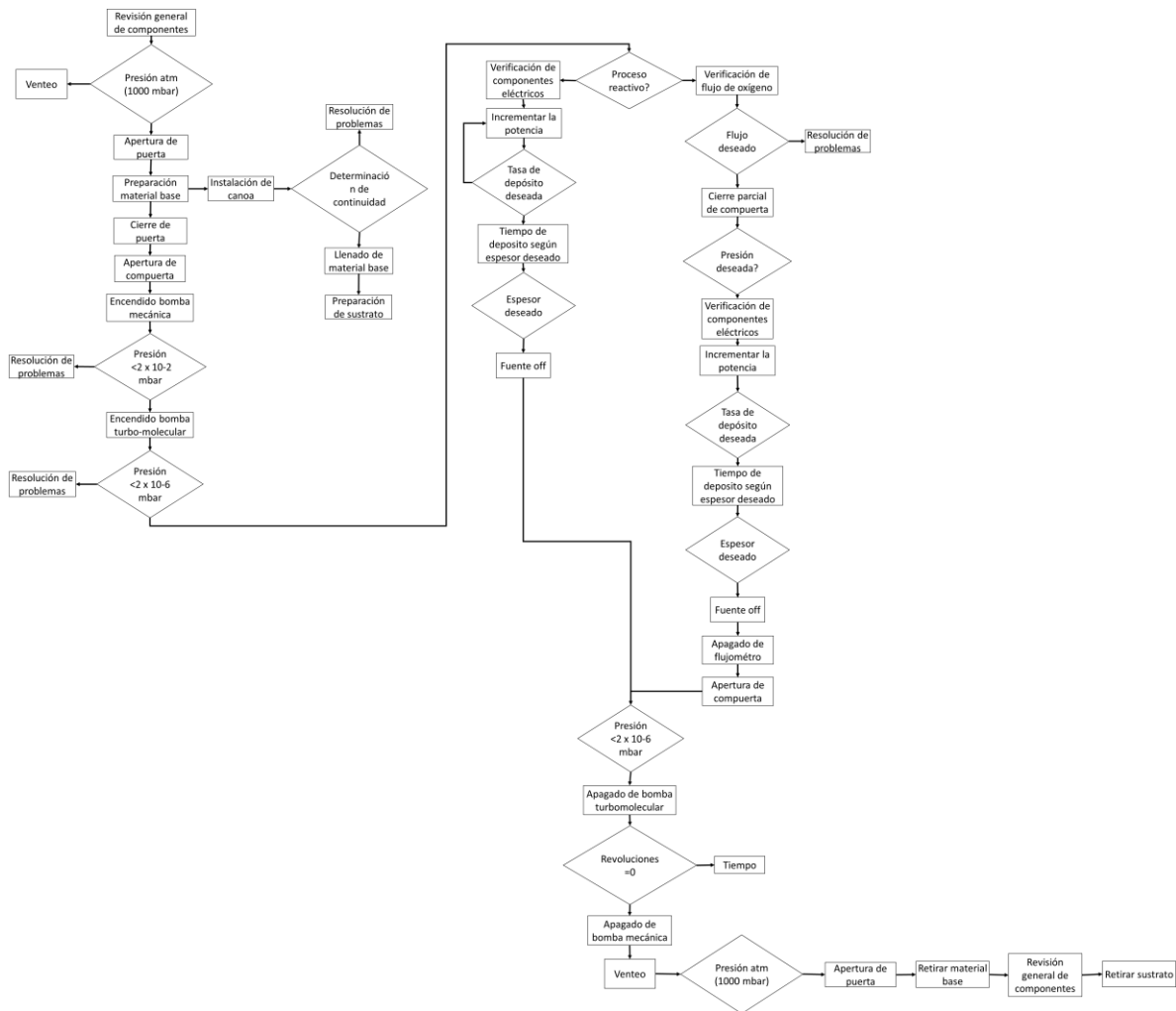


Figura 3. Proceso lógico para el depósito de recubrimientos metálicos y semiconductores por medio de evaporación térmica.

5. Perspectivas

El trabajo futuro se centrará en ampliar las capacidades del sistema de evaporación térmica para abordar los desafíos emergentes en la investigación de películas delgadas y las aplicaciones industriales. Una dirección clave es la integración de diagnósticos in situ, como la elipsometría espectroscópica en tiempo real y el análisis de gases residuales, para proporcionar una monitorización continua de los mecanismos de crecimiento de las películas y los niveles de impurezas. Esto permitirá el desarrollo de estrategias de control de circuito cerrado que mejoren la reproducibilidad y aceleren la optimización del proceso. Otra prioridad es la escalabilidad del diseño de la cámara, lo que permite la transición de experimentos a escala de laboratorio a líneas de producción piloto, manteniendo al mismo tiempo la uniformidad y eficiencia del recubrimiento.

Además, se centrarán los esfuerzos en ampliar la gama de materiales funcionales que se pueden sintetizar, incluyendo aleaciones de alta entropía, óxidos de perovskita y heteroestructuras multicapa, para satisfacer las demandas de la microelectrónica, la optoelectrónica y los recubrimientos protectores de próxima generación. Desde una perspectiva educativa, la *Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores*

incorporación de interfaces didácticas y herramientas de simulación reforzará la función del equipo como plataforma de enseñanza, permitiendo a los estudiantes interactuar tanto con el sistema físico como con los gemelos digitales del proceso de deposición.

Finalmente, el proyecto contempla la exploración de vías de protección de la propiedad intelectual y transferencia de tecnología, fomentando la colaboración con socios de la industria para posicionar el sistema propietario como una solución competitiva en los sectores de fabricación avanzada. Estas iniciativas garantizarán no solo la consolidación de la independencia tecnológica, sino también la sostenibilidad y el impacto a largo plazo de la tecnología de vacío desarrollada.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación del presente proyecto a Secihti, a través del proyecto MADTEC-2025-M-616 “Desarrollo de Equipos Modulares Propietarios para alto vacío, orientados a la producción de Evaporación Térmica para la Enseñanza de Procesos de Fabricación recubrimientos de materiales metálicos y Semiconductores”, convocatoria: maduración de tecnologías, mejoramiento de la inventiva y retos tecnológicos para la atención de problemáticas nacionales prioritarias. Juan Manuel González Carmona agradece el apoyo a través del programa “investigadores por México Secihti” y la financiación del proyecto Nro 131 “Fortalecimiento científico del consorcio CONACYT en manufactura aditiva”.

Referencias

- O'Hanlon, J. F. A User's Guide to Vacuum Technology, 3rd ed., Wiley-Interscience, 2003.
- Mattox, D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, 2nd ed., William Andrew Publishing, 2010.
- Harper, C. A. (Ed.) Handbook of Thin Film Technology, McGraw-Hill, 2003.
- Franssila, S. Introduction to Microfabrication, 2nd ed., Wiley, 2010.
- Holland, L. Vacuum Deposition of Thin Films, Chapman and Hall, 1970.
- Wasa, K., Kanno, I., & Adachi, H. Thin Film Materials Technology: Sputtering and Plasma Deposition, Springer, 2004.
- Smith, H. I., & Thompson, C. V. (1984).Evaporation and sputtering techniques for depositing thin films, Physics Today, 37(7), 38–45.
- Küppers, J. (2002). Basic processes in thermal evaporation, Surface Science Reports, 46(1–8), 1–66.
- Pfeiffer Vacuum GmbH Vacuum Technology: Basic Information and Glossary, Technical Guide, 2021.
- Kurt J. Lesker Company Vacuum Science & Technology Education Series, <https://www.lesker.com>
- Ho Soonmin Thermal Evaporation of Thin Films: Review. Middle East Journal of Scientific Research 23(11):2695-2699, 2025
- M. T. Sohail, M. Wang, M. Shareef, P. Yan, A review of ultrafast photonics enabled by metal-based nanomaterials: Fabrication, integration, applications and future perspective, Infrared Physics & Technology, 137, 2024, 105127,
- Korvus Technology — Thermal Evaporation | Physical Vapour Deposition. <https://korvustech.com>
- Vacuum Evaporation System Market Size By Type (Batch Systems, Continuous Systems, Hybrid Systems), By Technology (Thermal Evaporation, Mechanical Vapor Recompression (MVR)), By Application (Chemical Industry, Pharmaceutical Industry, Food and Beverage Industry, Wastewater Treatment, Electronics), By Geographic Scope and Forecast. Report ID: 534525, 2025.
- Diseño De Equipo Modular De Evaporación Térmica Resistiva Para El Desarrollo De Recubrimientos Metálicos Y Semiconductores

Diseño De Un Agente Para El Entrenamiento De Un Robot Manipulador Mediante Aprendizaje Por Refuerzo

Carlos Enrique Coazozón Echevarría¹ y Leonardo Barriga Rodríguez¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la Cuesta 702, 76125 Querétaro, México
ccoazon@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. El entrenamiento de robots manipuladores mediante aprendizaje por refuerzo enfrenta el desafío de coordinar múltiples articulaciones, especialmente cuando se busca alcanzar posiciones específicas dentro del espacio de trabajo, esta tarea resulta compleja porque no existe un método exacto que indique cómo definir funciones de recompensa que aseguren un aprendizaje efectivo y estable, en consecuencia, el agente puede llegar a priorizar unas articulaciones sobre otras, lo que impide alcanzar una postura global adecuada del robot manipulador y limita el desempeño de la política aprendida. Este trabajo presenta una metodología para diseñar y entrenar un agente mediante aprendizaje por refuerzo, utilizando como caso de estudio un robot manipulador modelo UR5 para el entrenamiento se utilizó el algoritmo de Optimización Proximal de Políticas (PPO, por sus siglas en inglés), conocido por su funcionamiento eficaz en espacios continuos. La validación experimental se planteó de manera gradual en tres etapas: primero el control de una sola articulación, después el control simultáneo de dos sin normalización y, finalmente, la aplicación de una función de recompensa normalizada con un bono adicional por éxito, lo que permitió evaluar la evolución del aprendizaje en escenarios de creciente complejidad.

Palabras clave: Aprendizaje por refuerzo, robot manipulador, función de recompensa, simulación, agente.

1. Introducción

El aprendizaje por refuerzo aplicado en el control de robots ha atraído mucha atención debido a su capacidad para permitir que un agente aprenda políticas de control desde cero a través de la interacción con su entorno, sin depender de modelos dinámicos exactos, sin embargo, a medida que avanzamos hacia robots con múltiples grados de libertad, el aprendizaje se complica, debido al hecho de que el espacio de estados y acciones crece proporcionalmente al número de grados de libertad, lo que hace más difícil para el agente aprender políticas estables y generalizables (Al Ali & Zhu, 2024; Luo et al., 2025).

En este mismo contexto, el diseño de la función de recompensa se convierte en un punto clave, no hay un método exacto que indique cómo definirla para garantizar un aprendizaje equilibrado, el riesgo es que el agente termine dándole prioridad a algunas articulaciones sobre otras, y como consecuencia, no logre alcanzar una postura global adecuada del robot manipulador, este tipo de

desbalance limita el desempeño de la política aprendida y hace que los resultados no sean tan útiles en la práctica (Hadfield-Menell et al., 2017).

La literatura explica que aplicar aprendizaje por refuerzo en robótica es particularmente un reto cuando se trabaja con varios grados de libertad o con entornos de simulación complejos, puesto que mientras más grande es la dimensionalidad del espacio de estados y acciones, el agente necesita explorar configuraciones mucho más amplias, lo que vuelve el entrenamiento más difícil y puede comprometer la estabilidad del aprendizaje, en otras palabras, controlar un robot con estas condiciones es un verdadero desafío, donde tanto la definición de la recompensa como la elección del algoritmo juegan un papel fundamental (Zhao et al., 2025; Wang et al., 2025).

Entre los algoritmos de aprendizaje por refuerzo, la Optimización Proximal de Políticas (PPO) ha demostrado ser una alternativa sólida porque encuentra un balance entre estabilidad y eficiencia en el aprendizaje, su mecanismo de clipping ayuda a evitar cambios bruscos en la política, favoreciendo que el entrenamiento avance de forma más consistente, esto ha hecho que PPO se use ampliamente en tareas de control robótico y es justamente la razón por la cual lo seleccionamos en este trabajo (Shahid et al., 2022; Engstrom et al., 2020).

A pesar de estos avances, todavía persiste el problema de cómo diseñar recompensas que reflejen de manera conjunta el desempeño de todas las articulaciones, por ejemplo, si no se aplica una normalización adecuada, el agente suele enfocarse en el aprendizaje de solo algunas articulaciones, lo que produce un aprendizaje incompleto y desbalanceado, este aspecto es clave porque, al final, el éxito de una tarea de manipulación depende de que todas las articulaciones trabajen de manera coordinada (Han et al., 2023).

En la literatura, Wang (2023) implementó recompensas simples sin detallar procesos de normalización, mientras que trabajos como He et al. (2024) y Fareh et al. (2025) plantearon enfoques multi-objetivo distintos a la coordinación simultánea de múltiples articulaciones. Por su parte, Ajani et al. (2024) advierten que, al aumentar los componentes de la recompensa, su gestión se convierte en un obstáculo para lograr políticas estables. En conjunto, estos antecedentes confirman que el aprendizaje por refuerzo aún enfrenta retos en este enfoque, lo que refuerza la necesidad de describir explícitamente el diseño del agente y validarlo de forma gradual bajo reglas generales del aprendizaje por refuerzo.

Para abordar este reto, en este trabajo proponemos una metodología para diseñar y entrenar un agente en un entorno de simulación con un robot manipulador UR5, el entrenamiento se llevó a cabo con PPO, aprovechando su eficacia ya probada en problemas de control de estado continuo.

La validación experimental se planteó de manera progresiva en tres fases: primero, el control de una sola articulación para comprobar la interacción entre estados, acciones y recompensas; después, el control de dos articulaciones sin aplicar normalización; y, por último, la aplicación de una función de recompensa normalizada con un bono adicional por éxito. Este enfoque gradual nos permitió evaluar cómo evolucionaba el aprendizaje y demostrar que la normalización favorece un comportamiento más estable y orientado al objetivo global del robot manipulador.

2. Metodología

La metodología propuesta se compone de dos partes principales: (i) el desarrollo de un entorno de simulación que reproduce las condiciones físicas de un robot real; y (ii) el diseño de un agente de aprendizaje por refuerzo, responsable de aprender una política de control a partir de la definición de estados, acciones, función de recompensa y algoritmo de entrenamiento.

Entorno de Simulación

El agente fue entrenado dentro de un entorno simulado configurado con el Sistema Operativo para Robots (ROS, por sus siglas en inglés), en su distribución Noetic y el simulador Gazebo. En dicho entorno se incorporó un robot UR5 a través del paquete oficial de la empresa *Universal Robots* llamado ROS-Industrial. Este paquete es particularmente útil, ya que proporciona una simulación más precisa del robot, basándose en las especificaciones del modelo real, como los límites de las articulaciones, parámetros de fricción, inercia y detección de colisiones.

Un aspecto fundamental de esta configuración es que, al estar diseñada sobre ROS, permite establecer la comunicación y transmitir información mediante nodos y tópicos, lo cual facilita que los datos de estado y control del robot puedan ser enviados y recibidos de manera modular entre diferentes componentes de la simulación.

Por otra parte, el alcance inicial del diseño de la simulación se centró en el control de las articulaciones, donde el objetivo fue llevar cada una de ellas a posiciones específicas sin considerar la interacción con objetos. Este enfoque es relevante porque cada articulación constituye una variable adicional dentro del espacio de acción y estado, lo que incrementa la complejidad del entrenamiento.

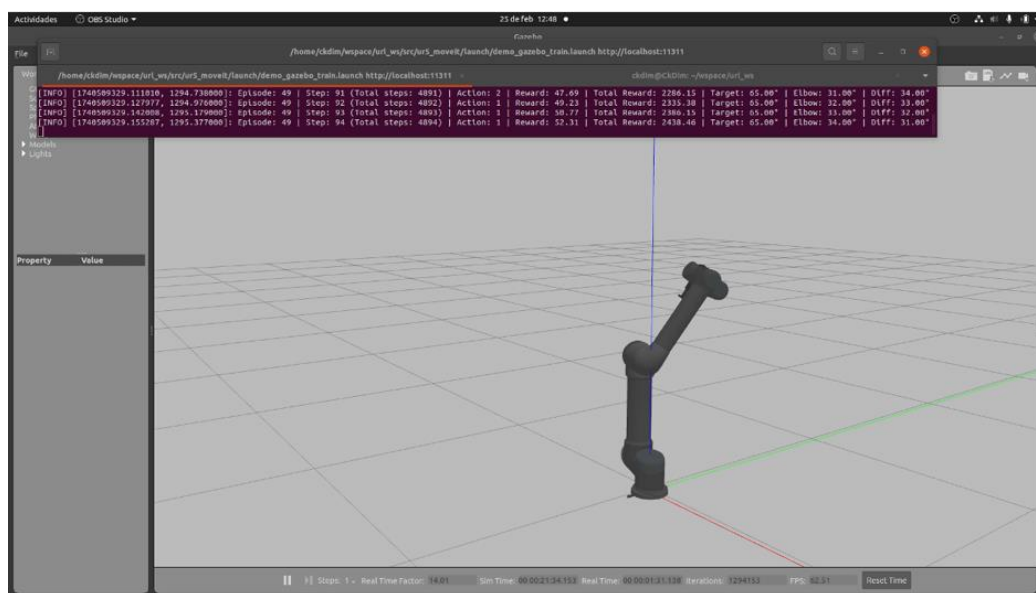


Figura 17. Simulación del robot UR5 dentro de Gazebo.

Diseño del agente

El diseño del agente se estructuró en torno a los elementos fundamentales de un problema de aprendizaje por refuerzo: definición del espacio de estados, espacio de acciones, función de recompensa y algoritmo de entrenamiento, en este trabajo, el enfoque se centró en el control de dos articulaciones del robot, estableciendo como objetivo principal el correcto posicionamiento de dichas articulaciones, sin considerar aún la interacción con objetos ni la retroalimentación visual.

Espacio de estados. Inicialmente se definieron los estados del espacio, determinados por la posición de dos articulaciones del robot seleccionadas para el entrenamiento, cada una representada por un ángulo que, en conjunto, describe la postura alcanzada del robot.

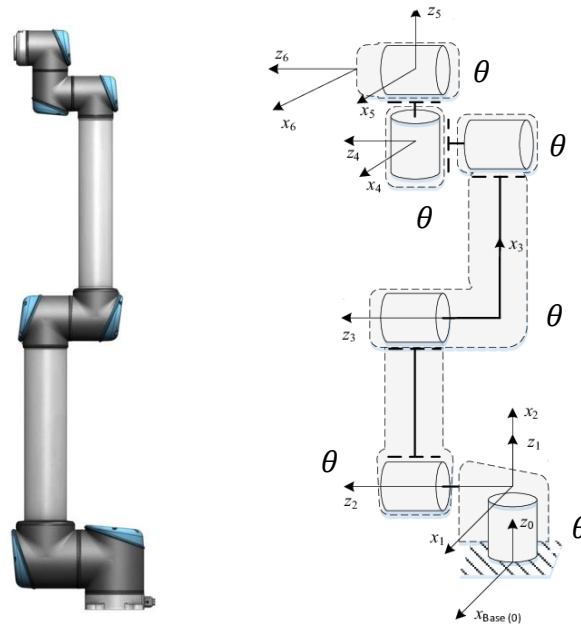


Figura 2. Esquema de las articulaciones del robot UR5. Nota. Adaptado de Mathematical modelling and simulation of human-robot collaboration (Galín, Meshcheryakov, & Samoshina, 2020).

Formalmente, el estado del robot en el instante t puede representarse como:

$$s(t) = [\theta^1(t), \dots, \theta^n(t)] \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

donde n corresponde al número de articulaciones consideradas; en este trabajo se tomó $n = 2$, correspondiente a dos articulaciones específicas del robot.

Asimismo, el rango de movimiento es común para todas las articulaciones, cada $\theta_i(t)$ representa el ángulo de la articulación i , cuyos límites van de -360° a 360° , siendo descritos como:

$$\theta_i(t) \in [-2\pi, 2\pi], \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Durante un entrenamiento, el estado $s(t)$ representa la información principal con la que cuenta el agente, a partir de esta, la política selecciona una acción que modifica la postura del robot y conduce a un nuevo estado, este ciclo de observar, decidir y transitar entre estados constituye la

base del aprendizaje por refuerzo, pues permite al agente explorar y ajustar su comportamiento en el entorno (Liu et al., 2021; Zhang, 2021; Cui et al., 2024; Hossain et al., 2020).

Es importante mencionar, dado que cada articulación puede adoptar cualquier valor real dentro de sus límites, el espacio de estados se define como continuo, esto incrementa la complejidad del entrenamiento y requiere algoritmos de aprendizaje adecuados para entornos continuos.

Durante la simulación, como se describe en la Figura 3, ROS publicó de forma periódica los valores articulares del robot mediante sus tópicos estándar, a los cuales se conectó el agente para obtener en tiempo real la configuración del robot, esta información permitió describir la postura del robot en cada instante y constituyó la base para la definición del espacio de estados.

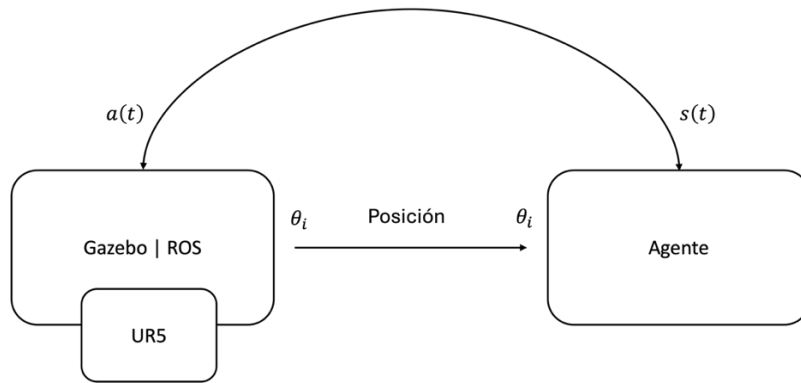


Figura 3. Estructura de la publicación de la posición del robot y el agente.

Espacio de acciones. El espacio de acciones se definió como los comandos de posición asignados a las articulaciones, conformado por n variables continuas que corresponden a cada una de las articulaciones consideradas en el entrenamiento.

Una acción en el instante t se representa como:

$$a(t) = [a^1(t), \dots, a^n(t)] \in \mathbb{R}^n \quad (3)$$

donde cada $a_i(t)$ indica el ajuste angular aplicado sobre la articulación i , restringido a los límites físicos del robot, este modelado configura un espacio de acciones continuo de n dimensiones, directamente asociado a los grados de libertad a utilizar, en este trabajo, $n = 2$, esto constituye la salida de la política encargada de seleccionar la acción apropiada en función del estado observado (Yu et al., 2022; Li et al., 2024).

Los comandos para las acciones se interpretaron de manera relativa a la posición actual de cada articulación, esto facilita un aprendizaje progresivo hacia la posición objetivo y evita el uso de comandos absolutos, los cuales no proporcionarían un comportamiento realista del robot manipulador.

Teniendo definidos el espacio de estados y el de acciones, la correlación entre ambos se establece mediante la política, encargada de decidir la acción a ejecutar a partir del estado observado, de manera general, esta relación puede expresarse como:

$$a(t) = \pi_{\theta}(s(t)) \quad (4)$$

Donde π_{θ} representa una función parametrizada que aproxima el mapeo entre la configuración articular $s(t)$ actual y el comando relativo $a(t)$, esto constituye la base del aprendizaje por refuerzo, ya que conecta directamente las observaciones del entorno con las decisiones de control del agente (Park et al., 2022; Sutton & Barto, 2018).

Función de recompensa. La función de recompensa se diseñó con el objetivo de guiar al agente hacia posiciones articulares específicas, considerando únicamente dos articulaciones, el codo (*elbow*) y la elevación (*lift*), para ello, se definieron metas articulares $\theta_e^* = 65^\circ$ y $\theta_l^* = 145^\circ$ frente a las cuales se evalúa el desempeño del agente en cada instante de tiempo.

El error articular se calculó como la diferencia absoluta entre la posición actual y la meta establecida, y se normalizó respecto al valor de referencia:

$$E_e = \frac{\Delta_e}{|\theta_e^*|}, \quad E_l = \frac{\Delta_l}{|\theta_l^*| + \frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

Donde:

$$\Delta_e = |\theta_e - \theta_e^*|, \quad \Delta_l = |\theta_l - \theta_l^*| \quad (6)$$

La implementación de la normalización es necesaria, ya que evita que las recompensas queden desbalanceadas entre articulaciones, al no aplicarse, el agente podría dar mayor prioridad a corregir ciertos movimientos mientras descuida otros, aun cuando todos sean igualmente relevantes para alcanzar la postura final (Kalashnikov et al., 2018; Kumar et al., 2020).

A partir de estos errores, se asignó una recompensa exponencial decreciente que disminuye conforme aumenta la desviación respecto al objetivo, esto permite ofrecer señales graduales al agente; de no hacerlo, el aprendizaje se volvería lento, ya que el agente no distinguiría entre mejorar ligeramente su desempeño o permanecer en un estado subóptimo (Ding et al., 2023), además, se incluyó una penalización de -20 cuando el error excede el umbral definido, con el fin de desincentivar desviaciones amplias (Panzer & Bender, 2021).

$$R_{elbow} = \begin{cases} 100 \cdot e^{-3E_e}, & \text{si } E_e \leq 1 \\ 100 \cdot e^{-3E_e} - 20, & \text{si } E_e > 1 \end{cases}; \quad R_{lift} = \begin{cases} 100 \cdot e^{-3E_l}, & \text{si } E_l \leq 1 \\ 100 \cdot e^{-3E_l} - 20, & \text{si } E_l > 1 \end{cases} \quad (7)$$

La recompensa total se obtuvo como la suma de ambos términos:

$$R_t = R_{elbow} + R_{lift} \quad (8)$$

A esta suma se añadió un bono adicional de +50 en caso de éxito, definido como alcanzar el objetivo dentro de un umbral de error $\epsilon = 0.0349$ rad ($\approx 2^\circ$). De este modo, la recompensa total R_t se calcula como la suma de las recompensas parciales de cada articulación y, en caso de éxito, se incrementa con el bono adicional; si no se alcanza la meta, la recompensa sigue una función exponencial decreciente $100 \cdot e^{-3E_e}$ y aplica una penalización fija de -20 , reforzando el castigo ante grandes desviaciones.

$$R_t = \begin{cases} R_{elbow} + R_{lift} + 50, & \text{si } success = True \\ 100 \cdot e^{-3E_e} - 20, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (9)$$

Este diseño asegura que el agente reciba recompensas proporcionales, penalizaciones y un incentivo explícito al completar la tarea, lo que favorece un aprendizaje estable, sin esto los valores podrían volverse excesivos, generando inestabilidad y gradientes explosivos, el bono adicional garantiza que alcanzar la meta siempre sea más valioso que permanecer cerca de ella.

Algoritmo de aprendizaje. Dentro del alcance inicial, PPO fue el algoritmo elegido para el entrenamiento del agente, puesto que según la literatura PPO resulta adecuado para entornos continuos buscando un equilibrio entre la estabilidad y la eficiencia durante la actualización de las políticas (Onori et al., 2024).

El principio central de PPO consiste en limitar las variaciones bruscas de la política mediante mecanismo de limitación (*'clipping'*), lo que evita inestabilidades durante el aprendizaje y favorece la convergencia hacia un comportamiento consistente, la política estocástica π_θ se optimiza maximizando la siguiente función objetivo:

$$L_{CLIP}(\theta) = E^t[\min(r_t(\theta)) \hat{A}_t, \text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) \hat{A}_t)] \quad (10)$$

Donde $r_t(\theta)$ es la probabilidad relativa entre la política actualizada y la anterior, $\hat{A}_t$ es la estimación de la ventaja en el instante t y ϵ es el parámetro de *clipping* que controla la magnitud máxima de los cambios de política, de esta manera (Zhou et al., 2022; Chen et al., 2023).

No obstante, para que este proceso de aprendizaje sea efectivo, también es necesario definir previamente un conjunto de hiperparámetros, los cuales regulan el comportamiento del algoritmo durante el entrenamiento, para este alcance se propusieron los siguientes hiperparámetros, que se muestran en la Tabla 1, seleccionados con base en la documentación de PPO (Tang et al., 2021) y en configuraciones comúnmente reportadas en la literatura para entornos continuos (Zhong et al., 2023; He et al., 2021).

Tabla 6. Hiperparámetros propuestos para el entrenamiento.

1. Hiperparámetros	2. Valor
3. Tasa de aprendizaje (Learning Rate)	4. 2.5×10^{-4}

5. Coeficiente de entropía (Entropy Coefficient)	6. 0.05
7. Coeficiente de la función de valor (Value Function Coefficient)	8. 0.5
9. Rango de límite (Clipping Range)	10. 0.2
11. Lambda para ventaja generalizada (GAE Lambda)	12. 0.98
13. Número de pasos por actualización (Number of Steps)	14. 2048
15. Número total de pasos de simulación (Time Step)	16. 50 000

En términos generales, estos valores determinan aspectos como la rapidez con la que la política se ajusta, el grado de exploración que mantiene el agente y la estabilidad de las actualizaciones, una configuración adecuada de los mismos resulta esencial para alcanzar convergencia estable y eficiente.

Entrenamiento. El entrenamiento se llevó a cabo en episodios independientes dentro del entorno simulado, donde en cada inicio, el robot era configurado en posiciones iniciales en ceros, siempre dentro de los límites permitidos por el modelo, este procedimiento permitió establecer un punto de partida consistente en cada episodio y facilitar la evaluación del desempeño de la política aprendida.

Cada episodio estuvo compuesto por un número máximo de pasos de simulación, en cada paso, el agente observó el estado del robot, definido por su posición; seleccionó una acción correspondiente al ajuste relativo de las articulaciones; el simulador actualizó la postura del robot en función de esa acción; y finalmente se calculó la recompensa conforme a la función definida en el apartado anterior, este ciclo de observación, decisión y actualización se repitió hasta que el episodio alcanzó el límite de pasos o el objetivo articular fue logrado.

La actualización de las políticas se realizó de forma acumulada cada 2048 pasos de interacción con el entorno, se utilizó dicha información recopilada para entrenar el algoritmo PPO y actualizar los parámetros dentro de la red neuronal, esta estrategia intenta encontrar un equilibrio entre estabilidad y eficiencia, de modo que no haya una variación brusca que pueda perturbar el proceso de aprendizaje.

El entrenamiento se propuso con una duración de 50 000 pasos en la simulación, durante los cuales el agente aprendió a adaptar su comportamiento hasta alcanzar una política capaz de minimizar el error en las articulaciones, se considera que el entrenamiento fue exitoso cuando la recompensa acumulada mostraba una tendencia estable y aumentaba de forma sostenida a lo largo de los episodios al alcanzar el objetivo.

3. Resultados

Los experimentos se realizaron de manera gradual para verificar el enfoque propuesto en la metodología, primero entrenamos al agente para el control de una sola articulación para asegurar el funcionamiento adecuado de estados, acción y recompensa, posteriormente, aumentamos el número de articulaciones a dos utilizando una función de recompensa sin normalización para

Diseño De Un Agente Para El Entrenamiento De Un Robot Manipulador Mediante Aprendizaje Por Refuerzo

analizar su comportamiento, por último, aplicamos la función de recompensa metodológica, mediante la normalización de errores.

Entrenamiento con una articulación

Se diseñó una función de recompensa simple enfocada únicamente en una articulación, teniendo como objetivo validar si el agente era capaz de aprender bajo condiciones mínimas y comprobar la correcta interacción entre estados, acciones y recompensas.

$$R = \begin{cases} 100 \left(1 - \frac{|\theta_t - \theta^*|}{\theta^*}\right) + 50, & \text{si } |\theta_t - \theta^*| < \epsilon \\ 100 \left(1 - \frac{|\theta_t - \theta^*|}{\theta^*}\right), & \text{si } |\theta_t - \theta^*| \leq \theta^* \\ -10, & \text{si } |\theta_t - \theta^*| > \theta^* \end{cases} \quad (11)$$

La recompensa se definió en función del error angular respecto a la meta, distinguiendo tres casos: se otorga un bono de +50 cuando el error es menor al umbral ϵ , una recompensa lineal decreciente mientras se mantenga dentro del rango permitido y un castigo fijo de -10 si se excede el límite. Con este esquema, el agente incrementó progresivamente la recompensa y estabilizó su desempeño tras varias iteraciones, confirmando la validez del criterio de entrenamiento. En este entrenamiento, la meta articular se fijó en $\theta^* = 145^\circ$, definida como la posición objetivo a alcanzar durante el entrenamiento.

Entrenamiento con dos articulaciones (función no normalizada)

Posteriormente, se amplió el alcance para controlar dos articulaciones (*elbow* y *lift*), utilizando una función de recompensa simple, sin aplicar normalización ni escalado. El objetivo fue analizar el comportamiento del agente bajo parametros básicos de entrenamiento y evaluar si era capaz de reducir el error general únicamente a partir de recompensas directas, para ello, se fijaron como metas articulares $\theta_e^* = 65^\circ$ para *elbow* y $\theta_l^* = 145^\circ$ para *lift*. La recompensa de cada articulación se planteó como una función lineal decreciente, que parte de un valor máximo de 100 cuando el error es nulo y se reduce de manera proporcional conforme aumenta la desviación, aplicando además una penalización fija de -10 al superar el límite permitido.

$$R_{elbow} = \begin{cases} 100 \left(1 - \frac{\Delta_e}{\theta_e^*}\right), & \text{si } \Delta_e \leq \theta_e^* \\ -10, & \text{si } \Delta_e > \theta_e^* \end{cases}; R_{lift} = \begin{cases} 100 \left(1 - \frac{\Delta_l}{\theta_l^*}\right), & \text{si } \Delta_l \leq \theta_l^* \\ -10, & \text{si } \Delta_l > \theta_l^* \end{cases} \quad (12)$$

De esta manera, cada articulación recibió una recompensa independiente, en la que se premiaba la cercanía al objetivo y se castigaban los errores grandes con un valor constante de -10 , la recompensa total correspondió a la suma de ambas señales, lo que obligaba al agente a minimizar de forma simultánea los errores en *elbow* y *lift*.

Diseño De Un Agente Para El Entrenamiento De Un Robot Manipulador Mediante Aprendizaje Por Refuerzo

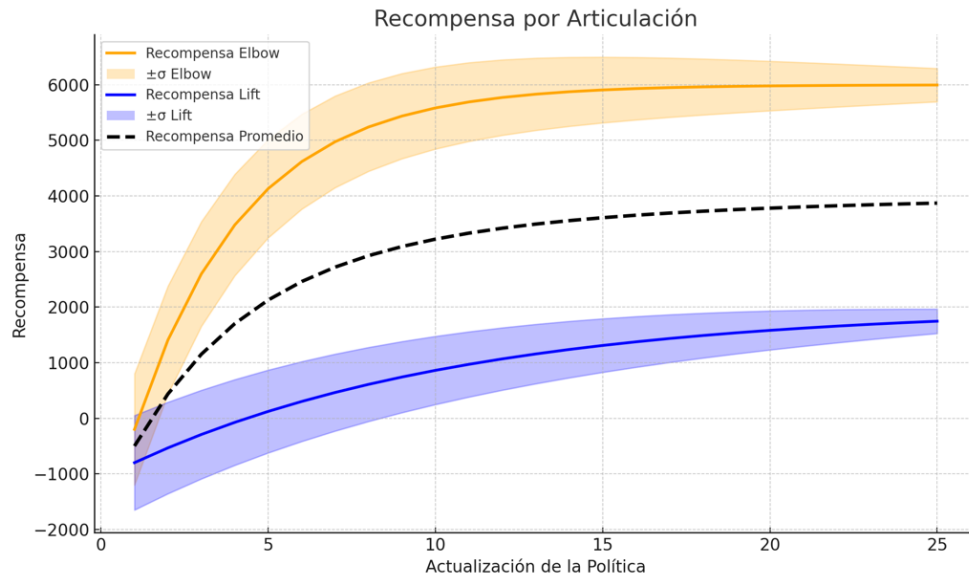


Figura 4. Resultados de las recompensas del entrenamiento con la función no normalizada.

Los resultados de la Figura 4 muestran que el agente incrementó la recompensa acumulada promedio, obtenida a partir de seis iteraciones de entrenamiento independientes, se observa que la articulación *elbow* aumentó de manera sostenida hasta alcanzar un valor cercano a los 6000, manteniéndose en ese rango durante el entrenamiento, en contraste, la articulación *lift* presentó un crecimiento más limitado y al final apenas superó los 2000 de recompensa acumulada.

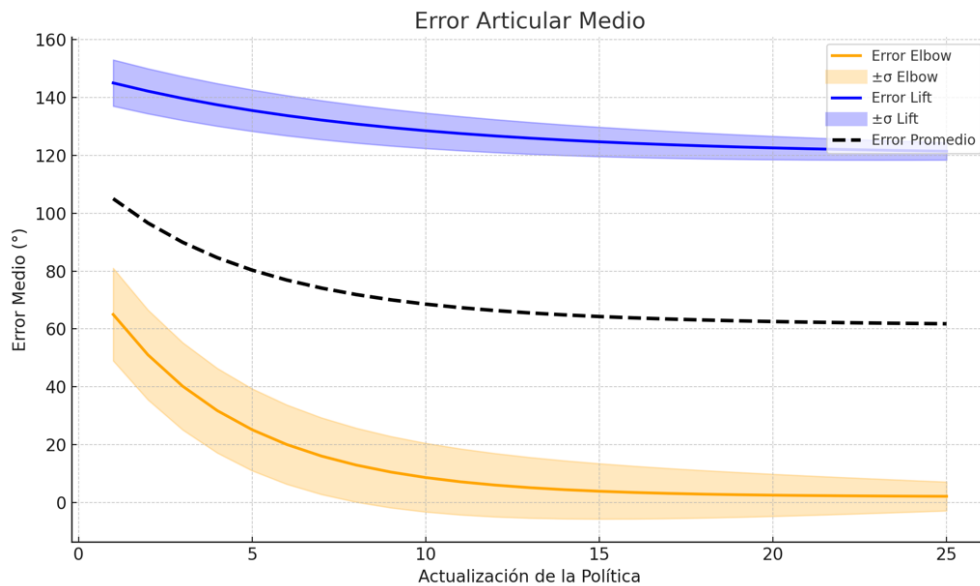


Figura 5. Error de las articulaciones de la función no normalizada.

Este comportamiento también se valida en la Figura 5, donde se muestra la variación del error articular, la articulación *elbow* inició con un error cercano a 65° , correspondiente a su posición inicial, y presentó una disminución progresiva hasta estabilizarse alrededor de 2° . En contraste, la articulación *lift* partió de un error aproximado a 145° y, aunque mostró una ligera reducción, al final de la simulación se mantuvo por encima de 120° , reflejando nuevamente un comportamiento desbalanceado, en el que solo el *elbow* logró reducir de manera notable su error, mientras que el *lift* permaneció con valores elevados durante todo el entrenamiento.

Esta diferencia en la magnitud de la recompensa acumulada refleja un comportamiento desbalanceado, con una clara predominancia del *elbow* sobre el *lift*, como se observa conceptualmente en la Figura 6 la articulación *lift* permaneció estancada sin lograr mejoras significativas.

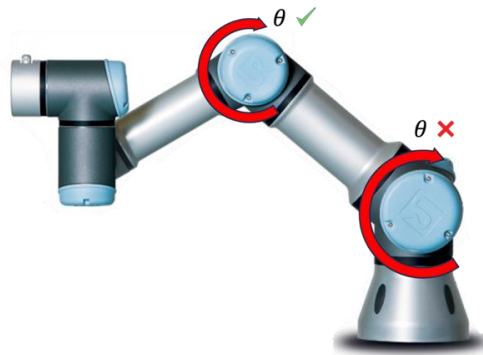


Figura 6. Concepto de los resultados del entrenamiento con la función no normalizada.

Este fenómeno se debe a que, al no existir una normalización entre recompensas, la función de recompensa no estuvo equilibrada, lo que llevó al agente a dar mayor prioridad a *elbow* al estar más cercano de su meta, en consecuencia, el aprendizaje se concentró en una sola articulación, impidiendo que la política desarrollada reflejara el objetivo global del movimiento.

Entrenamiento con dos articulaciones.

Finalmente, se aplicó la función de recompensa propuesta en la metodología, la cual incorpora la normalización de los errores articulares y un bono adicional por éxito, este diseño permitió equilibrar la contribución de ambas articulaciones en la señal de refuerzo, evitando que el agente priorizara únicamente una de ellas y como se muestra conceptualmente en la Figura 7, se garantizó que la postura final del robot se lograra de manera conjunta.

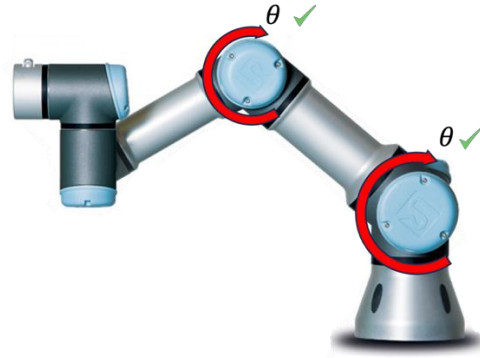


Figura 7. Concepto de los resultados del entrenamiento con la función normalizada.

De esta forma, el agente fue capaz de atender tanto las metas de *elbow* como *lift*, evitando el desbalance identificado en el experimento anterior y asegurando que la política aprendida se orientara hacia el objetivo global del robot.

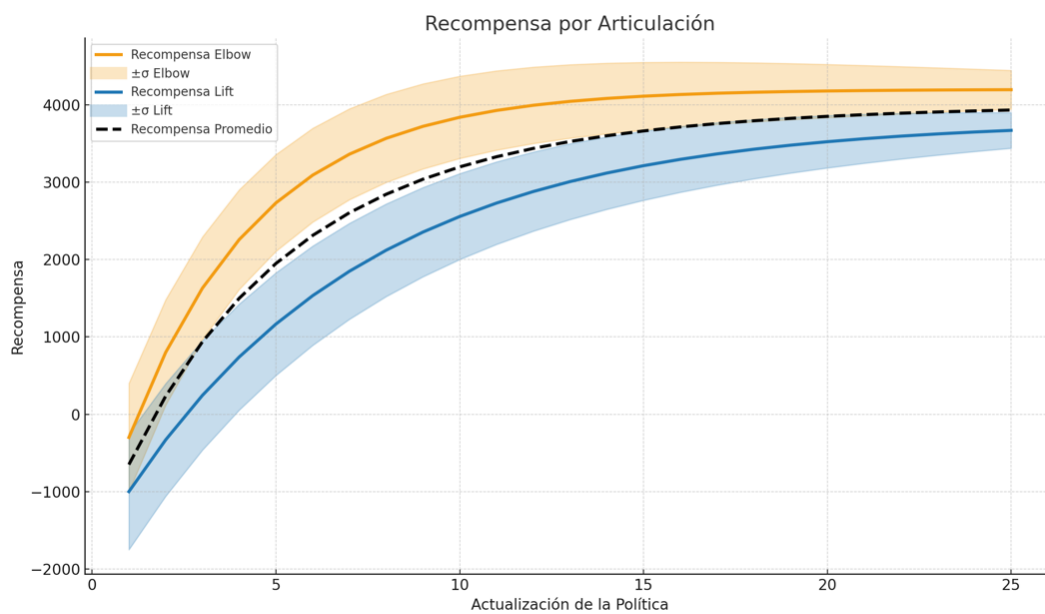


Figura 8. Resultados de las recompensas del entrenamiento con la función normalizada.

En los resultados mostrados en la Figura 8 se confirma lo mencionado anteriormente con base en la recompensa acumulada de las iteraciones de entrenamiento, tanto la articulación *elbow* como *lift* muestran un incremento sostenido conforme avanzan, el *elbow* alcanza valores cercanos a 4000, mientras que la *lift* se mantiene alrededor de 3500, reflejando un avance positivo en ambas.

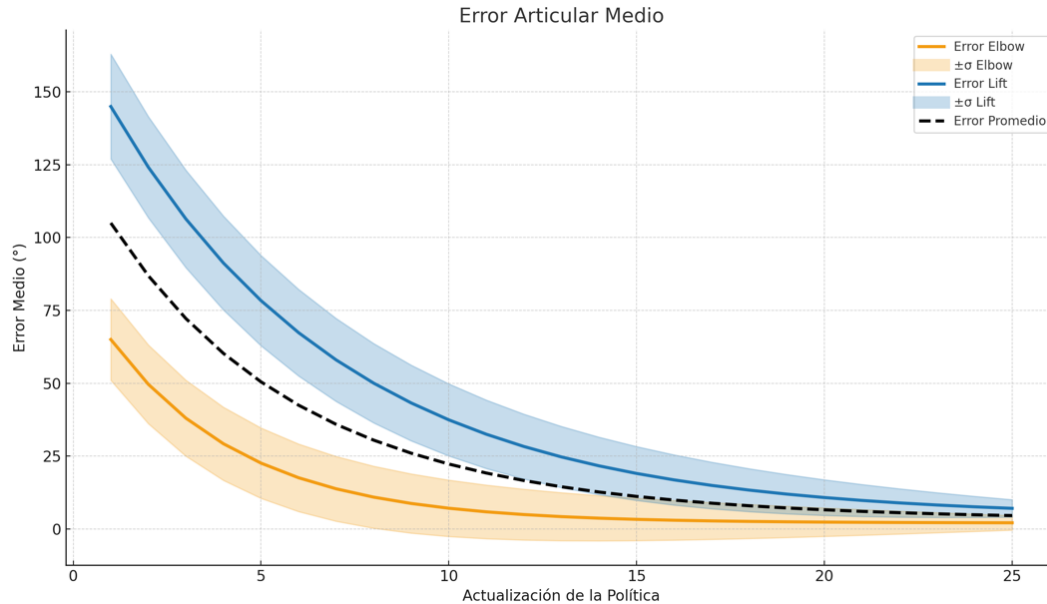


Figura 9. Error de las articulaciones de la función normalizada.

Esto también se valida en la Figura 9, donde se muestra el error articular medio, la articulación *elbow* inició con un error aproximado de 65°, mientras que la *lift* partió de más de 140°; ambas presentaron una reducción constante hasta estabilizarse en torno a 5° al final del entrenamiento. Como consecuencia, el error promedio global también disminuyó progresivamente, confirmando un aprendizaje positivo y más equilibrado entre ambas articulaciones en comparación con los escenarios previos.

4. Conclusiones

En este trabajo se enfrentó el reto de entrenar un agente de aprendizaje por refuerzo para controlar un robot manipulador UR5, poniendo especial atención en la dificultad que implica coordinar varias articulaciones y en cómo definir una función de recompensa que permita un aprendizaje equilibrado.

Los experimentos mostraron que el agente fue capaz de aprender políticas de control en escenarios simples, como con una o dos articulaciones, aunque sin normalización se generaron desbalances en el comportamiento, ya que algunas articulaciones eran priorizadas sobre otras, con la función de recompensa propuesta que incluye normalización de errores y un bono adicional por éxito se consiguió un aprendizaje más estable y una postura final conjunta del robot que confirma la utilidad del enfoque planteado.

El uso de PPO permitió entrenar al agente de manera adecuada dentro del escenario definido, mostrando que es una alternativa viable para este tipo de problemas. Sin embargo, los resultados deben considerarse con cautela, ya que no se hizo una comparación directa con otros algoritmos. Por eso, en trabajos futuros sería importante probar alternativas como la Optimización de Políticas con Región de Confianza (TRPO), el Actor-Crítico Suave (SAC) o el Gradiente Determinista Profundo

Gemelo y Retrasado (TD3), para ver si ofrecen ventajas en estabilidad, rapidez de aprendizaje o desempeño general.

Como parte de las líneas a futuro, se busca extender la metodología hacia tareas más complejas que incluyan interacción con objetos y también aumentar el número de articulaciones, evaluando si bajo la misma lógica de normalización se mantiene un desempeño equilibrado, asimismo, sería valioso explorar algoritmos híbridos que combinen planificación y aprendizaje profundo, finalmente, probar el enfoque en escenarios reales permitirá verificar qué tan robusto resulta el agente fuera de la simulación y qué tan aplicable puede ser en entornos industriales.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con esta investigación, este trabajo se realizó en apoyo a los proyectos de Manufactura Reconfigurable del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), contando con el respaldo académico y la infraestructura necesaria para su desarrollo.

Referencias

- Al Ali, A., & Zhu, Z. H. (2024). Reinforcement learning for path planning of free-floating space robotic manipulator with collision avoidance and observation noise. *Frontiers in Control Engineering*, 5(1), 1394668. <https://doi.org/10.3389/fcteg.2024.1394668>
- Ajani, O. S., Afolabi, O. J., & Olaniyi, E. O. (2024). Deep reinforcement learning as multi-objective optimization. *Information Sciences*, 660, 119893. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.119893>
- Chen, X., Huang, W., & Li, P. (2023). Dual-clip proximal policy optimization for stable learning in continuous action spaces. *Applied Intelligence*, 53(18), 21536–21550. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-04236-9>
- Cui, T., Han, Y., Zhu, J., Liu, J., & Wang, H. (2024). Mobile robot sequential decision-making using a deep reinforcement learning hyper-heuristic approach. *Information Sciences*, 660, 119893. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.119893>
- Ding, X., Gao, H., Sun, W., & Chen, J. (2023). Reward shaping in deep reinforcement learning for robotic control: An exponential-based approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 164, 104401. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104401>
- Engstrom, L., Ilyas, A., Santurkar, S., Tsipras, D., Janoos, F., Rudolph, L., & Madry, A. (2020). Implementation matters in deep policy gradients: A case study on PPO and TRPO. In *International Conference on Learning Representations (ICLR 2020)*. <https://openreview.net/forum?id=r1etN1rtPB>
- Fareh, R., Al-Durra, A., & El Ferik, S. (2025). Physics-informed reward shaped reinforcement learning control of a robot manipulator. *Robotics and Autonomous Systems*, 176, 104798. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.104798>
- Galin, R., Meshcheryakov, R., & Samoshina, E. (2020). *Mathematical modelling and simulation of human-robot collaboration*. *Procedia Computer Science*, 169, 347–352. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.178>
- Hadfield-Menell, D., Russell, S. J., Abbeel, P., & Dragan, A. (2017). Inverse reward design. In I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, & R. Garnett (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 (pp. 6749–6758). Curran Associates, Inc. <https://arxiv.org/abs/1711.02827>
- Han, D., Mulyana, B., Stankovic, V., & Cheng, S. (2023). A survey on deep reinforcement learning algorithms for robotic manipulation. *Sensors*, 23(7), 3762. <https://doi.org/10.3390/s23073762>
- He, H., Zhao, Z., & Wei, Q. (2021). Adaptive hyperparameter tuning for proximal policy optimization in continuous control. *Neural Computing and Applications*, 33(18), 12063–12077. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06013-y>
- He, X., Huang, H., & Li, J. (2024). Personalized robotic control via constrained multi-objective reinforcement learning. *Neurocomputing*, 574, 127011. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127011>

- Hossain, S., Doukhi, O., Jo, Y., & Lee, D. (2020). Deep reinforcement learning-based ROS-controlled RC car for autonomous path exploration in the unknown environment. In *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)* (pp. 1626–1631). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICCAS50221.2020.9268443>
- Kalashnikov, D., Irpan, A., Pastor, P., Ibarz, J., Herzog, A., Jang, E., Quillen, D., Holly, E., Kalakrishnan, M., Vanhoucke, V., & Levine, S. (2018). QT-Opt: Scalable deep reinforcement learning for vision-based robotic manipulation. In J. Kober, F. Ramos, & C. J. Tomlin (Eds.), *Proceedings of the 2nd Conference on Robot Learning* (pp. 651–673). PMLR. <https://proceedings.mlr.press/v87/kalashnikov18a.html>
- Kumar, A., Singh, A., Tian, S., Finn, C., & Levine, S. (2020). Implicit Q-learning for offline reinforcement learning. In H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M. F. Balcan, & H. Lin (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33 (pp. 11993–12003). Curran Associates, Inc. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/0d2b2061826a5df3221116a5085a6052-Abstract.html>
- Li, S., Huang, W., Miao, C., Xu, K., Chen, Y., Sun, T., & Cui, Y. (2024). Efficient robot manipulation via reinforcement learning with dynamic movement primitives-based policy. *Applied Sciences*, 14(22), 10665. <https://doi.org/10.3390/app142210665>
- Liu, R., Li, J., Zhou, X., Sun, Y., Wang, Y., & Zhang, Z. (2021). Deep reinforcement learning for the control of robotic manipulation: A review. *Robotics*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.3390/robotics10010022>
- Luo, J., Xu, C., Wu, J., & Levine, S. (2025). Precise and dexterous robotic manipulation via human-in-the-loop reinforcement learning. *Science Robotics*, 10(95), eads5033. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.ads5033>
- Onori, G., Shahid, A. A., Braghin, F., & Roveda, L. (2024). Adaptive optimization of hyper-parameters for robotic manipulation through evolutionary reinforcement learning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), 108. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02138-8>
- Panzer, M., & Bender, B. (2021). Deep reinforcement learning in production systems: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(13), 4316–4341. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1915633>
- Park, M., Lee, S. Y., Hong, J. S., & Kwon, N. K. (2022). Deep Deterministic Policy Gradient-Based Autonomous Driving for Mobile Robots in Sparse Reward Environments. *Sensors*, 22(24), 9574. <https://doi.org/10.3390/s22249574>
- Shahid, A. A., Piga, D., Braghin, F., & Roveda, L. (2022). Continuous control actions learning and adaptation for robotic manipulation through reinforcement learning. *Autonomous Robots*, 46(1), 483–498. <https://doi.org/10.1007/s10514-022-10034-z>
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (2nd ed.). MIT Press. <http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html>
- Tang, Y., Yan, X., Wang, C., & Liu, Y. (2021). Proximal policy optimization with adaptive exploration for continuous control. *Neurocomputing*, 430, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.09.078>
- Wang, Q. (2023). Dexterous robotic manipulation using deep reinforcement learning. *Expert Systems*, 40(12), e13205. <https://doi.org/10.1111/exsy.13205>
- Wang, T., Zhang, C., & Sun, Y. (2025). Control strategy of robotic manipulator based on multi-task learning and deep reinforcement learning. *Complex & Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40747-025-01816-w>
- Yu, C., Chen, X., & Ma, H. (2022). Dexterous manipulation for multi-fingered robotic hands with reinforcement learning: A review. *Frontiers in Neurorobotics*, 16, 861825. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.861825>
- Zhang, T. (2021). Reinforcement learning for robot research. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 101(3), 1–21. <https://doi.org/10.1177/17298814211007305>
- Zhao, B., Xu, J., & Li, S. (2025). Deep reinforcement learning trajectory planning for robotic manipulator based on simulation-efficient training. *Scientific Reports*, 15(1), 93175. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93175-2>
- Zhong, J., Sun, C., & Liu, Z. (2023). Adaptive Proximal Policy Optimization with dynamic hyper-parameter adjustment for continuous control. *Expert Systems with Applications*, 229, 120495. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120495>
- Zhou, Z., Zhang, Y., & Wang, J. (2022). An improved proximal policy optimization algorithm with clipping for continuous robot control. *IEEE Access*, 10, 75734–75745. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3189123>

Diseño E Implementación De Algoritmos De Colonia De Hormigas Para Mejorar Los Modelos De Contaminación Atmosférica

Estrada-Guerrero Ana Luisa¹

¹ División de Tecnologías (DT), Universidad Tecnológica de Querétaro, México
ana.estrada@uteq.edu.mx

Resumen. En este estudio se implementa una adaptación del algoritmo de optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) que mejora los algoritmos existentes para el modelado de la contaminación por partículas. El modelo propuesto fue probado utilizando datos experimentales recopilados en diversas estaciones de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México entre el 2007 y 2010. Los resultados muestran que ésta adaptación del algoritmo ACO es capaz de modelar con precisión los niveles de partículas menores a 10 micrómetros (PM10), superando en algunos casos a técnicas tradicionales de aprendizaje automático como Support Vector Machines (SVM). Este trabajo contribuye a demostrar la viabilidad del uso de algoritmos inspirados en la naturaleza para problemas ambientales de optimización no lineal, con implicaciones directas en la predicción de la calidad del aire y la toma de decisiones en salud pública.

Palabras clave: Optimización por Colonia de Hormigas, ACO, contaminación atmosférica, Support Vector Machine, algoritmos.

1 Introducción

La contaminación ambiental es sin duda alguna un tema de interés social a nivel internacional. Cada día se da a conocer nuevos niveles de contaminación no solo de nuestro país, sino del resto del mundo y las consecuencias que esto representa en la salud, siendo afectada debido a la presencia de partículas contaminantes suspendidas en el aire. El interés que se tiene sobre el tema va orientado hacia lograr un modelo más confiable con respecto a las mediciones de partículas contaminantes que resultan peligrosas para la salud del ser humano. (Aceves, 2009)

El interés en este tema se orienta hacia un modelado de confianza y predicción de las mediciones de contaminantes en el aire que son particularmente dañinos para la salud humana. (Acevedo et al, 2011;. Cossío-Torres et al., 2013).

Por fortuna, actualmente se cuenta con investigaciones para la predicción de partículas contaminantes en el medio ambiente utilizando algoritmos de fuzzy clustering (agrupaciones difusas) [Muñoz, 2008; López, 2008; Caicedo, 2008], y por otro lado utilizando Support Vector Machines [Sotomayor et al, 2010].

Diseño E Implementación De Algoritmos De Colonia De Hormigas Para Mejorar Los Modelos De Contaminación Atmosférica

Es importante partir de las investigaciones ya realizadas sobre el tema para buscar la mejora de las predicciones que se realiza de la cantidad de partículas contaminantes con la finalidad de aportar a la calidad de vida humana.

En esta contribución se utiliza Optimización de Colonia de Hormigas para mejorar los modelos ya obtenidos por otros métodos de aprendizaje automático para disminuir el error entre los datos reales y el modelo.

2 Antecedentes

2.1 Contaminación

La Ciudad de México constituye un caso de estudio relevante por sus altos niveles de contaminación y en consecuencia por los posibles efectos en la salud a causa de los contaminantes en el aire sobre sus más de 20 millones de habitantes (Stephens et al., 2008; Cossio-Torres et al., 2013; Mölter et al., 2013; Vega et al., 2007; Moffet et al., 2008). y por la disponibilidad de datos a través de su red de monitoreo.

2.2 Inteligencia artificial

Cuando se habla de inteligencia artificial tratamos con un tema sumamente amplio, hay tantas subdivisiones que lo convierte en un reto para su desarrollo sobre todo si lo que se busca es sumergirse en cada una de sus ramas.

La inteligencia de enjambre (Swarm Intelligence) estudia los comportamientos colectivos emergentes en sistemas multiagentes inspirados en la naturaleza. Uno de sus métodos más conocidos es la Optimización por Colonia de Hormigas (Ant Colony Optimization, ACO), propuesta inicialmente por Dorigo en 1992.

El ACO se basa en el comportamiento social de las hormigas, que utilizan una forma de comunicación basada en una sustancia llamada feromona. Esta sustancia, depositada por una hormiga mientras recorre un camino, influye en las hormigas que transitarán ese mismo camino posteriormente. El camino con mayor concentración de feromona permite que la siguiente hormiga que recorra esa ruta encuentre la fuente de alimento de manera eficiente (utilizando el camino más corto disponible). Ha sido comprobado que las estelas de feromona permiten la optimizar de la ruta en la que cada individuo artificial (hormiga) contribuye en la búsqueda de la mejor solución (Munoz et al., 2008). Cada hormiga virtual opera como un agente autónomo responsable de generar una solución completa —o parcial— al problema planteado. Parte de un estado inicial y progresa mediante una secuencia finita de estados vecinos, definida por un criterio de vecindad específico del problema abordado.

3 Materiales y Métodos

Diseño E Implementación De Algoritmos De Colonia De Hormigas Para Mejorar Los Modelos De Contaminación Atmosférica

A continuación, se describen los materiales, procedimientos y consideraciones técnicas empleadas para el desarrollo del modelo propuesto en el presente trabajo.

Para la implementación se utilizó el software Matlab como entorno de programación. Los datos de entrada corresponden a mediciones reales de partículas PM10, registradas cada hora durante 365 días, almacenadas en un archivo Excel (.xlsx). Los datos de entrada fueron tomados de las bases de datos del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) del 2009, pertenecientes a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

El sistema permite seleccionar intervalos de fechas específicos para analizar tendencias de comportamiento y generar una gráfica comparativa entre los valores reales y los obtenidos mediante el modelo ACO. Asimismo, el programa calcula el porcentaje de error entre ambas tendencias, con el fin de evaluar la precisión del modelo predictivo.

A continuación, se describen las etapas principales del algoritmo implementado:

1. Iniciar
2. Leer la fecha inicial y fecha final, a manera de obtener un rango de días de los cuales se desea calcular la tendencia de acumulación de partículas PM10.
3. Leer el número de hormigas m , que se utilizarán para el cálculo.
4. Cargar valores iniciales para el proceso, asignando la posición inicial de la hormiga, donde la primera vez se asigna en la ubicación 1, la cual se refiere a la primera hora. A partir del segundo día se toma como posición inicial el último punto de la ruta anterior.
5. Leer 24 valores correspondientes a las lecturas obtenidas por cada hora del día señalado.
6. Calcular la media de los 24 valores obtenidos del punto 5.
7. Calcular la matriz de distancia en base a los 24 valores obtenidos del punto 5.
8. Calcular la matriz de visibilidad en función de la matriz de distancia, ésta matriz servirá para determinar la conveniencia de tomar un camino del punto i al j .
9. Calcular la ruta que seguirá cada una de las m hormigas y almacenarla en un arreglo llamado matriz tabú, dicho cálculo se realizará en base a la matriz de visibilidad y el cálculo de la probabilidad de elegir el siguiente punto (alguno de los 24 valores disponibles).
10. Calcular el costo de las distancias para cada hormiga utilizando la matriz tabú ya que es ésta quien tiene guardada la ruta que siguió cada hormiga.
11. Actualizar el nivel de feromona.
12. Determinar la ruta de la hormiga con el menor costo de distancia.
13. Regresar al punto 4 con los datos del siguiente día. Terminará el proceso de repetición hasta llegar a la fecha final, cuando se cumpla pasar al punto 14.
14. Mostrar como resultado la tendencia real y la calculada con las hormigas y mostrar el porcentaje de error calculado entre ambas tendencias.
15. Finalizar.

4 Desarrollo

Se diseñó un modelo basado en ACO utilizando información del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA). El algoritmo fue programado para procesar datos horarios, calcular distancias y rutas óptimas de predicción, y actualizar los niveles de feromonas según la calidad de las soluciones obtenidas. Para las pruebas se utilizaron datos sobre partículas PM10, NO₂ y O₃.

En el caso de la predicción del comportamiento de las partículas PM10, el algoritmo original propuesto por Dorigo (1992) resultaba complejo de implementar, ya que está diseñado para identificar la mejor ruta entre dos puntos considerando un trayecto de ida y vuelta. Sin embargo, este enfoque no era adecuado para el comportamiento de las partículas PM10, dado que su evolución se espera de manera lineal en el tiempo, sin un punto de retorno. Por ello, fue necesario adaptar el algoritmo para que el punto final de cada iteración funcionara como el nuevo punto de partida.

La estrategia adoptada consistió en establecer como punto inicial el día uno del periodo de análisis y como punto final el día dos, el cual, a su vez, se convertía en el punto de inicio del ciclo siguiente, permitiendo así dar continuidad al modelado temporal.

Los resultados experimentales muestran que ACO logra una precisión del 90–93% tal como se muestra en la Figura 1 la cual es una gráfica generada por el software construido para PM10, superando los mejores resultados de SVM (87.1%). En contraste, para NO₂ y O₃ la precisión fue menor, llegando en algunos casos a solo 29–37%. Esto indica que el modelo es altamente prometedor para partículas sólidas, pero requiere ajustes o combinaciones híbridas para contaminantes gaseosos.

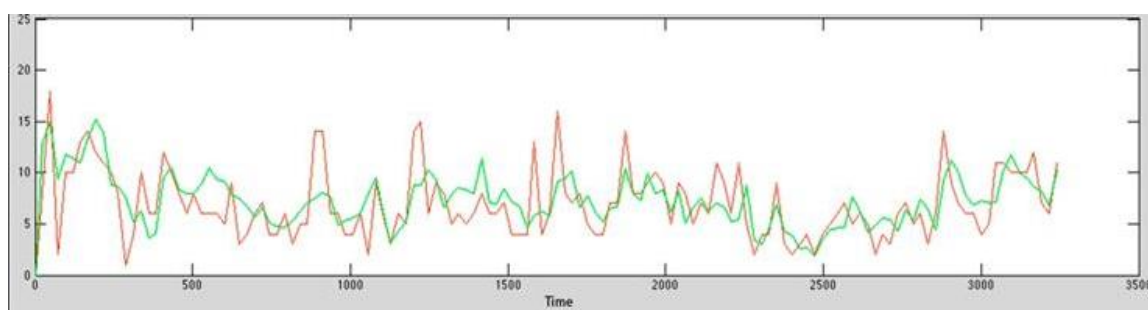


Figura 1. Resultados de ACO frente a datos reales y promedio de los datos calculados por el algoritmo para PM10 de la Ciudad de México.

En color verde se muestran los datos reales correspondientes al mismo rango de fechas, los cuales fueron obtenidos de los archivos de mediciones de la red de monitoreo de la Ciudad de México. En color rojo se representa la media calculada mediante el algoritmo ACO de los 24 valores estimados por día del periodo analizado.

5 Conclusiones

El objetivo de este estudio fue modelar y optimizar las tendencias de concentración de partículas ambientales mediante el uso de algoritmos inspirados en la inteligencia colectiva animal. En concreto, se buscó desarrollar un sistema que, a partir de los registros de mediciones reales de contaminantes atmosféricos como lo es las partículas PM10, fuera capaz de generar proyecciones sobre el comportamiento de sus niveles de concentración empleando técnicas de inteligencia de enjambres.

Como se observó, aunque el algoritmo ACO no proporciona una solución definitiva al objetivo planteado, resulta adecuado para el modelo propuesto, ya que la simulación del comportamiento natural de las hormigas presenta una analogía cercana al movimiento y distribución de las partículas contaminantes. En ambos casos, se identifica inicialmente un comportamiento caótico que, tras un periodo determinado, tiende hacia un estado de convergencia.

Por otro lado, al analizar el comportamiento de la partícula PM10 en diferentes años, se obtuvieron porcentajes de certeza relativamente bajos. No obstante, se observó que el algoritmo ACO presenta un mejor desempeño cuando se aplica a intervalos de tiempo amplios, lo que sugiere que requiere un periodo mayor para alcanzar la convergencia.

Asimismo, se considera que la inclusión de variables adicionales, como la temperatura y la humedad, podría mejorar la precisión de las tendencias estimadas. Sin embargo, hasta el momento no ha sido posible incorporar satisfactoriamente dichos parámetros en el modelo basado en ACO.

Referencias

Aceves-Fernandez MA, Sotomayor-Imedo A, Gorrostieta-Hurtado E, Pedraza-Ortega JC, Ramos -Arreguín JM, Canchola-Magdaleno S, Vargas-Soto E (2011). *Advances in Airborne Pollution Forecasting Using Soft Computing Techniques, Air Quality-Models and Applications*, Prof. Dragana Popovic (Ed.), ISBN: 978-953-307-307-1, intech, DOI: 10.5772/16273.

Arbex MA, Nascimento Saldiva PH, Amador Pereira LA, Ferreira Braga AL (2010). Impact of outdoor biomass air pollution on hypertension hospital admissions. *J Epidemiol Community Health*. 64:573-579.

Calixto CAC (2005). Implementación en hidroinformática de un método de optimización matemática basada en la colonia de hormigas. (Thesis), Facultad de Ingeniería de Pontificia Universidad Javerina, Bogotá.

Cases B, Olasagasti FJ, Moujahid A, D'Anjou A (2014). "Swarm Intelligence: una aplicación a la toma de decisiones colectivas. "Proceedings of the 2nd Workshop on Social Simulation and Artificial Societies Analysis (SSASA'08), 2008; fetched from: http://ceur-ws.org/Vol-442/p6_CasesOlasagastiMoujahidAnjou.pdf Looked up: February 18.

Cossío-Torres P, Calderón J, Tellez-Rojo M, Díaz-Barriga F (2013). Factors related to health outcomes and health risk behaviors of adolescents with lead exposure. A pilot study, *Salud Mental*;36:73-81. Dorigo M (1993). "Optimization, Learning and Natural Algorithms". Ph.D. thesis, Politecnico di Milano, Italia.

Moffet RC, Foy B, Molina LT, Molina MJ, Prather KA (2008). Measurement of ambient aerosols in northern Mexico City by single particle mass spectrometry, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 4499–4516.

Mölter A, Agius RM, de Vocht F, Lindley S, Gerrard W, Lowe L, Belgrave D, Custovic A, Simpson A (2013). Long-term Exposure to PM10 and NO2 in Association with Lung Volume and Airway Resistance in the MAAS Birth Cohort, *Environmental Health Perspectives*, 121:10, pp. 1232-1238.

Monirul K, Md S, Kazuyuki M (2013). Ant Colony Optimization Toward Feature Selection, *Ant Colony Optimization - Techniques and Applications*, Dr. Helio Barbosa (Ed.), ISBN: 978-953-51-1001-9, InTech, DOI: 10.5772/51707.

Muñoz MA, López JA, Caicedo EF (2008). "Swarm intelligence: problem-solving societies (a review)".

NOM (Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993). Salud ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado. Última modificación, Septiembre del 2005. Secretaría de Salud, México (Health Secretariat).

O'Neill MR, Loomis D, Borja-Aburto VH (2004). Ozone, area social conditions and mortality in Mexico City. *Environmental Research*, 94, 234-242.

OPS (Organización Panamericana de la Salud), "Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América Latina y el Caribe". ISBN 9275125988.2005. Fetched from: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsea/fulltext/contaminacion/contaminacion.pdf>, looked up: 25-marzo-2013.

Rao D, Phipatanakul W (2011). Impact of Environmental Controls on Childhood Asthma, *Curr Allergy Asthma Rep* 11:414-420. Sotomayor-Olmedo A, Aceves-Fernández MA, Gorrostieta-Hurtado E, Pedraza-Ortega C, Ramos-Arreguín JM, Tovar-Arriaga S (2013). "Forecast Urban Air Pollution in Mexico City by using Support Vector Machines: a Kernel Performance Approach".

Stephens S, Madronich S, Wu F, Olson J, Ramos R, Retama A, Munoz R (2008). Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of CO, NOx, PM10 and O3 during 1986-2007, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 8357-8384.

Suh Helen H, Zanobetti A, Schwartz J, Coull Brent A (2011). Chemical Properties of Air Pollutants and Cause-Specific Hospital Admissions among the Elderly in Atlanta, Georgia, *Environmental Health Perspectives*, 119-10.

Vega E, Ruiz H, Martínez -Villa G, Sosa G, González -Ávalos E (2007). Fine and Coarse Particulate Matter Chemical Characterization in a Heavily Industrialized City in Central Mexico during Winter 2003, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57:5, 620-633, DOI: 10.3155/1047-3289.57.5.620

Weinmayr G, Romeo E, De Sario M, Weiland SK, Forastiere F (2010). Short-Term Effects of PM10 and NO2 on Respiratory Health among Children with Asthma or Asthma-like Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Circulation*. 121:2331-2378. Yan-Ju L, Roy MH (2011). Properties of coarse particles in the atmosphere of the United Kingdom, *Atmospheric Environment*. 45:3267-3276.

Yungling Leo L, Wen-Hua W, Chia-Wen L, Ya-Hui L, Bing-Fang H ((2011). Effects of ambient air pollution on pulmonary function among schoolchildren, *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 214 369- 375.

Diseño Mecánico De Un Módulo De Monitoreo Óptico On-Axis Para La Detección De Defectos En LMD

Citlalli Jazmín Chávez Zúñiga^{1*}, Arturo Tadeo Calderón Salazar^{1,2}, Ángel Iván García Moreno¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital, El Nith Km 4, 42300 Hidalgo, México
c.chavez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. La manufactura aditiva de metales mediante la tecnología *Laser Metal Deposition* (LMD) permite la producción de componentes con geometrías complejas, siendo ampliamente utilizada en industrias como la aeroespacial, automotriz y médico. No obstante, la presencia de defectos como rugosidad superficial, porosidad, falta de fusión y formación de cavidades profundas (*keyhole*) puede comprometer la integridad y la calidad final de las piezas, limitando su aceptación en aplicaciones industriales. Este trabajo expone el desarrollo de un módulo de monitoreo óptico on-axis, diseñado para acoplarse directamente al cabezal de depósito. Su función es capturar, mediante el uso de fotodiodos y filtros ópticos, la radiación emitida por la piscina fundida en distintos rangos del espectro electromagnético. El diseño mecánico integra sensores capaces de abarcar desde la región ultravioleta UV-A hasta el infrarrojo medio MIR, con el propósito de ofrecer una comprensión más amplia del proceso de fusión y correlacionar estas señales ópticas con la presencia de defectos críticos durante el proceso LMD. La metodología se estructuró en dos etapas. Primero, se seleccionaron y validaron preliminarmente los sensores y filtros, asegurando la sensibilidad en las diferentes bandas espectrales. Posteriormente, se diseñó el módulo optomecánico en SolidWorks bajo criterios de manufacturabilidad (DFM). Esta estrategia tecnológica busca avanzar hacia un monitoreo más preciso, con potencial de implementarse en sistemas de control de calidad en tiempo real dentro del contexto de manufactura aditiva metálica.

Palabras Clave: Manufactura aditiva, monitoreo on-axis, fotodiodos.

1 Introducción

La manufactura aditiva (MA), o *Additive Manufacturing (AM)*, se ha consolidado como una tecnología disruptiva que transforma la producción de componentes metálicos mediante la adición controlada de material capa por capa desde un modelo tridimensional. A diferencia de los procesos sustractivos, que requieren eliminar material para lograr la geometría deseada, la manufactura aditiva reduce el desperdicio, optimiza el uso de materia prima y permite una personalización sin precedentes.

Entre las variantes de la MA, el proceso de depósito de metal mediante láser (LMD, por sus siglas en inglés) ha demostrado ser una técnica versátil para la reparación, recubrimiento y fabricación directa de componentes metálicos de forma localizada y precisa (Vafadar et al., 2021).

En este proceso, el láser funciona como una fuente de energía concentrada capaz de fundir simultáneamente la base y el material de aporte metálico, en forma de polvo o alambre, para construir la pieza capa por capa. Este control permite generar detalles específicos, útiles en la fabricación de componentes críticos o con geometrías complejas difíciles de obtener con métodos tradicionales.

No obstante, mantener la estabilidad del proceso no siempre es sencillo. Parámetros como la potencia del láser, la velocidad de desplazamiento, la cantidad de material o la atmósfera de trabajo influyen directamente en el resultado. Una configuración inadecuada puede generar defectos como rugosidad superficial, porosidad interna, falta de fusión o cavidades profundas conocidas como *keyholes* (Cheng et al., 2022). Estos defectos no son solo fallas estéticas, sino que afectan la resistencia, precisión dimensional y confiabilidad de la pieza, especialmente en aplicaciones industriales donde la calidad es crítica.

El monitoreo in situ ha emergido como una herramienta crucial para elevar la confiabilidad en manufactura aditiva, permitiendo el seguimiento y la caracterización precisa del proceso. Mazzarisi et al. (2025) desarrollaron un sistema off-axis empleando cámaras de alta velocidad para analizar la evolución de la piscina fundida y detectar defectos geométricos, mientras que Clijsters et al. (2014) demostraron que sistemas coaxiales permiten correlacionar inestabilidades ópticas con formaciones de cavidades tipo *keyhole*, lo cual es fundamental para la prevención de defectos críticos en materiales. Por otro lado, Iravani-Tabrizipour y Toyserkani (2007) emplearon arreglos de cámaras CCD y algoritmos de redes neuronales para la medición en tiempo real de la altura del depósito, logrando precisión dimensional superior en los procesos aditivos.

Pese a sus avances, estos enfoques presentan limitaciones notables, como altos costos, integración compleja y restricciones en la velocidad de muestreo. Frente a ello, los fotodiodos se consolidan como una alternativa eficiente y práctica, gracias a su bajo costo, alta frecuencia de respuesta y selectividad espectral. Este tipo de sensores permite correlacionar emisiones ópticas con fenómenos térmicos y físicos de la piscina fundida, ofreciendo ventajas competitivas para el monitoreo compacto.

Li et al. (2021) validaron el análisis de señales ópticas in situ para la detección de dinámicas de fusión en aleaciones de aluminio, mientras que Cao et al. (2023) demostraron la capacidad de los fotodiodos para detectar y clasificar defectos de porosidad a través de filtros espectrales y mapas de pseudocolor, potenciando su uso en estrategias avanzadas de monitoreo y control del proceso.

La tabla 1, resume algunas de las propuestas más relevantes, comparando sus características principales.

Tabla 1. Sistemas de monitoreo óptico para procesos de manufactura aditiva.

Artículo	Rango espectral	Tipo de sensor	Configuración	Tecnología
In-Process Detection of Defects on Parts Produced by Laser Metal Deposition Using Off-Axis optical monitoring	Visible	Cámara de alta velocidad	Off-Axis	LMD
In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system	Visible–NIR 400–1100 nm	Cámara CMOS- Fotodiodo	On-Axis	SLM
An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height	Visible	Cámaras CCD- IA	Off-Axis	LMD
Analysis of In Situ Optical Signals during Laser Metal Deposition of Aluminum Alloys	Visible-NIR 400–1800 nm	Fotodiodos	On-Axis	LMD
Monitoring of Single-Track Melting States Based on Photodiode Signal during Laser Powder Bed Fusion	Visible-NIR 500–1700 nm	Fotodiodos	On-Axis	LMD
Diseño mecánico de un módulo óptico On-Axis para la detección de defectos en LMD	UV–MIR (350–2600 nm) con Si, Ge, InGaAs + filtros	Fotodiodos	On-Axis	LMD

Estas investigaciones permiten comprender que el uso de fotodiodos constituye un paso estratégico hacia la integración de mecanismos de control de calidad en tiempo real en los sistemas de monitoreo del proceso.

La estandarización en manufactura aditiva metálica se encuentra respaldada por marcos normativos internacionales que enfatizan el control del proceso y la trazabilidad de los componentes. Tanto la ISO/ASTM 52920:2023 como los lineamientos técnicos del NIST (2022) destacan la necesidad de implementar sistemas de monitoreo capaces de reducir la variabilidad

inherente y mejorar la confiabilidad de las piezas producidas. En la misma línea, el roadmap del AMSC (2020) establece el monitoreo y control de parámetros como ejes prioritarios para la adopción industrial de la manufactura aditiva.

Bajo este contexto normativo y técnico, se plantea el desarrollo de un módulo óptico on-axis multispectral para LMD, concebido como herramienta compacta y eficiente de monitoreo. El dispositivo, fabricado en aluminio 6061-T6 anodizado, aprovecha las propiedades de alta rigidez específica, conductividad térmica adecuada y resistencia a la corrosión, características que garantizan su desempeño y durabilidad en entornos operativos exigentes.

El diseño, generado en SolidWorks, permite un acoplamiento preciso al cabezal e integra fotodiodos de silicio (Si), germanio (Ge) y arseniuro de indio y Galio (InGaAs), protegidos por filtros ópticos que permiten la detección en diferentes regiones del espectro electromagnético.

En este contexto, es importante señalar que la región ultravioleta se subdivide en tres bandas: UV-C (100–280 nm), UV-B (280–315 nm) y UV-A (315–400 nm). Considerando, para el diseño propuesto, únicamente la franja UV-A, dado que corresponde al rango espectral de interés para el proceso LMD. Esta configuración posibilita correlacionar emisiones específicas con defectos característicos: en el UV-A, la detección de plasma y salpicaduras asociadas a rugosidad; en el infrarrojo cercano (NIR), la identificación de variaciones térmicas vinculadas a porosidad y falta de fusión; y en el infrarrojo medio (MIR), la caracterización de gradientes energéticos intensos relacionados con la formación de cavidades tipo *keyhole*.

Con esta estrategia se pretende establecer las bases para un sistema de control de calidad en línea, enfocado en la reducción de defectos y costos de inspección, al tiempo que fortalece la confiabilidad y competitividad de la manufactura aditiva metálica moderna.

2 Materiales y métodos

El desarrollo del módulo de monitoreo óptico on-axis se estructuró en dos etapas. La primera comprende la selección de los componentes más óptimos y en la segunda etapa se trabajó el diseño de un prototipo funcional, capaz de integrarse de manera directa al cabezal del sistema LMD. De esta manera se pudieron validar previamente los sensores y filtros a utilizar antes de pasar al diseño mecánico, garantizando así la coherencia entre las necesidades de detección óptica y los requerimientos industriales de montaje.

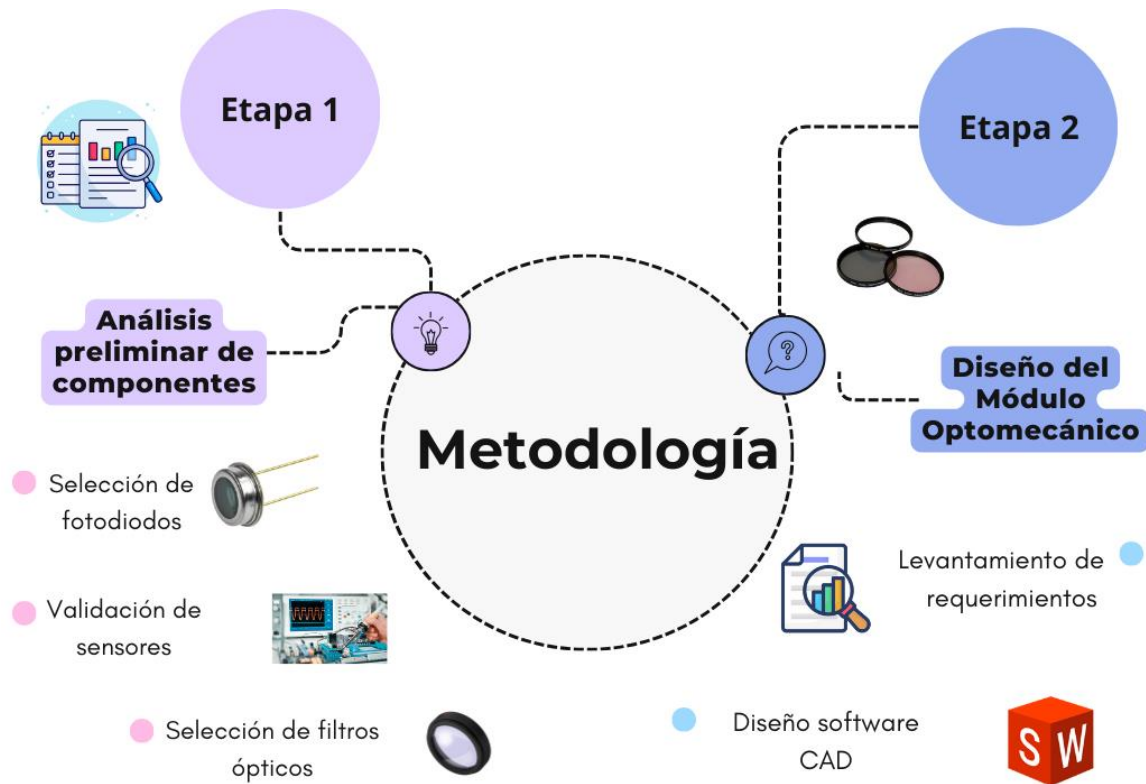


Figura 1. Metodología propuesta para el desarrollo del módulo óptico on-axis.

2.1 Etapa 1: Análisis preliminar de componentes

En esta fase inicial se llevó a cabo el análisis de diversos fotodiodos de acuerdo a sus materiales de fabricación; silicio (Si); germanio (Ge) y arseniuro de indio y galio (InGaAs), considerando su sensibilidad espectral y velocidad de respuesta. Su desempeño se evaluó en modo fotoconductor con polarización inversa, utilizando una fuente de voltaje regulada y un osciloscopio digital.

Se seleccionaron filtros ópticos pasa altas y pasa bajas que permiten aislar rangos espectrales relevantes para la detección de defectos en la piscina fundida.

La tabla 2, resume las características técnicas principales de los fotodiodos seleccionados.

Tabla 2. Características principales de los fotodiodos seleccionados.

Fotodiodo	Material	Rango espectral (nm)	Área activa (mm ²)	Responsividad típica (A/W)	Tiempo de respuesta (ns)
FDS100-CAL	Si (Silicio)	350-1100 nm	13 mm ²	0.65 A/W	10 ns

FDSA21-CAL	InGaAs (Arseniuro de indio y galio)	800-1700 nm	3.1 mm ²	1.04 A/W	25 ns
FDG03-CAL	Ge (Germanio)	800-1800 nm	7.1 mm ²	0.85 A/W	600 ns
FDG03	Ge (Germanio)	800-1800 nm	7.1 mm ²	0.85 A/W	600 ns
FD10D	InGaAs (Arseniuro de indio y galio)	900-2600 nm	1 mm ²	1.3 A/W	25 ns

Se seleccionaron sensores que detectan radiación en diferentes bandas pero que también aportan información específica para asociar las emisiones ópticas con defectos críticos del proceso.

Para establecer la relación entre los rangos espectrales, los fotodiodos y los defectos característicos en LMD, se realizó un análisis detallado combinando resultados experimentales reportados en la literatura y la caracterización espectral de los sensores disponibles. Se consideraron las emisiones ópticas típicas asociadas a diferentes fenómenos de fusión y su intensidad relativa en distintas regiones del espectro, así como la sensibilidad espectral de fotodiodos de silicio (Si); germanio (Ge) y arseniuro de indio y galio (InGaAs).

Esta relación se presenta en la tabla 3, mostrando de manera clara cómo la selección de sensores permite detectar defectos críticos en tiempo real durante el proceso.

Tabla 3. Relación entre rangos espectrales y defectos característicos en LMD.

Rango espectral	Fotodiodo asociado	Defecto correlacionado	Referencia
UV-A (350–400 nm)	Si (FDS100)	Rugosidad superficial, salpicaduras	Cheng et al. (2022)
Visible–NIR (400–1100 nm)	Si/Ge (FDS100, FDG03)	Porosidad, falta de fusión	Clijsters et al. (2014); Cao et al. (2023)
MIR (2.5–5 μm)	InGaAs (FGA21)	Cavidades profundas (<i>keyhole</i>)	Clijsters et al. (2014)

Etapla 2: Diseño del módulo optomecánico.

Con la selección de los componentes ópticos definidos, se procedió al realizar el diseño del módulo en SolidWorks, empleando un enfoque paramétrico que permite ajustar dimensiones y tolerancias en función del cabezal de depósito. El diseño consideró:

- Soportes internos dedicados para los fotodiodos y filtros.
- Canales de disipación térmica que reducen el riesgo de daño por radiación incidente o calor conducido.
- Un sistema de fijación mecánica que asegura estabilidad ante vibraciones y cambios de orientación durante el proceso.

El módulo será instalado en un brazo robótico ABB IRB 6620-120 de 6 ejes, acoplado a un cabezal láser TRUMPF BEO D70 y un láser de estado sólido Trumpf Trudisk de alta potencia (4 kW), lo que permite su validación en un entorno industrial real.

3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema de monitoreo óptico on-axis para procesos LMD. Se muestra la integración de los fotodiodos con filtros ópticos para la detección espectral multibanda, y el diseño mecánico que protege y asegura la operación estable del sistema durante el proceso.

3.1 Integración de fotodiodos y filtros ópticos

Se definió una configuración que integra fotodiodos de Si, Ge, e InGaAs con filtros ópticos pasa altas y pasa bajas, cubriendo un rango espectral de 350 a 2600 nm, lo que permite aislar fenómenos específicos asociados al proceso de LMD.

Como se muestra en la tabla 4, la arquitectura modular emplea filtros combinados de paso alto y paso bajo, asegurando que cada rango espectral se relacione con defectos característicos del proceso LMD.

3.2 Diseño mecánico del módulo

El diseño mecánico del módulo de monitoreo óptico on-axis fue concebido con un enfoque paramétrico y modular, permitiendo su integración estable en el cabezal de proceso TRUMPF BEO D70, montado sobre un brazo robótico ABB IRB 6620-120. El objetivo principal fue garantizar robustez estructural, disipación térmica adecuada y facilidad de ensamble, asegurando al mismo tiempo la protección de los fotodiodos frente a radiación, salpicaduras y contaminantes del proceso LMD.

Tabla 4. Configuración de fotodiodos y filtros ópticos propuesta.

Fotodiodo	Filtro	Tipo de filtro	Justificación
FDS100-CAL (Si)	FESH0700	Paso bajo	Deja pasar UV-visible, bloque NIR
FDSA21-CAL (InGaAs)	FESH0950+	Paso alto+Paso bajo	Ventana NIR baja

	FELH1000		
FDG03 (Ge)	FELH1000	Paso alto+Paso	Puente NIR bajo-medio
FD10D	FELH1500	Paso alto+Paso bajo	NIR medio
FD10D(inGaAs)	-	-	-

Esta arquitectura modular permite relacionar cada umbral espectral con defectos característicos en LMD: UV-visible con rugosidad y salpicaduras, NIR con porosidad y falta de fusión, y MIR con cavitación tipo *keyhole*.

La figura 2 presenta la vista general del módulo en CAD, donde se señalan los principales componentes que conforman el diseño:

- Cabezal de acoplamiento
- Base estructural
- Barras de sujeción
- Carcasa del fotodiodo
- Soporte de sujeción

Cabezal de acoplamiento al sistema LMD: El módulo diseñado se integrará al cabezal TRUMPF BEO D70, como se muestra en la figura 3, utilizado en combinación con un láser de estado sólido Trumpf Trudisk y un brazo robótico ABB IRB 6620-120 de 6 ejes, figura 2.

Carcasa del fotodiodo

El diseño mecánico de la carcasa se compone de once elementos principales, cada uno con funciones específicas orientadas a garantizar la protección del fotodiodo, la estabilidad mecánica y la integración del sistema al cabezal de LMD, tal y como se muestra en la figura 4.

1. Bloque base y disipador: fabricado en aluminio (aleación 1100 o 3003) con dimensiones de $5 \times 6 \times 2.54$ cm, este bloque constituye la base estructural y de disipación térmica del módulo. Integra una cavidad para alojar la tarjeta PCB con el fotodiodo, un canal para la circulación de refrigerante líquido y un alojamiento para sello o'ring, lo que asegura tanto el control de temperatura como la hermeticidad del sistema.

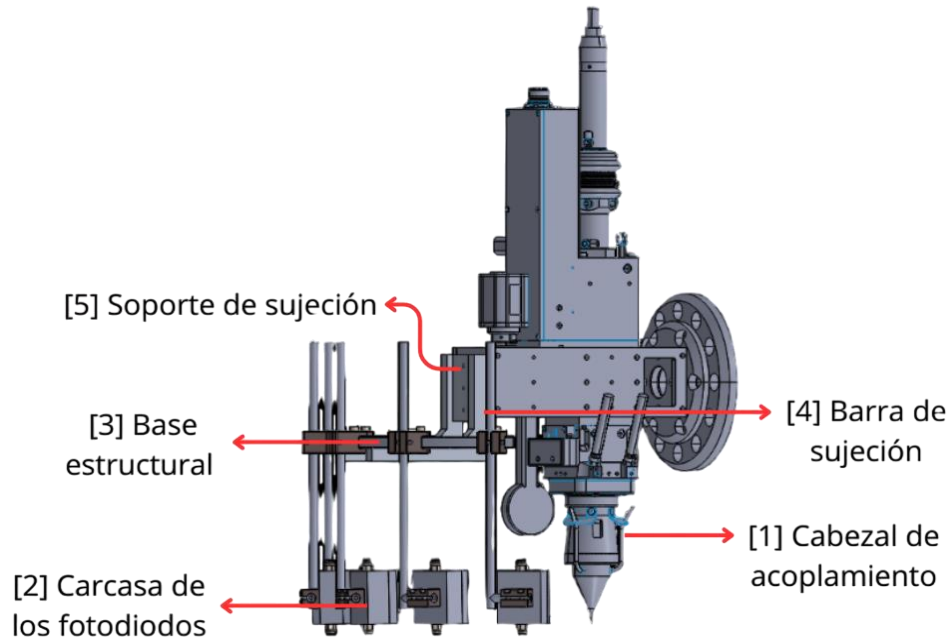


Figura 2. Vista general del módulo en CAD.

2. Conectores NPT: Dos conectores con rosca estándar NPT permiten el acoplamiento de mangueras hidráulicas de 6 mm de diámetro, asegurando la entrada y salida del refrigerante en el canal interno del bloque base.
3. Tarjeta electrónica PCB: Con dimensiones de $3 \times 2 \times 0.13$ cm, con un conector JST de 3 pines para alimentar voltaje al fotodiodo y con pistas para la adquisición de señal.
4. Separadores de Nylamid: Cuatro separadores de 1.8 mm de diámetro y 3.65 mm de longitud aíslan la PCB del fondo metálico, evitando cortocircuitos y facilitando un montaje seguro.
5. Bloque de sujeción: Elemento auxiliar mecanizado en aluminio (1100 o 3003), con dimensiones de $3 \times 2 \times 2$ cm, diseñado para fijarse en la parte posterior del bloque base. Permite orientar y sujetar la carcasa dentro del sistema de integración.
6. Tornillos M3 (20 mm): Dos tornillos M3 $\times$ 20 aseguran el bloque de sujeción al bloque base, proporcionando estabilidad mecánica.
7. Bloque de sujeción para filtro: Con dimensiones de $5 \times 6 \times 0.953$ cm, este componente actúa como tapa superior del módulo. Incluye un anillo de autoalineación para el fotodiodo y la PCB. Además, cuenta se diseñó con un canal frontal para alojar filtros ópticos, garantizando precisión en el alineamiento y protección del sensor.
8. Sello o'ring: Sello hermético Parker serie 2-047 con diámetro interno de 114.02 mm, utilizado para asegurar el cierre entre la tapa superior y el bloque base, evitando fugas y contaminaciones externas.

9. Filtro óptico: Filtro FELH0700, empleado para aislar la región espectral deseada y garantizar la selectividad de la señal captada por el fotodiodo.
10. Tornillos M3 (12 mm): Ocho tornillos ISO 4762 M3 × 12 – 12N, distribuidos estratégicamente para fijar el bloque de sujeción del filtro y mantener el cierre uniforme de la carcasa.
11. Retenedor de filtro: Bloque de 4 × 3.5 × 0.6 cm que asegura el filtro óptico en su posición, evitando desalineamientos durante el montaje o por vibraciones en operación.

Base estructural y soporte de sujeción

El módulo optomecánico se compone de dos elementos principales: la base estructural figura 5a) encargada de proporcionar rigidez y estabilidad al conjunto. Su geometría semicircular permite alinear y fijar la carcasa del fotodiodo respecto al eje óptico del láser, reduciendo desplazamientos axiales y radiales durante el proceso, figura 4a).

El segundo elemento corresponde al soporte de sujeción figura 4b), cuya función es fijar el sistema al cabezal de proceso. Este soporte constituye la interfaz de conexión entre el módulo y el cabezal TRUMPF, incorporando barrenos para tornillería M4 y un sistema de ajuste lateral que garantiza estabilidad frente a vibraciones.

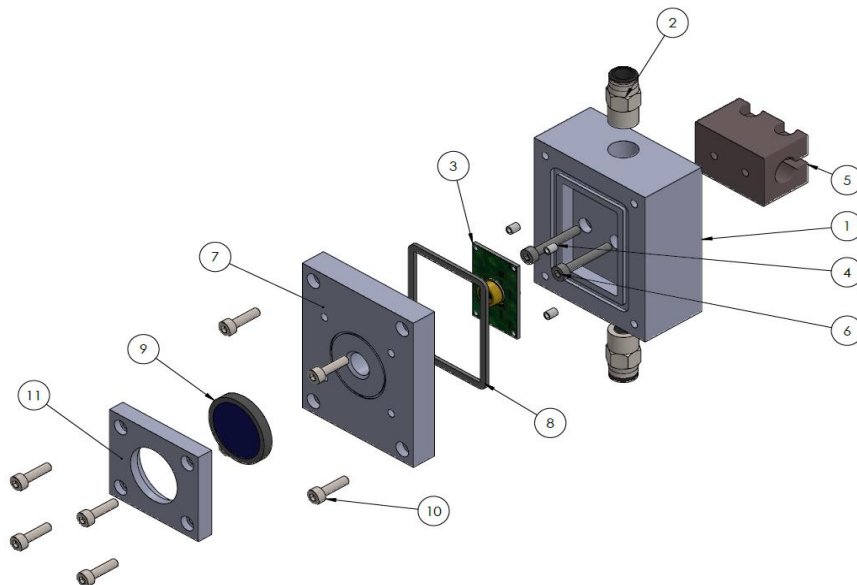


Figura 3. Vista explosionada de la carcasa del fotodiodo.

Barras de sujeción

Las barras actúan como guías de alineación y refuerzo estructural, asegurando que la carcasa del módulo permanezca en posición estable durante la operación, incluso ante variaciones de temperatura y vibración del robot, figura 4c) .

El prototipo alcanzó una configuración estable y adaptable a fotodiodos que permite su uso tanto en aplicaciones de monitoreo en tiempo real como en estrategias futuras de control. En comparación con configuraciones off-axis, el módulo on-axis diseñado reduce la interferencia causada por salpicaduras y partículas expulsadas, aumentando la fidelidad en la detección de variaciones de intensidad asociadas a defectos como porosidad, falta de fusión y desalineación de material.

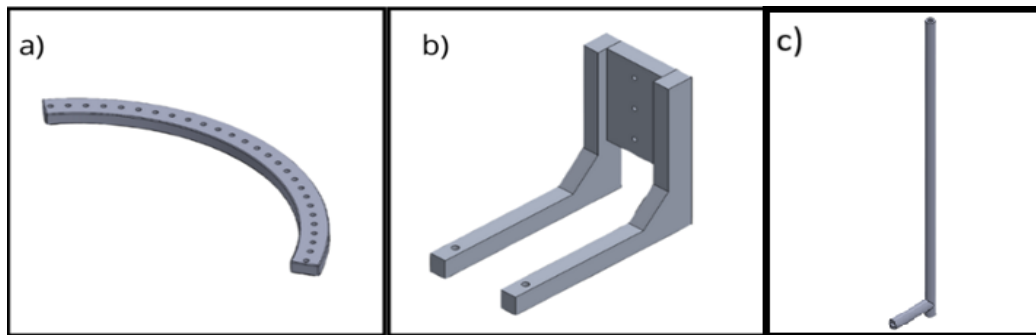


Figura 4. a) Base estructural, b) Soporte de sujeción, c) Barra de sujeción.

Los resultados reflejan un sistema con una arquitectura óptica segmentada en cuatro ventanas espectrales, caracterizadas por su alta selectividad y mínima interferencia, junto con un diseño mecánico robusto y confiable.

4 Discusión

El diseño mecánico de un módulo de monitoreo óptico on-axis multibanda para procesos LMD representa un paso importante hacia la incorporación de sistemas de control de calidad en tiempo real dentro de la manufactura aditiva metálica. A diferencia de enfoques más tradicionales, que suelen basarse en el monitoreo off-axis o en inspecciones posteriores al proceso, la propuesta aquí presentada permitirá el monitoreo de defectos mediante el monitoreo en tiempo real y la implementación de algoritmos de inteligencia artificial para sistemas de visión por computadora.

La validación y selección de fotodiodos de silicio, germanio e InGaAs, junto con filtros ópticos pasa altas y pasa bajas, hace posible abarcar un rango espectral muy amplio (350–2600 nm). Por lo que la señal se puede segmentar en cinco umbrales con baja interferencia, lo que abre la puerta a relacionar cada región del espectro con defectos específicos, como porosidad, falta de fusión o cavidades tipo keyhole. Esta capacidad será posible mediante la implementación de algoritmos de ciencia de datos, que permitan recopilar información suficiente para que la inteligencia artificial pueda detectar que tipo de defecto se está presentando.

Desde la perspectiva del diseño mecánico, el módulo no solo responde a la necesidad de sensibilidad óptica, sino también a los retos de operatividad industrial. La integración de canales de refrigeración, sellado hermético y soportes internos asegura que los sensores trabajen de manera estable en condiciones reales de fabricación. Este enfoque, guiado por criterios de manufacturabilidad (*Design For Manufacturing*), distingue al módulo frente a propuestas previas

que se quedaban en un nivel más experimental. Además, su compatibilidad con el cabezal TRUMPF BEO D70 montado en un robot ABB IRB 6620-120 lo convierte en un sistema flexible, que una vez validado en el entorno real de funcionamiento puede proporcionar una alternativa más económica frente a módulos comerciales y además considerando que es un desarrollo tecnológico propio, lo que pone al Centro De Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y al país a la vanguardia de este tipo de módulos *on axis*.

En conclusión, se considera que el diseño mecánico propuesto y su implementación real en proceso es viable y puede representar una solución alternativa para enfrentar los desafíos actuales en el control de calidad del proceso LMD. Su contribución radica en ofrecer una plataforma integral y escalable, capaz de integrarse en líneas de producción automatizadas y alineada con los estándares internacionales y de normalización en manufactura aditiva metálica.

Referencias

America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC). (2018). Standardization roadmap for additive manufacturing (version 2.0). <https://www.ansi.org/standards-activities/standards-coordination/standards-coordination-activities/amsc>

Cao, L., Hu, W., Zhou, T., Yu, L., & Huang, X. (2023). Monitoring of Single-Track Melting States Based on Photodiode Signal during Laser Powder Bed Fusion. *Sensors*, 23(24), 9793. <https://doi.org/10.3390/s23249793>

Cheng, J., Xing, Y., Dong, E., Zhao, L., Liu, H., Chang, T., Chen, M., Wang, J., Lu, J., & Wan, J. (2022). An Overview of Laser Metal Deposition for Cladding: Defect Formation Mechanisms, Defect Suppression Methods and Performance Improvements of Laser-Cladded Layers. *Materials*, 15(16), 5522. <https://doi.org/10.3390/ma15165522>

Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K., & Kruth, J. (2014). In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), 1089-1101. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6214-8>

Iravani-Tabrizipour, M., & Toyserkani, E. (2007). An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height. *Machine Vision And Applications*, 18(6), 343-354. <https://doi.org/10.1007/s00138-006-0066-7>

ISO/ASTM 52920:2023; Additive Manufacturing—Qualification Principles—Requirements for Industrial Additive Manufacturing Processes and Production Sites. ISO: Geneva, Switzerland, 2023.

Mazzarisi, M., Guerra, M. G., Latte, M., Devito, F., Galantucci, L. M., Campanelli, S. L., Lavecchia, F., & Dassisti, M. (2025). In-Process Detection of Defects on Parts Produced by Laser Metal Deposition Using Off-Axis Optical Monitoring. En *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 755-762). https://doi.org/10.1007/978-3-031-77429-4_84

NIST. (2022). Measurement Science for Additive Manufacturing. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-35>

Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences*, 11(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>

Wohlers Associates. (2022). Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry. Wohlers Associates.

Estudio De Las Variables Del Proceso Del Sistema Magnetron Sputtering Para La Producción De Recubrimientos De WS₂

Daniel Toribio Gurrola¹, Jean Carlos - Zambrano Luna², Alexander – Ruden Muñoz², Cesar Andrés Amaya Hoyos³, Juan Pablo - Trujillo Lemus², Jhonatan Eduardo Martinez³, Luis Miguel Ballesteros Ospina¹, Ines Carolina Ortega Portilla¹, Juan Manuel Gonzalez Carmona¹

¹. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

². Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica y Ciencias Forenses (BIOIF) – Semillero de Investigación en Física de Materiales y Biomateriales. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia – La Julita

³. Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos (GIDEMP). Centro de Asistencia Técnica a la Industria ASTIN, Cali, Colombia

*d.toribio@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen: Este estudio evaluó el efecto del voltaje de polarización (Bias) en las propiedades estructurales, morfológicas y tribológicas de recubrimientos de WS₂ depositados por Magnetron Sputtering. La caracterización por XRD confirmó la formación de la fase hexagonal de WS₂, observándose que el aumento del Bias redujo la intensidad de los picos, asociado a menor espesor de película. Las imágenes SEM mostraron la transición de una morfología granular a un crecimiento columnar más compacto hasta -40 V, mientras que a -60 V se evidenció Re-Sputtering y disminución de la tasa de depósito. Los perfiles EDS reportaron espesores entre 0.8 y 5.7 µm, además de la presencia de la capa intermedia de Ti que mejora la adherencia. Las mediciones de rugosidad fueron homogéneas excepto en los recubrimientos sin Bias, y la dureza alcanzó su valor máximo (335.65 HV) a -20 V. Las pruebas tribológicas mostraron que esta misma condición ofreció el menor coeficiente de fricción (~0.1) y mínima transferencia de material, mientras que altos Bias y el sustrato sin recubrimiento presentaron fricción y desgaste elevados. En conjunto, se concluye que -20 V representa el parámetro óptimo, proporcionando el mejor balance entre densidad, adherencia y desempeño tribológico, posicionando al WS₂ depositado en estas condiciones como una alternativa eficiente para aplicaciones de lubricación sólida en ingeniería de superficies.

Palabras Clave: Magnetron Sputtering, WS₂, Propiedades tribológicas

1. Introducción

La técnica de Magnetron Sputtering, un proceso en fase vapor altamente controlado, ha emergido como una herramienta valiosa para la producción de recubrimientos lubricantes sólidos (Roche Yepes et al. 2018). Sin embargo, para aprovechar plenamente su potencial, es esencial comprender y optimizar las variables del proceso de Magnetron Sputtering que influyen en las propiedades de los recubrimientos resultantes, incluyendo variables como el voltaje Bias, la temperatura y la presión. En este trabajo se estudian las propiedades mecánicas y tribológicas del WS₂ variando el voltaje de

polarización (voltaje Bias), comparando el efecto que este tiene en el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste.

Siendo el WS_2 un recubrimiento implementado como lubricante sólido por tener un bajo coeficiente de fricción, se convierte en una solución idónea en ambientes donde se requieren lubricantes, pero en los que las condiciones de presión o temperatura hacen inviable el uso de lubricantes líquidos convencionales (Hirano y Shinjo 1993). Por otro lado, el WS_2 es un material con formación cristalina hexagonal, lo que puede comprometer su adherencia al sustrato y plantea desafíos técnicos en la obtención de películas delgadas con estabilidad mecánica y durabilidad adecuados (Zhou et al. 2025).

En este contexto, resulta de particular interés analizar cómo los parámetros de deposición influyen en la microestructura, morfología y densificación del recubrimiento. La energía de las partículas incidentes durante el sputtering, modulada principalmente por el voltaje Bias, afecta directamente el grado de compactación de la película, la orientación preferencial de los cristales y, en consecuencia, sus propiedades tribológicas. Comprender estas relaciones permite establecer estrategias de diseño para mejorar simultáneamente la adherencia y la resistencia al desgaste de los recubrimientos basados en WS_2 .

Además, la investigación en recubrimientos de disulfuro de tungsteno no solo se justifica por su aplicabilidad en condiciones extremas, sino también por la tendencia actual hacia el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes. El reemplazo de lubricantes líquidos por soluciones sólidas disminuye el riesgo de contaminación, reduce la necesidad de mantenimiento frecuente y favorece la sostenibilidad en sectores como la industria aeroespacial, automotriz y de generación de energía.

Finalmente, es importante destacar que la optimización de recubrimientos de WS_2 mediante Magnetron Sputtering se enmarca en un campo más amplio de ingeniería de superficies, en el cual el control preciso de los procesos de deposición representa una vía estratégica para extender la vida útil de componentes críticos. De este modo, la presente investigación busca aportar conocimientos fundamentales que faciliten el escalamiento tecnológico de estos recubrimientos y su eventual implementación en aplicaciones industriales de alto valor agregado.

2. Materiales y Métodos

Para este proyecto se seleccionaron dos tipos de sustratos para la caracterización de las películas delgadas de WS_2 :

- Acero AISI D2, adquirido comercialmente en barras de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) de espesor y cortadas en piezas de 10 mm de espesor.
- Obleas de silicio (Si), con orientación cristalina aleatoria (no controlada).

Las muestras de acero fueron preparadas mediante un pulido mecánico en varias etapas. Primero se realizó un desbaste metalográfico utilizando lijas abrasivas de carburo de silicio (SiC) de grano progresivamente fino. Posteriormente, se aplicó un pulido con suspensión de alúmina de 1 μm , hasta lograr un acabado tipo espejo, asegurando una superficie homogénea.

Después del pulido, tanto las piezas de acero como las obleas de Si fueron limpiadas químicamente mediante inmersión en una solución de acetona/etanol en un baño ultrasónico durante 10 minutos. Luego, se enjuagaron con agua des-ionizada y se secaron con flujo de nitrógeno (N_2).

Previo a la deposición, se aplicó una limpieza por plasma en atmósfera de argón (Ar) durante 25 minutos para eliminar contaminantes superficiales residuales y mejorar la adhesión del recubrimiento.

La deposición de las películas se realizó por pulverización catódica (Magnetron Sputtering) empleando las siguientes condiciones:

- Potencia aplicada: 400 W
- Presión de trabajo: 6.5×10^{-3} mbar
- Temperatura del sustrato: 200 °C
- Tiempo de deposición: 180 min
- Flujo de Ar: 50 sccm (controlado)

El voltaje de polarización (Bias) se varió entre 0, -20, -40 y -60 V en corriente directa (DC), para estudiar su influencia sobre la microestructura y las propiedades de las películas depositadas.

Las fases cristalográficas de las películas depositadas sobre Si fueron identificadas mediante difracción de rayos X (XRD). Se utilizó un difractómetro Rigaku SmartLab con radiación Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operado a 40 kV y 44 mA, en configuración de haces paralelos, registrando el barrido en el rango de 2θ entre 20° y 90° a temperatura ambiente (25 °C).

Las secciones transversales de las muestras se obtuvieron cortando las obleas de Si y fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), complementada con espectroscopía de energía dispersiva (EDS) para determinar la composición química elemental de los recubrimientos. El desempeño tribológico de los recubrimientos de WS_2 sobre el acero AISI D2 fue evaluado mediante la prueba Pin-on-Disc en un tribómetro Anton Paar TRB3, bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura ambiente (25 °C)
- Distancia de deslizamiento: 100 m
- Velocidad lineal: 10 cm/s
- Carga normal: 5 N
- Contra-cuerpo: bola de Al_2O_3 de 6 mm de diámetro

Finalmente, los principales mecanismos de desgaste fueron identificados mediante SEM/EDS empleando un microscopio FE-SEM Jeol JSM 7200F, analizando las huellas de desgaste y el material transferido.

3. Resultados

Se presentan los resultados más relevantes obtenidos, analizando inicialmente las propiedades básicas del WS_2 en función de su estructura cristalina comparando con la composición química

elemental. Posteriormente se analizan las propiedades de la superficie. Esto permite dar contexto al análisis de las propiedades tribológicas de las diferentes deposiciones de WS_2 variando el voltaje de polarización.

Difracción de Rayos X (XRD)

Los patrones de difracción de WS_2 depositados variando el voltaje de polarización sobre Si, se observan en la Figura 1 con las orientaciones cristalinas principales. Comparando contra la carta de referencia Card No.: 01-084-1398 Quality:S, todos los patrones de difracción presentan picos pertenecientes a una estructura cristalina hexagonal característica del WS_2 (Nolasco 2016).

Partiendo del pico característico del Si (previamente identificado en $\sim 69.5^\circ$) coincidente con el plano (400) de estructura cristalina FCC, sirve como referencia para identificar qué picos pertenecen al recubrimiento y cuales al sustrato. Se observa que al ir disminuyendo el voltaje de polarización la intensidad del pico característico se presenta con mayor intensidad y los picos correspondientes a WS_2 disminuyen.

En el patrón de difracción correspondiente al depósito con un voltaje de polarización a 0V, presenta baja anchura e intensidad en la región de $30-40^\circ$, lo que indica una microestructura pobremente cristalina y la baja intensidad sugiere que el crecimiento de la película es casi amorfa con poco ordenamiento en los planos cristalinos (002) de WS_2 , siendo este un comportamiento típico cuando la diferencia de energía en la superficie (voltaje de polarización) es baja durante el proceso de depósito. Por otra parte, el patrón a -20V (Bias) aparecen picos definidos, con mayor intensidad y delgados, esto nos indica que el crecimiento de la película es definido y denso permitiendo identificar los picos en $2\theta \sim 33-36^\circ$ y $58-60^\circ$ que corresponden a los planos cristalográficos de la fase hexagonal de WS_2 . Se observa en el patrón a -40 Bias que aumenta ligeramente la intensidad de los picos característicos, así como su definición confirmando los planos cristalográficos obtenidos previamente con un crecimiento columnar como menos defectos. Por último, el patrón obtenido a -60V Bias se mantienen los picos característicos, sin embargo, su intensidad disminuye ligeramente con respecto a -40V, esto indica que la alta energía de polarización ha provocado re-sputtering o introducido energías residuales afectando la coherencia cristalina por lo que puede ser negativo para las propiedades tribológicas al verse afectado el espesor obtenido.

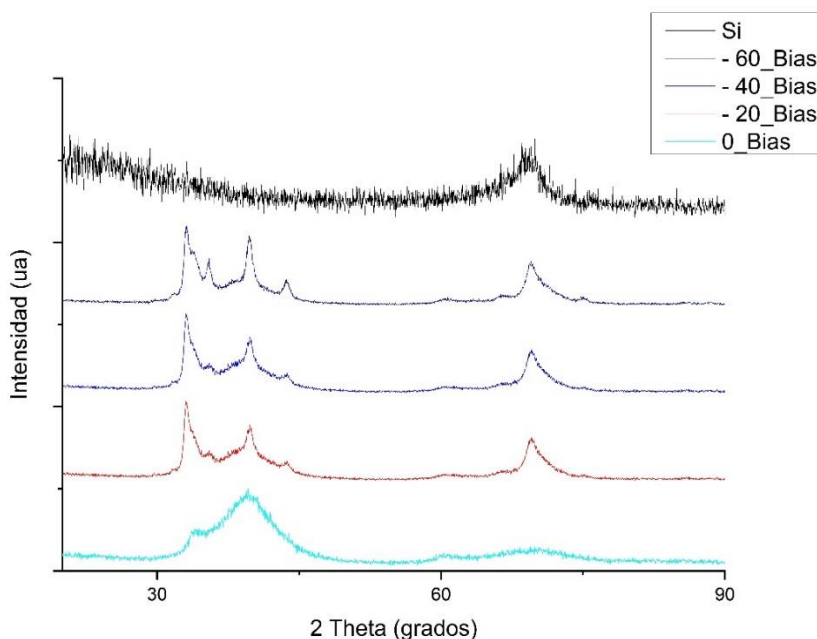


Figura 1. Patrones de Difracción de WS₂ a 0, -20, -40 y -60V (Voltaje Bias).

Se observa qué al variar el voltaje de polarización durante el proceso de depósito influye en el empaquetamiento cristalográfico y la densidad de WS₂, es decir, al aumentar la diferencia de energía se obtiene una mejor definición en los planos cristalinos, pero se sacrifica el espesor de la película debido a re-sputtering durante el proceso.

Morfología

La Figura 2 muestra las imágenes SEM de los recubrimientos de WS₂ obtenidos sobre sustratos de Si, variando el voltaje de polarización (Bias) durante el proceso de deposición por Magnetron Sputtering. La composición química elemental fue confirmada mediante EDS en las mismas muestras.

En la Figura 2a (Bias 0 V) se aprecia que el recubrimiento presenta un crecimiento de tipo granular, característico de la Zona 1 del diagrama de Thornton (1977). En esta zona, la energía de los átomos pulverizados es baja, por lo que no se forma un crecimiento columnar continuo. Como resultado, la película presenta granos aislados y una densidad relativamente baja, lo que implica mayor cantidad de vacíos y defectos. En la Figura 2b (Bias -20 V) ya es visible la formación de columnas bien definidas y un crecimiento más ordenado. Esto indica un aumento en la movilidad superficial de los átomos pulverizados gracias a la energía adicional proporcionada por el Bias negativo. La película resultante es más densa, con menor cantidad de poros, lo que mejora su integridad estructural. También se distingue con claridad la interfaz Si/Ti/WS₂, donde la delgada capa de Ti fue depositada previamente para mejorar la adhesión del WS₂ al sustrato. La Figura 2c (Bias -40 V) muestra una película con mayor homogeneidad y una microestructura columnar aún más compacta. La rugosidad original del sustrato sigue siendo visible a través del recubrimiento, pero de manera más uniforme. A este nivel de energía, la película logra un equilibrio entre

densificación y espesor de depósito. La capa de Ti es menos evidente en la imagen, probablemente debido a la mayor compactación de la película superior.

Finalmente, en la Figura 2d (Bias -60 V) la microestructura presenta columnas densas, pero la interfaz entre el Si y el Ti se vuelve difusa, lo que puede atribuirse a la mayor energía de bombardeo iónico, que favorece la mezcla interfacial. Sin embargo, la interfaz entre Ti y WS₂ se mantiene definida, probablemente debido a la buena afinidad química y energética entre estos materiales. Además, a este nivel de Bias es notorio que el espesor total de la película disminuye en comparación con -20 V y -40 V. Esto se explica por el fenómeno de re-sputtering, en el cual los átomos depositados son removidos parcialmente debido al bombardeo iónico de alta energía, reduciendo la tasa neta de crecimiento (Lieberman y Lichtenberg, 2005).

Perfil de Recubrimiento

Posterior a las fotografías SEM (Figura 3a), se obtiene la composición química elemental (EDS) de los perfiles. En la Figura 3b, se observa el EDS de la película de WS₂ con voltaje 0V, donde se muestra la presencia de W hasta los 5.7um donde sufre una caída abrupta, lo que implica el espesor de la capa. Posterior a ello, se observa en la gráfica EDS una pequeña cresta de Ti, lo que nos indica la presencia de la capa de Ti depositada con el fin de aumentar la adhesión a nuestro sustrato.

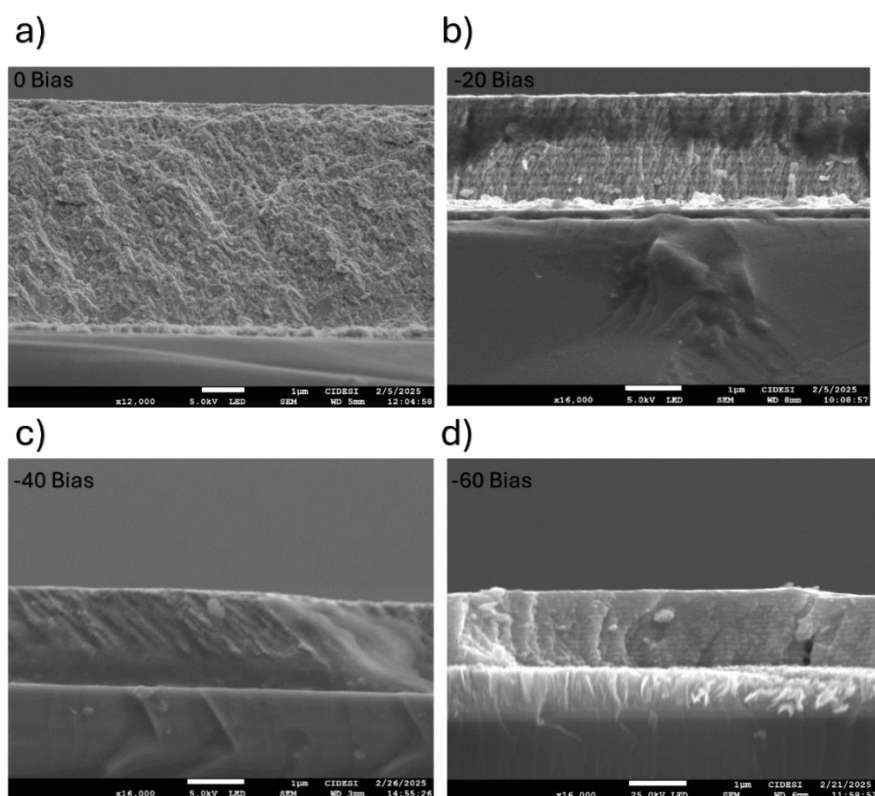


Figura 2. Microscopia SEM de WS₂, a) 0, b) -20, c)-40, d)-60V (Voltaje Bias)

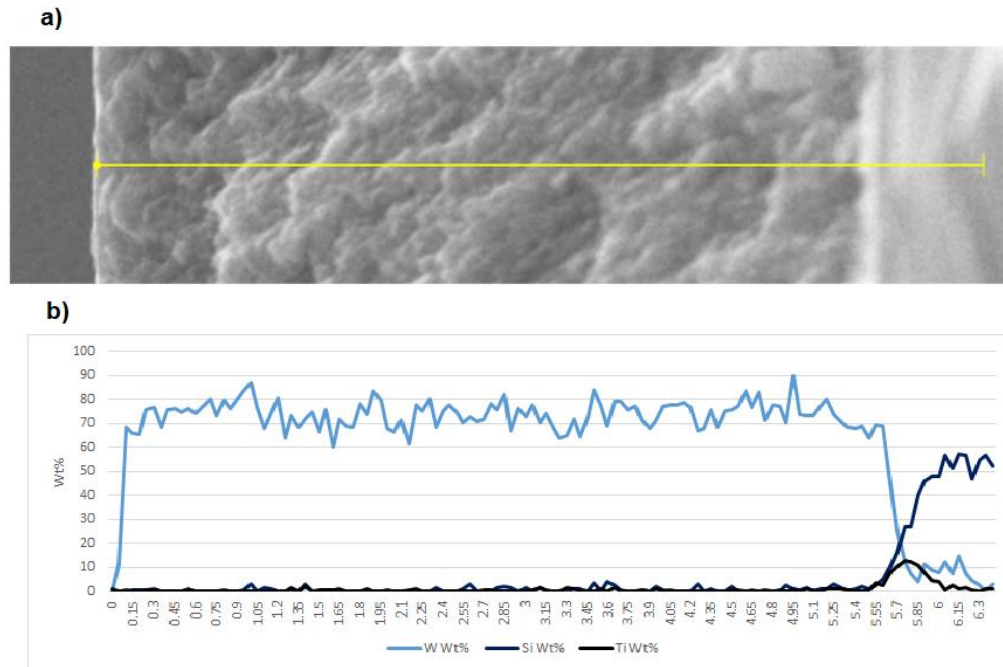


Figura 3 a) SEM de Perfil EDS de película de WS2 a 0V, b) EDS de Perfil

La Figura 4a muestra el perfil EDS de la película WS2 a -20V. Se observa en la Figura 4b la relación porcentual que a partir de 0.8μm se presenta una caída progresiva de Si, lo que confirma que la interfaz es parcialmente difusa con los materiales depositados. Se observa también la disminución del rango de espesor depositado de WS2.

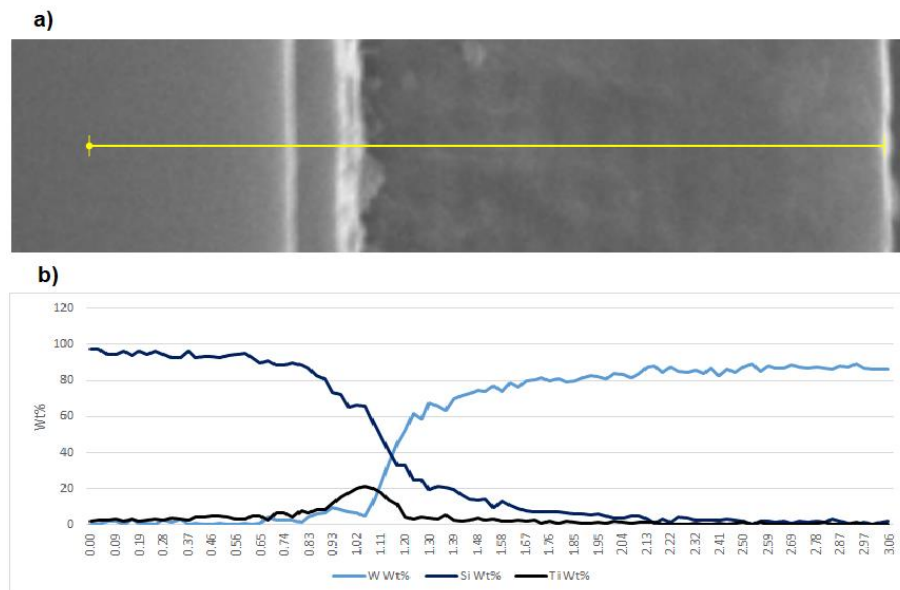


Figura 4. a) SEM de Perfil EDS de película de WS2 a -20V, b) EDS de Perfil.

La Figura 5a muestra el perfil SEM del recubrimiento de WS₂ depositado a -40V. Se observa una distribución de W y S en el rango de 0.4 a 1.9 μm , correspondiente al espesor del recubrimiento. El incremento de la señal de Ti hacia el extremo indica la capa de Ti depositada previo al WS₂ donde. De esta manera se valida la uniformidad química del material (Figura 5b).

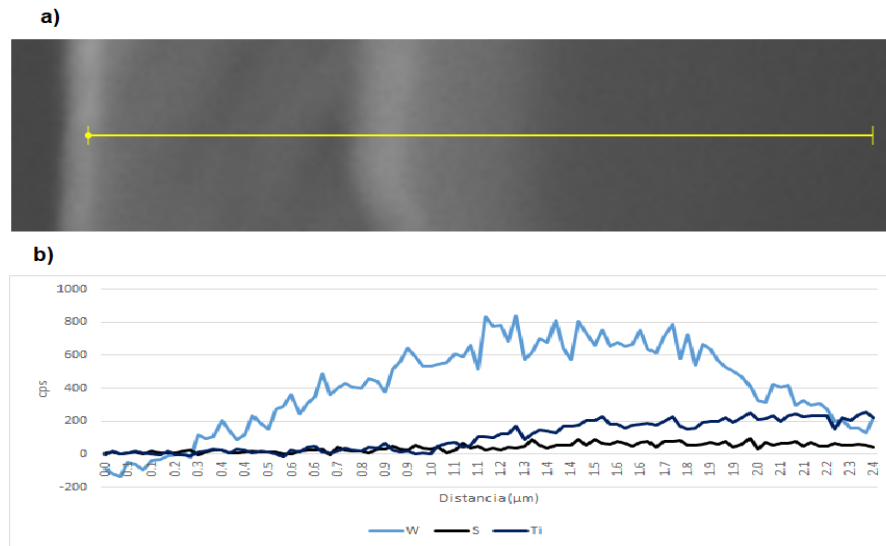


Figura 5. a) SEM de Perfil EDS de película de WS₂ a -40V, b) EDS de Perfil

Por último, se muestra en la Figura 6a el perfil del recubrimiento de WS₂ depositado a -60V donde se observa la presencia de W y S hasta 1.1 μm donde decrece progresivamente hasta 1.9 donde se hace notable la presencia de Ti, por lo que podemos inferir este el espesor de la película (Figura 6b).

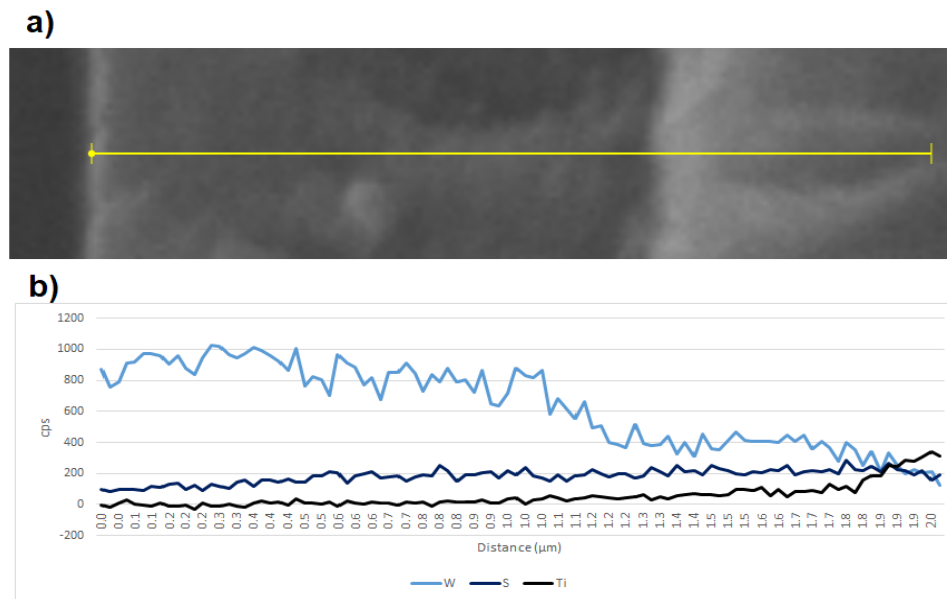


Figura 6. a) SEM de Perfil EDS de película de WS₂ a -60V, b) EDS de Perfil

Espesor

Previo al depósito de WS₂, fue depositada una nanocapa de Ti con la finalidad de aumentar la adhesión de WS₂ sobre el sustrato, siendo este un parámetro a considerar para la determinación del espesor obtenido. Se realizó un muestreo con SEM para determinar el espesor promedio depositado y en conjunto con los valores obtenidos de la composición química elemental, se determinaron los espesores respectivos a la deposición de WS₂ variando el voltaje Bias. En la Figura 7, se observa que a medida que se aumenta el voltaje de deposición en el sustrato también aumenta la tasa de depósito, sin embargo, como vimos en la morfología del material, esto también provoca que el crecimiento de la película sea granular aumentando los defectos en la película.

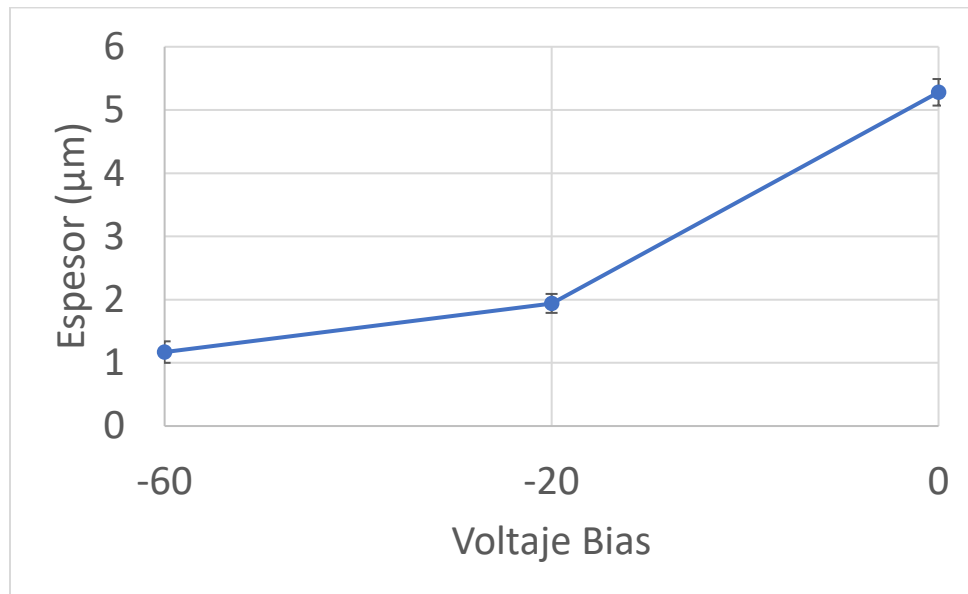


Figura 7. Tasa de depósito respecto a Voltaje Bias.

Rugosidad

La Figura 8a muestra la rugosidad promedio (Ra) y la rugosidad cuadrática media (Rq) de las películas posterior a la deposición. Por otro lado, en la Figura 8b se muestra el coeficiente de variación (Rq/Ra). Es notable que excepto del depósito a 0V, tanto Ra como Rq permanecen homogéneos. Se observa también que los valores del coeficiente de variación, los cuales son superiores a 1.2, implican el crecimiento de la película con rugosidad aleatoria, implicando un proceso que no modifica la distribución de las rugosidades en la superficie.

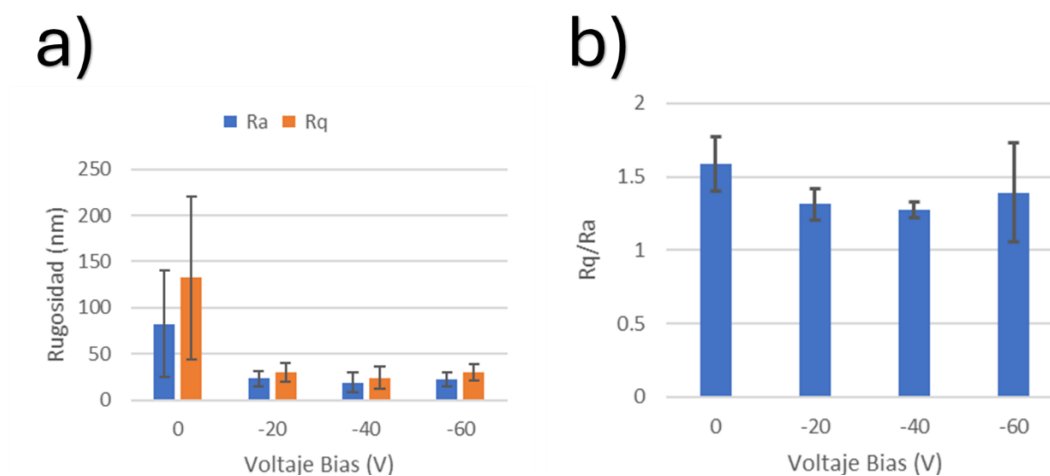


Figura 8. a) Rugosidad Promedio y Rugosidad cuadrática media, b) Coeficiente de variación

Dureza

La Figura 9 muestra la relación entre la dureza y el voltaje al que se realizó el depósito. En la superficie se reporta que hay un incremento progresivo en la dureza desde -60V hasta -20V, alcanzando un valor máximo de 335.65 HV promedio el deposito realizado a -20V. Posteriormente al aumentar el voltaje a 0V la dureza disminuye a un valor promedio de 292.48 HV. Esto hace congruencia con la morfología que se observa en la Figura 2, puesto que la energía iónica no favorece la densidad del crecimiento de la película mostrando un crecimiento granular. De esta forma hace congruencia con los valores reportados en la literatura respecto a la pulverización catódica con Magnetron Sputtering, en los cuales puede optimizarse ajustando el voltaje de polarización.

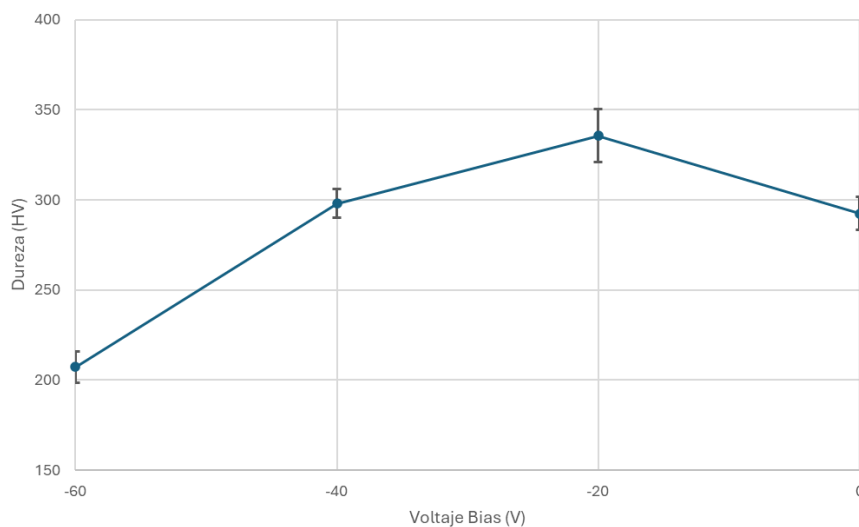


Figura 9. Dureza obtenida contra Voltaje Bias

Coeficiente de fricción

La evolución del coeficiente de fricción (COF) en función de la distancia recorrida se presenta en la figura 10, para los recubrimientos de WS_2 depositados con distintos voltajes de Bias: -60 V, -40 V, -20 V, 0 V, así como para el sustrato sin recubrimiento.

El recubrimiento con Bias de -20 V mostró el mejor desempeño tribológico, manteniendo un COF ultra bajo (~ 0.1) de forma estable durante los primeros 75 m del recorrido (Erdemir, Martin, Jean Michael, y Jianbin, Luo 2020). Este comportamiento sugiere la formación de una capa triboquímica autolubrificante eficiente, que luego colapsa bruscamente, evidenciando un cambio en el mecanismo de desgaste hacia fricción severa.

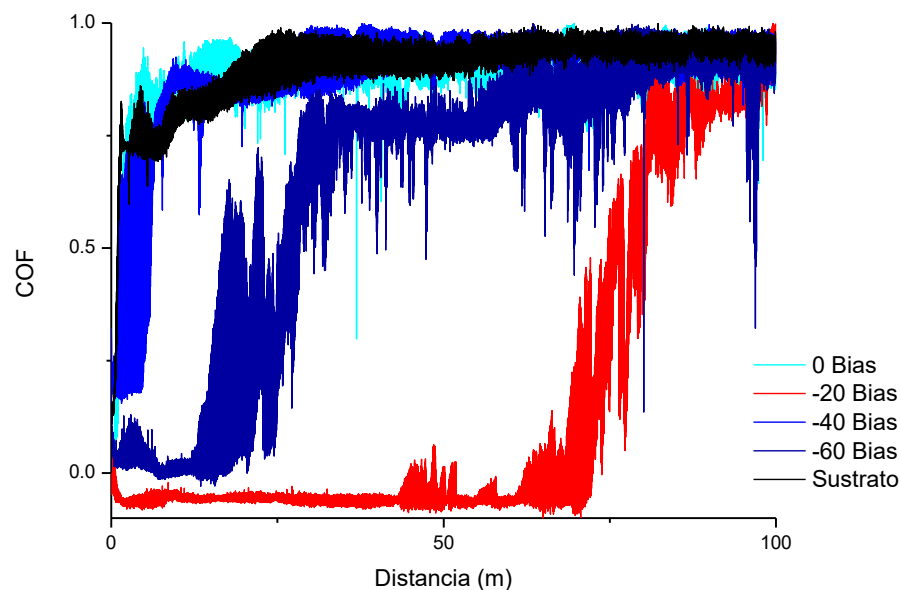


Figura 10. Coeficiente de Fricción para los distintos ensayos a temperatura ambiente (25°C).

En contraste, los recubrimientos con Bias de -40 V y -60 V presentaron un aumento más temprano y progresivo del COF, estabilizándose en valores elevados (~ 0.7 – 0.8), lo que indica una menor estabilidad superficial, posiblemente asociada a tensiones internas mayores en el recubrimiento, generadas por el alto Bias aplicado. El recubrimiento sin Bias (0 V) exhibió desde el inicio un régimen de fricción elevado, con oscilaciones marcadas en el COF y un comportamiento típico de desgaste abrasivo severo. Por su parte, el sustrato sin recubrimiento mostró un valor de fricción elevado y estable (~ 0.8), sin ninguna etapa de fricción reducida, confirmando la importancia del recubrimiento para mejorar el desempeño tribológico del sistema (Stachowiak y Batchelor 1993).

Estas observaciones experimentales son coherentes con la evidencia visual de desgaste, lo que permite establecer una correlación robusta entre la condición de deposición, la fricción generada y el tipo de desgaste resultante.

La figura 11 presenta un mosaico comparativo de las bolas de alúmina utilizadas como contra-cuerpo en los ensayos tribológicos, posterior al deslizamiento contra los recubrimientos de Estudio De Las Variables Del Proceso Del Sistema Magnetron Sputtering Para La Producción De Recubrimientos De WS_2

WS₂ depositados con diferentes voltajes de Bias (-60 V, -40 V, -20 V, 0 V) y contra el sustrato sin recubrimiento.

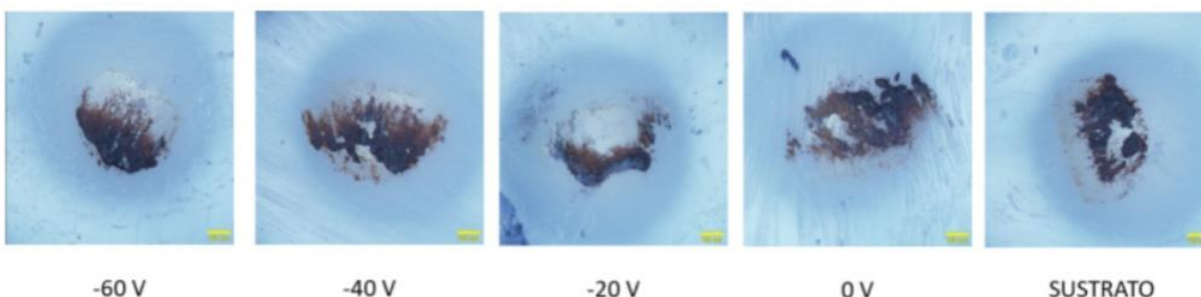


Figura 11. Transferencia de material sobre la bola.

Se observan diferencias claras en la cantidad y tipo de material transferido a la bola según la condición de Bias. La bola correspondiente al recubrimiento con -20 V muestra una superficie relativamente limpia, sin evidencia de acumulación significativa de partículas ni zonas quemadas, lo cual es consistente con el régimen de fricción ultra bajo observado en la curva COF. En contraste, las bolas asociadas a los recubrimientos con 0 V y al sustrato sin recubrimiento presentan zonas oscuras extensas, con evidencia de transferencia sólida de material y desgaste por adhesión, indicadores de condiciones tribológicas más agresivas. Las bolas correspondientes a los Bias de -40 V y -60 V muestran patrones intermedios de transferencia, con franjas visibles de desgaste, pero sin signos extremos de acumulación. Estas observaciones respaldan la hipótesis de que la condición de Bias influye directamente sobre la capacidad del recubrimiento para resistir el desgaste y minimizar la interacción mecánica con el contra-cuerpo.

La figura 12 muestra un mosaico comparativo de las huellas de desgaste generadas sobre la superficie de los recubrimientos de WS₂ y el sustrato sin recubrimiento, tras los ensayos tribológicos. Cada imagen corresponde a una condición específica de voltaje de Bias aplicada durante el proceso de deposición: -60 V, -40 V, -20 V, 0 V y sin recubrimiento.

Las huellas de desgaste evidencian diferencias marcadas en cuanto a anchura, uniformidad y presencia de daño superficial, lo cual permite correlacionar visualmente el comportamiento mecánico del recubrimiento con su condición de síntesis. El recubrimiento con Bias de -20 V presenta una huella estrecha, continua y de bordes regulares, sin fracturas visibles ni zonas de delaminación, lo que sugiere una excelente adherencia y resistencia al desgaste. Esta observación concuerda con el bajo COF y la mínima transferencia de material observada en las subsecciones anteriores. En cambio, las huellas correspondientes a los recubrimientos con -60 V y -40 V muestran surcos irregulares y fragmentación superficial, lo cual sugiere un comportamiento tribológico menos estable, posiblemente debido a tensiones internas excesivas inducidas por el alto Bias durante el sputtering.

La condición sin Bias (0 V) y el sustrato sin recubrimiento presentan huellas significativamente más amplias y oscuras, con signos de desprendimiento severo del material, acumulación de debris y desgaste plástico (Bhushan y Ko 2003). Estas características visuales son indicativas de una baja resistencia al contacto mecánico y de una pobre integridad superficial. La comparación de estas imágenes aporta evidencia directa de la relación entre los parámetros de deposición, la integridad del recubrimiento y su desempeño tribológico, consolidando la superioridad del recubrimiento sintetizado con -20 V de Bias.

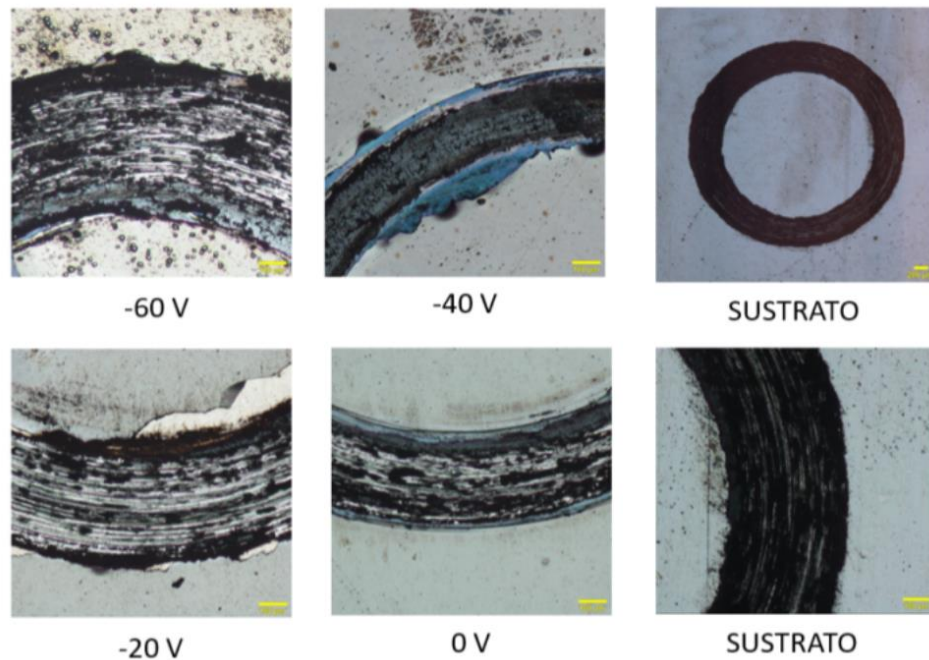


Figura 12. Huella de desgaste sobre el recubrimiento y sustrato.

El conjunto de análisis realizados permitió evaluar de forma integral el comportamiento tribológico de recubrimientos de disulfuro de tungsteno (WS_2) sintetizados bajo diferentes voltajes de Bias mediante Magnetron Sputtering. La aplicación de ensayos tipo bola sobre disco, combinados con cálculos de contacto elástico según la teoría de Hertz, curvas experimentales de fricción y análisis visual del desgaste, permitió establecer una correlación clara entre las condiciones de deposición y la respuesta mecánica en operación.

Los resultados evidencian que la condición de -20 V de Bias proporciona un equilibrio óptimo entre adherencia, resistencia al desgaste y fricción reducida, posicionándose como la opción más eficiente dentro de las variables estudiadas. Las condiciones con mayor Bias (-40 V y -60 V) mostraron mayor inestabilidad superficial, mientras que el recubrimiento sin Bias y el sustrato expuesto presentaron un desempeño tribológico deficiente, con fricción elevada y desgaste severo.

Esta caracterización tribológica no solo valida la funcionalidad del recubrimiento desde un punto de vista mecánico, sino que además complementa los análisis estructurales y morfológicos realizados, reforzando la importancia del control de parámetros durante la síntesis para aplicaciones reales en ingeniería de superficies.

4. Conclusiones

El voltaje de polarización aplicado durante el proceso de Magnetron Sputtering tiene un impacto significativo en la densificación, orientación cristalina y morfología de los recubrimientos de WS_2 , observándose que un exceso de energía de iones puede generar fenómenos de re-sputtering y reducción en la tasa de crecimiento.

Estudio De Las Variables Del Proceso Del Sistema Magnetron Sputtering Para La Producción De Recubrimientos De WS_2

La dureza de los recubrimientos mostró un comportamiento dependiente del Bias, alcanzando su valor máximo (335.65 HV) en la condición de -20 V, lo que indica que este parámetro favorece el equilibrio entre compactación de la película y estabilidad estructural.

El recubrimiento de WS₂ depositado a -20 V presentó el coeficiente de fricción más bajo (~0.1) y la mayor resistencia al desgaste, superando ampliamente a los recubrimientos depositados con otros Bias y al sustrato sin recubrimiento, lo que confirma su potencial como lubricante sólido en ambientes de operación severa.

Los resultados obtenidos evidencian que la optimización del voltaje Bias en la deposición de WS₂ por Magnetron Sputtering permite desarrollar recubrimientos con propiedades tribológicas superiores, con posibilidades de aplicación en sectores estratégicos como la industria aeroespacial, automotriz y biomédica.

Referencias

- Bhushan, B., y Pak Lim Ko. 2003. «Introduction to Tribology». *Applied Mechanics Reviews* 56(1):B6. doi:10.1115/1.1523360.
- Erdemir, Ali, Martin, Jean Michael, y Jianbin, Luo. 2020. *Superlubricity*.
- Hirano, Motohisa, y Kazumasa Shinjo. 1993. «Superlubricity and frictional anisotropy». *Wear* 168(1):121-25. doi:10.1016/0043-1648(93)90207-3.
- Lieberman, Michael A., y Allan J. Lichtenberg. 2005. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 1.^a ed. Wiley.
- Nolasco, Areli Angeles. 2016. «Síntesis y caracterización de nanoestructuras de sulfuro de molibdeno mediante una técnica hidrotermal asistida por microondas».
- Roche Yepes, Jhonattan de la, Juan Manuel González Carmona, Elisabeth Restrepo Parra, y Hector Sanchez Sthepa. 2018. «Corrosion Resistance and Tribological Behavior of WS₂-Ti Coatings by Ti Cathode Power Changes in Magnetron Co-Sputtering». *DYNA: Revista de La Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín* 85(207):221-26.
- Stachowiak, G. W. (Gwidon W.), y A. W. (Andrew W.). Batchelor. 1993. *Engineering Tribology*.
- Thornton, J. A. 1977. «High Rate Thick Film Growth». *Annual Review of Materials Research* 7(Volume 7.):239-60. doi:10.1146/annurev.ms.07.080177.001323.
- Zhou, Qi, Minming Jiang, Jiang Xu, Zong-Han Xie, y Paul Munroe. 2025. «Mechanisms of superlubricity in WS₂/Graphite Interfaces: A First-Principles study on Silicon-Based substrates». *Applied Surface Science* 686:162109. doi:10.1016/j.apsusc.2024.162109.

Efecto De Los Parámetros De Carburizado De Baja Presión Sobre Las Propiedades De La Capa Endurecida En Aceros Fabricados Por Métodos Convencionales Y Por Manufactura Aditiva

Roberto Guillermo Bayro Lazcano¹ y Jhon Alexander Villada Villalobos¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
jhon.villada@cidesi.edu.mx

Resumen. El objetivo de este estudio es investigar el efecto de los parámetros de tratamiento térmico utilizados en la técnica de carburación a baja presión aplicada en los aceros AISI 8620 de manufactura convencional y en el SS17-4PH de manufactura aditiva. El acero 8620 es un material que se usa comúnmente en componentes de trenes motrices, engranajes y se desliza o rueda en condiciones de alta presión de contacto. Debido a que la técnica de carburizado a baja presión es relativamente reciente, aún es necesario estudiar la relación que existe entre los parámetros del proceso y las propiedades de la capa carburizado por ejemplo la dureza, composición, espesor, homogeneidad y otros, tanto para los Aceros fabricados por métodos convencionales como por manufactura aditiva, en este trabajo se analiza el efecto de los parámetros aplicados en el proceso, sobre las características de la capa carburizada resultante, específicamente la dureza correspondiente a la capa efectiva.

Palabras Clave: Tratamiento térmico, Carburizado de baja presión, Capa efectiva.

1. Introducción

Este proyecto estudiará el efecto los parámetros del proceso de carburizado de baja presión (LPC), sobre la microestructura y propiedades mecánicas de la capa carburizada en dos tipos de aceros fabricados por manufactura convencional AISI 8620 y por manufactura aditiva el SS17-4PH, para esto se utilizará herramientas computacionales y medidas experimentales.

El AISI 8620 es un acero aleado de baja aleación, que contiene níquel, cromo y molibdeno. Se caracteriza por ofrecer una excelente combinación de tenacidad en el núcleo y alta dureza superficial, lo que lo hace muy resistente al desgaste. Gracias a su composición y a los tratamientos térmicos que puede recibir, especialmente la cementación, el AISI 8620 desarrolla una capa superficial muy dura. A pesar de su dureza superficial, el núcleo del material permanece tenaz, lo que le permite absorber energía y resistir impactos sin fracturarse. Presenta una buena maquinabilidad, lo que facilita su conformación y mecanizado en diversas aplicaciones. Responde muy bien a tratamientos de cementación, temple y revenido, lo que permite optimizar sus propiedades para aplicaciones específicas [1].

Debido a sus propiedades, el acero AISI 8620 es ideal para la fabricación de piezas que requieren un centro suave y tenaz con una capa superficial muy dura y resistente al desgaste.

En resumen, el acero AISI 8620 es un material versátil y de alto rendimiento, especialmente valorado en la industria automotriz y de maquinaria por su capacidad para soportar cargas y desgaste significativos. El acero AISI 8620 se utiliza para el carburizado a baja presión principalmente por su composición química y su respuesta predecible a los tratamientos térmicos, lo que permite obtener piezas con una dureza superficial excepcional y un núcleo tenaz, minimizando al mismo tiempo la distorsión [2].

El acero SS17-4PH también conocido como AISI 630 o UNS S17400, es un acero inoxidable martensítico de endurecimiento por precipitación. Se destaca por su excelente combinación de alta resistencia, buena resistencia a la corrosión y tenacidad.

El acero SS17-4PH, aunque es un acero endurecido por precipitación y no típicamente un acero de "carburizado" en el sentido tradicional (donde se difunde carbono en un acero de bajo carbono), puede beneficiarse de tratamientos que implican atmósferas controladas a baja presión, especialmente si se buscan mejoras superficiales o tratamientos específicos. Sin embargo, la razón principal por la que no se usa comúnmente para carburizado (como se haría con el AISI 8620) es porque su dureza se logra principalmente por la precipitación de fases Inter metálicas, no por el enriquecimiento de carbono superficial. No obstante, el carburizado a baja presión (LPC), también conocido como carburizado en vacío, se utiliza para obtener una capa superficial endurecida y mejorar la resistencia al desgaste, la fatiga y la distorsión mínima. El acero 17-4 PH, por su parte, ya posee una alta resistencia intrínseca y resistencia a la corrosión [3].

El carburizado a baja presión (LPC), también conocido como cementación en vacío, es un proceso de tratamiento térmico que introduce carbono en la superficie de aceros de bajo contenido de carbono para crear una capa dura y resistente al desgaste, sin comprometer la tenacidad del núcleo del material. Este proceso se lleva a cabo en un horno de vacío a temperaturas elevadas y utilizando un gas portador rico en carbono. A diferencia de los métodos de carburizado convencionales que utilizan atmósferas gaseosas a presión atmosférica, el LPC opera en condiciones de vacío. Esto permite un control más preciso de la difusión del carbono en el acero y previene la formación de capas de óxido indeseadas, lo que resulta en una superficie más limpia y uniforme [4].

El proceso típicamente implica los siguientes pasos:

1. **Calentamiento en vacío:** El componente de acero se calienta en un horno de vacío hasta la temperatura de carburizado.
2. **Introducción del gas carburizante:** Se introduce un gas rico en carbono (como propano o acetileno) en el horno, que se disocia y reacciona con la superficie del acero, permitiendo la difusión del carbono.
3. **Difusión:** El carbono se difunde en la superficie del acero, formando una capa de alta concentración de carbono.
4. **Templado:** Tras el tiempo de carburizado, la pieza se enfría rápidamente para endurecer la capa superficial.

Efecto De Los Parámetros De Carburizado De Baja Presión Sobre Las Propiedades De La Capa Endurecida En Aceros Fabricados Por Métodos Convencionales Y Por Manufactura Aditiva

5. **Revenido (opcional):** Para reducir tensiones internas y mejorar la tenacidad, se puede realizar un revenido posterior.

Ventajas del Carburizado de Baja Presión

El LPC ofrece varias ventajas significativas sobre los métodos tradicionales:

- **Mejor control de la capa carburizada:** Permite un control más preciso sobre la dureza, composición y espesor de la capa.
- **Mayor homogeneidad:** La distribución del carbono en la superficie es más uniforme.
- **Menor tiempo de proceso:** Generalmente, el LPC es más rápido que otros métodos.
- **Menor costo:** A pesar de la inversión inicial en hornos de vacío, los costos operativos pueden ser menores debido a la eficiencia y la menor necesidad de post-procesamiento.
- **Mejor control de la temperatura:** El vacío facilita un calentamiento más uniforme.
- **Prevención de oxidación:** Se evitan la oxidación superficial e intergranular, lo que resulta en superficies más limpias.
- **Menor distorsión:** La menor presión y el mejor control de la temperatura contribuyen a una menor deformación de las piezas.

Las aplicaciones del LPC, son para mejorar la resistencia al desgaste, la fatiga y la dureza superficial, el LPC se utiliza en una amplia gama de industrias y aplicaciones:

- **Industria Automotriz:** Engranajes, ejes, componentes del tren de potencia, cojinetes.
- **Herramientas de Corte y Moldeo:** Matrices, punzones, brocas, herramientas de extrusión.
- **Industria Aeroespacial:** Componentes de motores, trenes de aterrizaje, elementos estructurales que requieren alta resistencia al desgaste.
- **Maquinaria Industrial:** Componentes de bombas, válvulas, ejes para maquinaria pesada.
- **Armamento:** Componentes de armas de fuego que exigen alta durabilidad y resistencia al desgaste.
- **Ingeniería Médica:** Implantes y dispositivos que requieren superficies biocompatibles y resistentes al desgaste.

La capacidad del LPC para tratar componentes fabricados por manufactura aditiva (impresión 3D de metales) es un área de creciente interés, ya que permite mejorar las propiedades superficiales de piezas con geometrías complejas que son difíciles de conseguir con métodos convencionales. El LPC se ha desarrollado recientemente gracias al desarrollo de los hornos de vacío, mismos que presentan ventajas como; mejor control de la capa cementada, dureza, composición, espesor, homogeneidad, menor tiempo de proceso, menor costo, mejor control de la temperatura, evita oxidación superficial e intergranular, superficies más limpias y menor distorsión [5], [6].



Figura 1: Horno de vacío para tratamientos térmicos y celda de MA CIDESI – Aeropuerto

2. Materiales y métodos

Para el estudio del carburizado a baja presión, se prepararon 16 probetas cilíndricas de acero AISI 8620. Las dimensiones de cada probeta fueron de 25.4 mm= 1 pulgada de diámetro y 15 mm de espesor, e incluyeron un orificio de sujeción de 4 mm de diámetro para facilitar su manipulación durante el proceso termoquímico.

La preparación superficial de las probetas fue un paso crítico para garantizar la uniformidad y la calidad de la capa carburizada. Las muestras se sometieron a un proceso de pulido metalográfico en varias etapas para lograr un acabado tipo espejo. La secuencia de pulido se realizó utilizando papeles de lija de carburo de silicio con granos progresivamente más finos (P1200, P2400 y P4000). El proceso concluyó con un pulido final con pasta de diamante sobre un paño de pulido metalográfico para eliminar cualquier defecto superficial remanente y obtener una superficie de baja rugosidad, lo que asegura una carburación uniforme.

Se utilizó un diseño experimental factorial completo 2 a la 3 con réplica, para evaluar la influencia de cuatro parámetros clave del proceso: temperatura de carburización, potencial de carbono, número de ciclos de carburización y se mantuvo la presión de enfriamiento fija de 2 bares. La carburación se efectuó mediante un proceso de pulso en el cual se inyectó una mezcla de bencina de petróleo No.CAS: 64742-49-0 atomizada en hidrógeno e introducida en la cámara de vacío, seguido de una etapa de difusión. Una vez finalizado el ciclo de carburación, las muestras fueron austenizadas y posteriormente enfriadas por temple en gas nitrógeno (N₂) a presión de 2 bar, según lo estipulado en el diseño experimental.

La caracterización de muestras se realizó tomando las probetas tratadas que fueron seccionadas y preparadas para metalografía, atacadas por inmersión en nital al 5% y sumergidas por 5 segundos para su posterior análisis. Se realizaron las siguientes pruebas de caracterización:

Análisis de Microdureza: Se midió la microdureza Vickers a lo largo de la sección transversal de las probetas utilizando un microdurómetro [Anton, Scratch Tester] con una carga de 1 N. Para generar los perfiles de dureza, las indentaciones se realizaron a intervalos de 50 µm desde la superficie hacia el núcleo, lo que permitió determinar el gradiente de dureza y la profundidad efectiva de la capa carburizada.

Análisis Microestructural: La microestructura de la capa carburizada y del núcleo fue examinada mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se utilizó un microscopio Efecto De Los Parámetros De Carburizado De Baja Presión Sobre Las Propiedades De La Capa Endurecida En Aceros Fabricados Por Métodos Convencionales Y Por Manufactura Aditiva

óptico [OLYMPUS, DSX 510] y un SEM [FE-SEM Jeol JSM 7200F] equipado con un detector de energía dispersiva de rayos X (EDS) para evaluar la morfología de la capa carburizada y la distribución de elementos. Las imágenes de SEM se obtuvieron a un voltaje de aceleración de 20 kV utilizando un detector de electrones secundarios (SEI).

3. Resultados

Después de las experimentaciones se obtuvieron los siguientes resultados expresados en la siguiente grafica se indican, las mediciones de dureza un acero convencional AISI 8620 y el acero de manufactura aditiva SS17-4PH, mediante el proceso de carburizado a baja presión, se obtuvo una capa de efectiva según norma, misma que demuestra ser afectada por los parámetros de carburizado aplicado en el proceso.

Perfil de Dureza para 16 Tratamientos de LPC en Acero 8620 Convencional

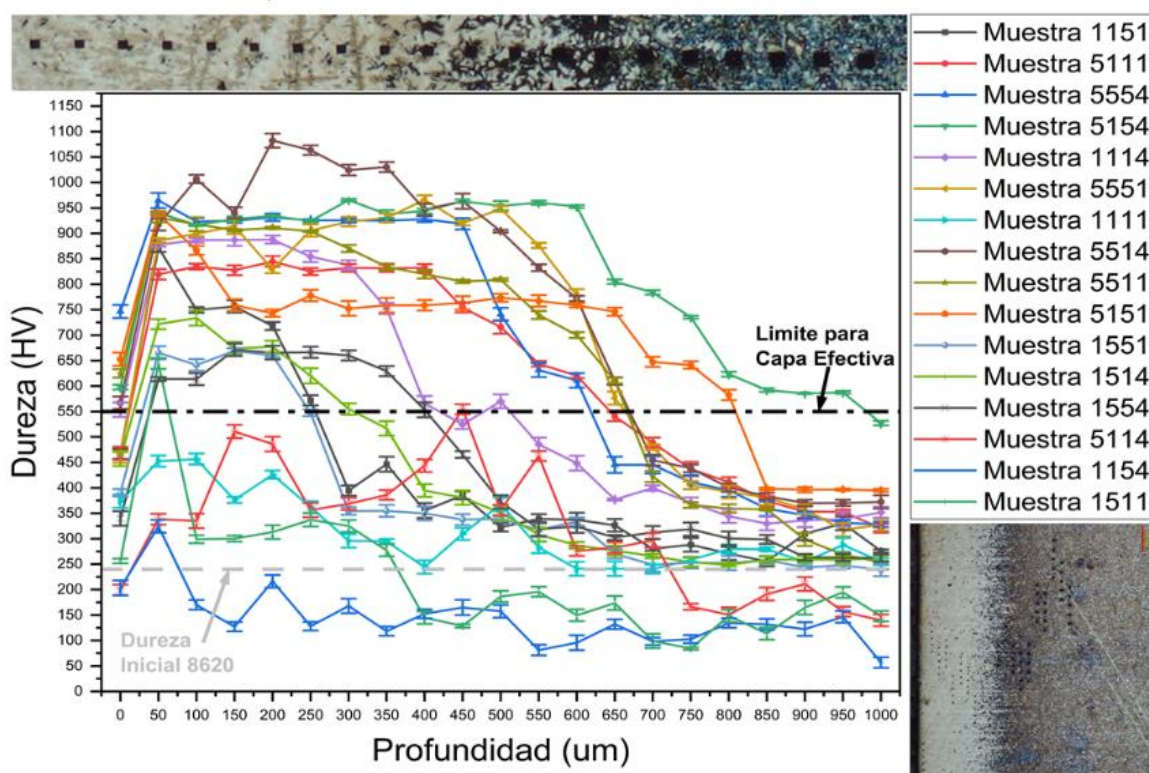


Figura 2 Resultados de dureza para las muestras de acero 8620

Análisis de Resultados se hizo según una evaluación estadística, se utilizó el software Minitab. Mediante un análisis de regresión lineal, se estableció una correlación directa entre los parámetros de proceso (temperatura, potencial de carbono, número de ciclos y presión de enfriamiento) y las propiedades de la capa carburizada. Esto permitió identificar los factores con mayor influencia en

Efecto De Los Parámetros De Carburizado De Baja Presión Sobre Las Propiedades De La Capa Endurecida En Aceros Fabricados Por Métodos Convencionales Y Por Manufactura Aditiva

el incremento de la profundidad de la capa endurecida y de su dureza superficial, lo que llevó a la determinación de las condiciones óptimas para alcanzar las características deseadas.

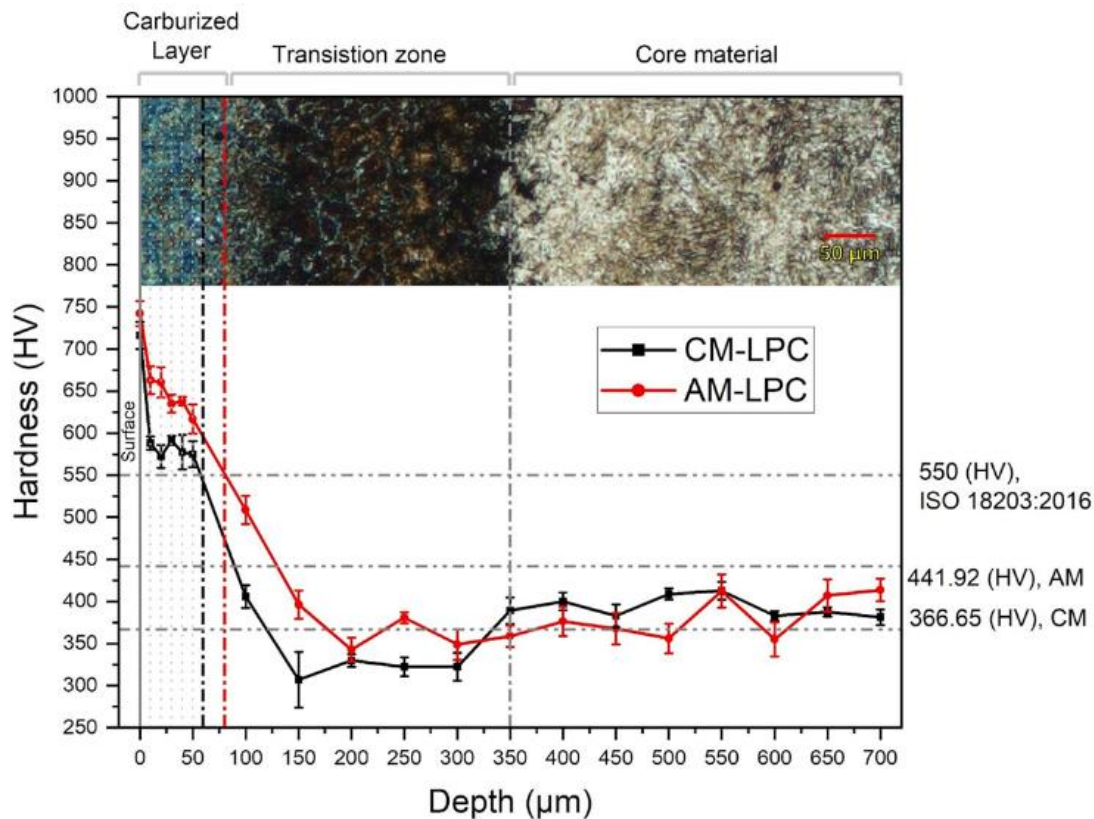


Figura 3. Resultados de dureza para las muestras de acero 8620.

4. Conclusiones para el acero 8620 (MC)

- Mayor Temperatura de Carburizado = Mayor Velocidad de Difusión
- El Potencial de Carbono (%C) incide la dureza de la capa carburizada y acelera el proceso.
- Mayor Porcentaje de Carbono = Mayor Dureza
- El Número de Ciclos de Carburizado (Núm.) tiene su afecto en la profundidad de la capa carburizada resultante.
- Mayor Número de Ciclos = Mayor Profundidad
- La Presión de Enfriamiento (Bar.) tiene su efecto la microestructura de la capa carburizada.
- Mayor Presión de Enfriamiento = Mayor formación Martensita

5. Conclusiones para el acero SS17-4PH (MA)

- El tratamiento de LPC aplicado acero SS17-4PH demostró que si es posible formar una capa carburizada en la superficie las muestras fabricadas por manufactura convencional y aditiva.
- El análisis TAFEL comparativo de corrosión aplicado sobre las muestras, demostró la incidencia del LPC sobre las propiedades anticorrosivas de este material.

Efecto De Los Parámetros De Carburizado De Baja Presión Sobre Las Propiedades De La Capa Endurecida En Aceros Fabricados Por Métodos Convencionales Y Por Manufactura Aditiva

- En la tabla comparativa del material con LPC, se puede apreciar el incremento de dureza respecto a la dureza alcanzada con un tratamiento de precipitado H900.

Referencias

- Gorockiewicz, R. (2011). Low-pressure carburizing systems: A review of current technology. . Low-pressure carburizing systems: A review of current technology. .
- Guo, J. D. (2011). Modeling and Simulation of Vacuum Low Pressure Carburizing Process in Gear Steel. Coatings. Modeling and Simulation of Vacuum Low Pressure Carburizing Process in Gear Steel. Coatings.
- Kim, H. K. (2017). Atmosphere Gas carburizing for improved wear resistance of Pure Titanium fabricated by additive manufacturing. Atmosphere Gas carburizing for improved wear resistance of Pure Titanium fabricated by additive manufacturing.
- Tapar, O. B. (2021). Investigation of the Effects of Low-Pressure Carburizing Process Parameters on Microstructural Evolution by Means of In Situ Synchrotron X-Ray Diffraction. . Investigation of the Effects of Low-Pressure Carburizing Process Parameters on Microstructural Evolution by Means of In Situ Synchrotron X-Ray Diffraction.
- Wang, H. W. (2019). Optimizing The low-pressure carburizing process of 16Cr3NiWMoVNB gear steel. Journal of Materials Science & Technology. Optimizing The low-pressure carburizing process of 16Cr3NiWMoVNB gear steel. Journal of Materials Science & Technology.
- Wang, H. Z. (2020). Study on the Process of Vacuum Low Pressure Carburizing and High Pressure Gas Quenching for Carburizing Steels. . Study on the Process of Vacuum Low Pressure Carburizing and High Pressure Gas Quenching for Carburizing Steels.
- Yang, M. &. (2020). Carburizing heat treatment of selective-laser-melted 20MnCr5 steel. Journal of Materials Engineering and Performance. Carburizing heat treatment of selective-laser-melted 20MnCr5 steel. Journal of Materials Engineering and Performance.

Evaluación Del Desempeño De Sensores De Glucosa No Enzimáticos A Base De C-Cuo, Ti-Pt-Cuo, Ti-Ni, T-Ni-Cuo

Pablo Alfonso Tirado Cantú¹, Alexis Cruz Zabalegui¹, Estephanny Jocelyn Alvarado Muñoz¹, Giberto Martínez Saucedo¹, Iker Rodrigo Chávez Urbiola¹, Jesús Javier Alcantar Peña¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
inv.asoc22ptirado@cidesi.edu.mx

Resumen. Se evaluó el desempeño tanto para detección de glucosa en el rango de concentración de 0-35 mM como interferencia presentada por analitos comúnmente encontrados en sangre humana (ácido ascórbico, ácido láctico, galactosa, colesterol, ácido úrico, ibuprofeno, dopamina, maltosa, creatinina, EDTA Y acetaminofeno) para sensores de glucosa no enzimáticos con electrodos de trabajo de C/CuO, Ti/Ni, Ti/Ni/CuO y Ti/Pt/CuO respectivamente. El sensor a base de C/CuO se saturó en una concentración de glucosa de 15 mM, limitando su rango de detección, mientras que los demás sensores lograron detectar glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM con sensibilidades de ~ 1.22 , 1.23 y $1.88 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ para los sensores de Ti/Pt/CuO, Ti/Ni y Ti/Ni/CuO respectivamente. En las pruebas de interferencias, el sensor de C/CuO fue el más selectivo con 6 de los 10 analitos medidos cumpliendo con el máximo de interferencia de 10% permitido por la norma ISO 15197-2013/2015, mientras que, para los demás sensores, únicamente 3 de los 10 analitos medidos cumplieron con el criterio de interferencia máxima permitida.

Palabras Clave: Sensores electroquímicos, detección de glucosa, micro fabricación.

1. Introducción

La diabetes mellitus es una de las principales problemáticas de salud pública a nivel mundial, caracterizada por la incapacidad del organismo para regular adecuadamente los niveles de glucosa en sangre. En México, su prevalencia ha alcanzado niveles alarmantes: de acuerdo con la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) 2022, aproximadamente el 12% de la población adulta ha sido diagnosticada con diabetes, mientras que un porcentaje significativo permanece sin diagnóstico, incrementando el riesgo de complicaciones crónicas (Instituto Nacional de Salud Pública, 2022). El monitoreo preciso y frecuente de la glucosa sanguínea es fundamental para prevenir y controlar complicaciones como retinopatía, nefropatía y neuropatía diabética.

Tradicionalmente, los sistemas de medición de glucosa se han basado en sensores enzimáticos, los cuales utilizan enzimas como la glucosa oxidasa o glucosa deshidrogenasa para catalizar la reacción con la glucosa. Sin embargo, estos dispositivos presentan limitaciones inherentes como la inestabilidad en condiciones extremas de pH y temperatura, el elevado costo de producción y la degradación de la enzima con el tiempo, lo que puede comprometer la exactitud de la medición (Lou et al., 2012; Mu et al., 2011). En contraste, los sensores de glucosa no enzimáticos han emergido como una alternativa prometedora,

Evaluación Del Desempeño De Sensores De Glucosa No Enzimáticos A Base De C-Cuo, Ti-Pt-Cuo, Ti-Ni, T-Ni-Cuo

aprovechando la catálisis directa de la oxidación de glucosa en la superficie de materiales electrocatalíticos como óxidos metálicos o metales nobles. Sus principales ventajas incluyen mayor estabilidad, tiempos de respuesta rápidos, menor dependencia de condiciones ambientales y potencial reducción de costos. No obstante, estos sensores enfrentan desafíos como la selectividad frente a interferentes presentes en sangre —por ejemplo, ácido ascórbico, ácido úrico o dopamina— y la necesidad de un amplio rango lineal de detección para cubrir concentraciones fisiológicas y patológicas de glucosa.

La norma ISO 15197:2013(E), que regula los sistemas de medición de glucosa para autocontrol, establece que el rango de concentración evaluado debe abarcar de 0 a 30 mM, y que la interferencia máxima permitida por analitos comunes en sangre no debe exceder el 10% respecto a la señal sin interferente (ISO, 2013). Por lo tanto, el desarrollo de sensores de glucosa no enzimáticos que cumplan simultáneamente con estos criterios normativos, ofreciendo alta sensibilidad, amplio rango lineal y elevada selectividad, resulta esencial para su futura implementación en dispositivos comerciales.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de sensores de glucosa no enzimáticos fabricados con diferentes configuraciones de electrodos, analizando su desempeño en el rango de detección establecido por la norma ISO 15197:2013(E) y su respuesta frente a interferentes, con el fin de identificar las configuraciones más viables para aplicaciones comerciales y clínicas.

2. Metodología Experimental

Fabricación de los Sensores

Se fabricaron sensores de glucosa no enzimáticos con distintos electrodos de trabajo (C/CuO, Ti/Ni, Ti/Ni/CuO y Ti/Pt/CuO) para determinar los materiales que cumplieron con el rango de detección de glucosa de 0-30 mM y presentaran la mínima interferencia con analitos comúnmente encontrados en sangre humana (ácido ascórbico, ácido láctico, galactosa, colesterol, ácido úrico, ibuprofeno, dopamina, maltosa, creatinina, EDTA Y acetaminofeno), de acuerdo con los requisitos de la norma ISO 15197-2013/2015 (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013) para la comercialización de tiras de glucosa. Para cada tipo de sensor se partió del mismo diseño de plantilla, la cual consta de un sistema de 3 electrodos con dimensiones globales de 5 mm de ancho por 30 mm de largo. Mientras que las dimensiones de los electrodos son de 2.4x2.2 mm, 2.6x2.2 mm, 0.5x2 mm para el electrodo de trabajo, contraelectrodo y electrodo de referencia respectivamente (ver Figura).

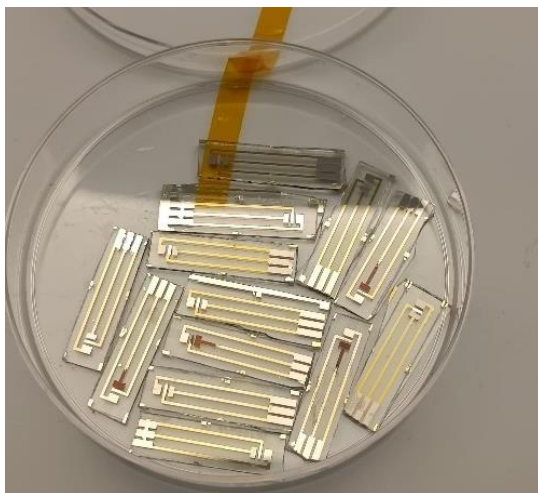


Figura 2. Sensores de Ti/Ni y Ti/Ni/CuO fabricados por un proceso de fotolitografía.

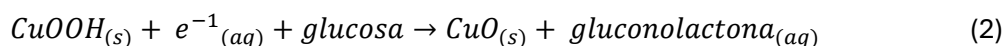
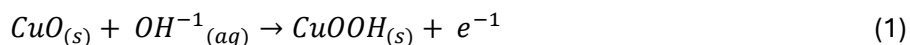
Caracterizaciones Electroquímicas

Las caracterizaciones electroquímicas se realizaron utilizando un potenciostato Pine Research Instrumentation Inc. Wavedriver 200. Las evaluaciones electroquímicas se realizaron sumergiendo los sensores en una celda de 25 mL llena con la solución electrolítica de NaOH 1 M y posteriormente se le adicionaron alícuotas de la solución madre de glucosa 1 M para obtener las concentraciones de glucosa deseadas (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mM). Se realizaron mediciones de voltametría cíclica (CV) y cronoamperometría (CA) para cada concentración de glucosa y partir de los datos obtenidos se creó una curva de calibración para determinar la sensibilidad de glucosa de cada sensor y la correlación entre concentración de glucosa y corriente medida. Para la evaluación de interferencia del sensor con analitos comúnmente encontrados en sangre humana, se repitieron las mediciones de CA y CV, manteniendo la concentración de glucosa fija a 16 mM, mientras que se variaba la concentración de los analitos a evaluar (ácido ascórbico, ácido láctico, galactosa, colesterol, ácido úrico, ibuprofeno, dopamina, maltosa, creatinina, EDTA Y acetaminofeno) de 0, 100, 500 y 1000 μM . A partir de la corriente medida para la evaluación de interferencia, se calculó la diferencia porcentual media de corriente con respecto a la medición sin el analito a evaluar con el objetivo de determinar cuáles analitos cumplen con la interferencia porcentual máxima de 10% permitida por la norma ISO 15197-2013/2015 (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013) para tiras comerciales de glucosa. Durante las caracterizaciones electroquímicas, se utilizaron los siguientes parámetros, voltametría cíclica de 0-0.9 V con una rapidez de barrido de 100 mV/s, mientras que las cronoamperometrías se realizaron a un potencial fijo de 700 mV durante 30 s.

3. Resultados y Discusión

Validación de Detección de Glucosa en el Rango de Concentración de 0-30 mM

La Figura (a) muestra las mediciones de voltametría cíclica (CV) sobre el sensor con electrodo de trabajo de C-CuO a concentraciones de glucosa de 0-35 mM. Se puede observar en los voltamogramas un pico anódico de oxidación (E_a) en ~700 mV, el cuál se atribuye a la oxidación de la glucosa de acuerdo con el modelo IHOAM, el cual describe la oxidación-reducción de metales para el sensado de glucosa. La intensidad del pico anódico se correlaciona con la oxidación de glucosa en sensores no enzimáticos y se debe principalmente a la difusión de glucosa en la superficie del electrodo de trabajo (Lou et al., 2012). El mecanismo de oxidación no enzimática de glucosa consiste en primero oxidar aún más la superficie de CuO a CuOOH en presencia de iones OH^{-1} (1), posteriormente la glucosa es oxidada en gluconolactona, actuando la superficie de CuOOH como catalizador (2) (Lou et al., 2012).



Se puede observar que la intensidad del pico de oxidación aumenta con la concentración de glucosa hasta una concentración de 15 mM y para concentraciones mayores, la intensidad del pico de oxidación no aumenta significativamente, indicando que el sensor se satura en 15 mM. A partir de las mediciones de CV, se extrajo una curva de calibración graficando la intensidad del pico de oxidación vs la concentración de glucosa para distintos tiempos de electro depósito de cobre (Figura (b)). La respuesta de los sensores mostró detección lineal de glucosa hasta una concentración máxima de 10 mM para un tiempo de depósito de 10 minutos, para tiempos de depósito en el intervalo de 5-75 minutos, se observó un rango lineal hasta 15 mM y de 20-30 mM el aumento de la corriente fue no lineal pero suficiente para detectar concentraciones de glucosa en el rango de 0-30 mM requerido por las normas. La intensidad de la señal se saturó en un tiempo de deposición de 60 minutos, indicando que no hay beneficio adicional al prolongar el tiempo de deposición por encima de 60 minutos.

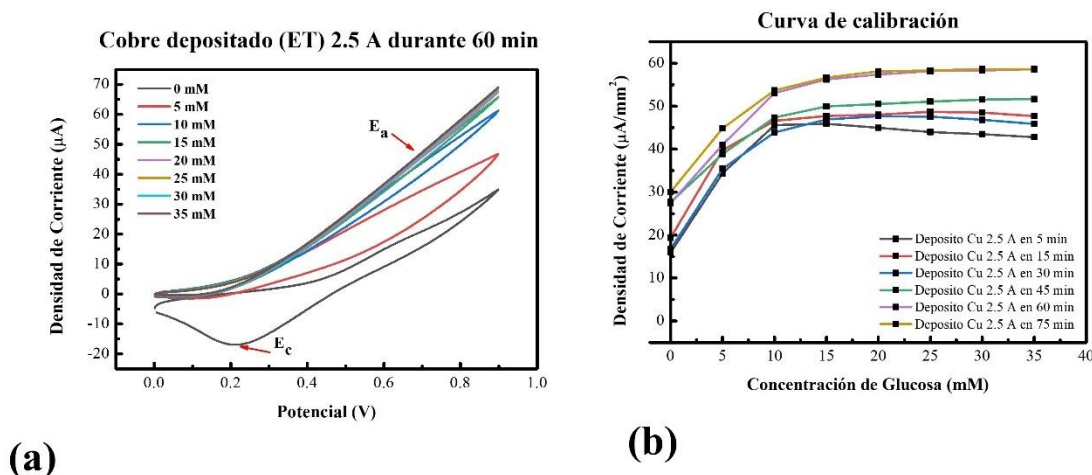


Figura 3 (a) Mediciones de voltametría cíclica sobre el sensor de C-CuO variando la concentración de glucosa en el rango de 0-35 mM (b) respuesta del sensor a distintos tiempos de electrodeposición de cobre.

Las mediciones de CV y CA para el sensor de Ti/Pt/CuO se muestran en la Figura (a), (b). En los voltamogramas a distintas concentraciones de glucosa (Figura (a)), se observan los picos de oxidación y reducción en las mismas posiciones que para el caso del sensor de C-CuO, indicando oxidación y reducción de la capa de CuO en el electrodo de trabajo discutida anteriormente (Lou et al., 2012). A diferencia del sensor de C-CuO, en este caso se observa una intensidad mucho mayor en los picos de oxidación a distintas concentraciones de glucosa y la intensidad del pico sigue aumentando significativamente en todo el rango de concentración de glucosa de 0-30 mM. Las mediciones de CA (Figura (b)) se realizaron a un potencial fijo de 700 mV debido a que es la posición en la que aparece el pico de oxidación de glucosa, y se puede observar un aumento en la corriente medida con la concentración de glucosa siendo consistente con los resultados de las mediciones de CV. A partir de la señal electroquímica, se generó una curva de calibración de corriente medida vs concentración de glucosa (Figura (c)). El sensor mostró una respuesta lineal en el rango de concentraciones de glucosa de 0-35 mM con una sensibilidad de $\sim 1.22 \mu\text{A}/\text{mMmm}^2$ ($r^2=0.99$), la cual se encuentra dentro del orden reportado para sensores no enzimáticos (Wang et al., 2010). Excediendo el rango de detección de 0-30 mM requerido por las normas, por lo que podría ser un posible candidato para la futura comercialización de los sensores desarrollados.

Debido al alto costo de fabricación que implicaría una tira de glucosa con Pt, se exploró la posibilidad de fabricar el sensor utilizando Ti/Ni o Ti/Ni/CuO para reducir los costos de fabricación. Las mediciones de CV y CA para el sensor de Ti/Ni se muestran en la Figura (a), (b). En los voltamogramas a distintas concentraciones de glucosa (Figura (a)), se observan los picos de oxidación y reducción en las mismas posiciones que para el caso del sensor de C-CuO, indicando oxidación y reducción de la capa de NiO para el caso de este sensor. Para el caso del sensor de Ti/Ni se sigue un mecanismo análogo de oxidación de glucosa al sustituir el cobre por níquel como electrodo de trabajo. En este caso el mecanismo de oxidación de la glucosa estaría dado por las ecuaciones (3) y (4) (Mu et al., 2011).

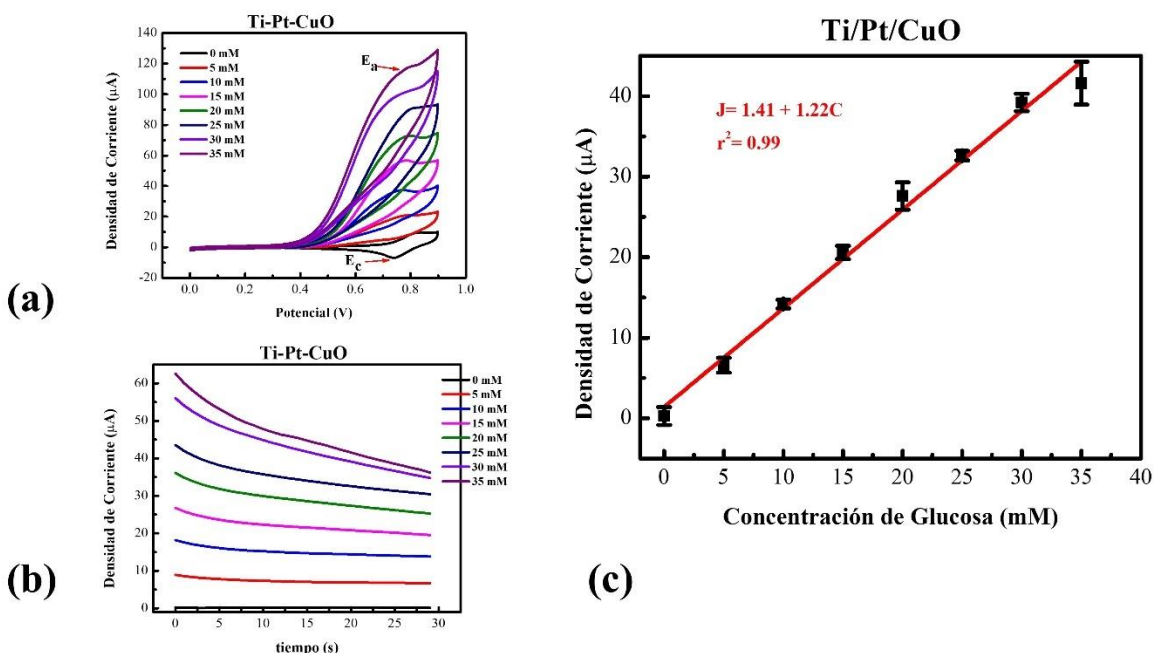
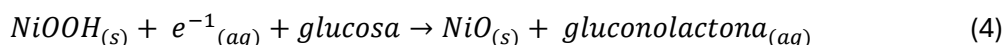
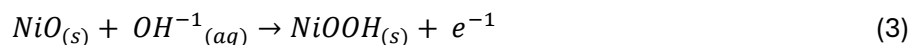


Figura 4. (a) Voltametría cíclica, (b) cronoamperometría, (c) curva de calibración del sensor de Ti/Pt/CuO en el rango de concentración de glucosa de 0-35 mM.



Las mediciones de CA (Figura (b)) muestran un aumento en la señal de corriente con la concentración de glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM al igual que para el caso del sensor de Ti/Pt/CuO. Se obtuvo una curva de calibración a partir de las mediciones electroquímicas del sensor de Ti/Ni (Figura (c)). La respuesta del sensor muestra una relación lineal entre corriente medida y concentración de glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM con una sensibilidad de $\sim 1.23 \mu A/mMmm^2$ ($r^2=0.99$), indicando que el sensor cumple con el rango de detección requerido por la norma ISO 15197-2013/2015 (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013).

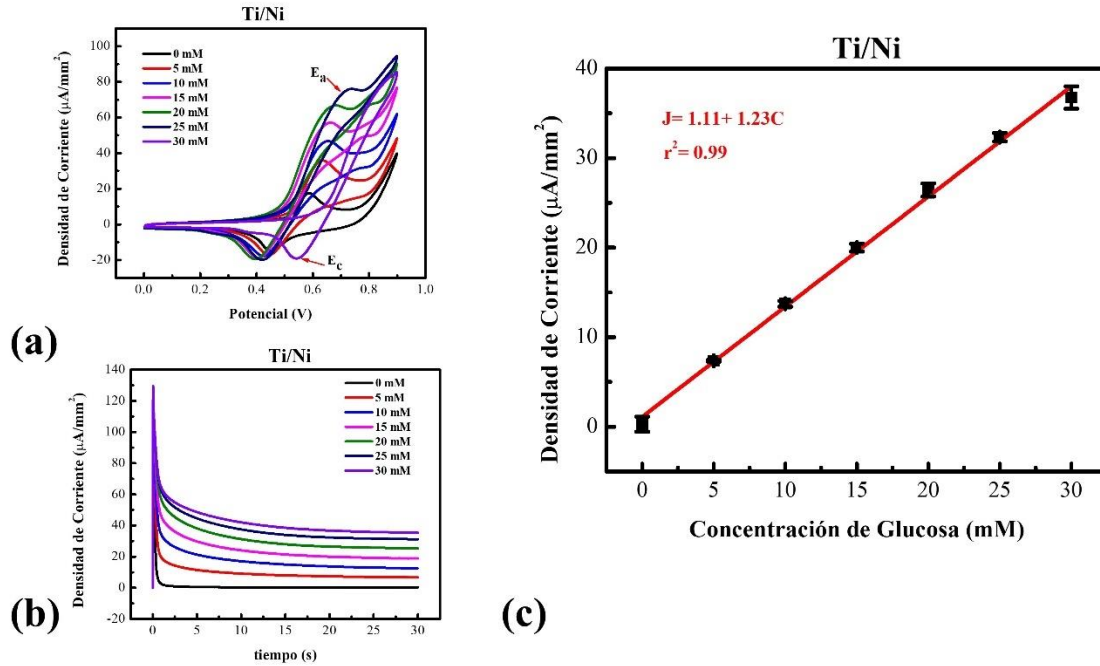


Figura 5. Voltametría cíclica, (b) cronoamperometría, (c) curva de calibración del sensor de Ti/Ni en el rango de concentración de glucosa de 0-30 mM.

Las mediciones de CV y CA para el sensor de Ti/Ni/CuO se muestran en la Figura (a), (b). En los voltamogramas a distintas concentraciones de glucosa (Figura (a)), se observan los picos de oxidación y reducción en las mismas posiciones discutidas anteriormente, indicando oxidación y reducción de glucosa en la superficie del electrodo de trabajo. Las mediciones de CA (Figura (b)) muestran un aumento en la señal de corriente con la concentración de glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM al igual que para el caso de los sensores de Ti/Pt/CuO y Ti/Ni. Se obtuvo una curva de calibración a partir de las mediciones electroquímicas del sensor de Ti/Ni/CuO (Figura (c)). La respuesta del sensor muestra una relación lineal entre corriente medida y concentración de glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM con una sensibilidad de $\sim 1.88 \mu\text{A}/\text{mMmm}^2$ ($r^2=0.98$), por lo que se puede apreciar que la incorporación de una película de CuO sobre el electrodo de trabajo de Ti/Ni aumenta la sensibilidad de glucosa en el dispositivo.

A partir de las curvas de calibración obtenidas de las mediciones de cronoamperometrías se calcularon el límite de detección (LOD) y límite de cuantificación (LOQ) de los sensores por medio de las siguientes fórmulas (Cruz-Zabalegui et al., 2025):

$$LOD = 3.3 \frac{\sigma}{S} \quad (5)$$

$$LOQ = 10 \frac{\sigma}{S} \quad (6)$$

Donde σ es la desviación estándar de las mediciones de cronoamperometría y S es la sensibilidad del sensor, los resultados calculados se muestran en la **Tabla 7**.

Evaluación Del Desempeño De Sensores De Glucosa No Enzimáticos A Base De C-Cuo, Ti-Pt-Cuo, Ti-Ni, T-Ni-Cuo

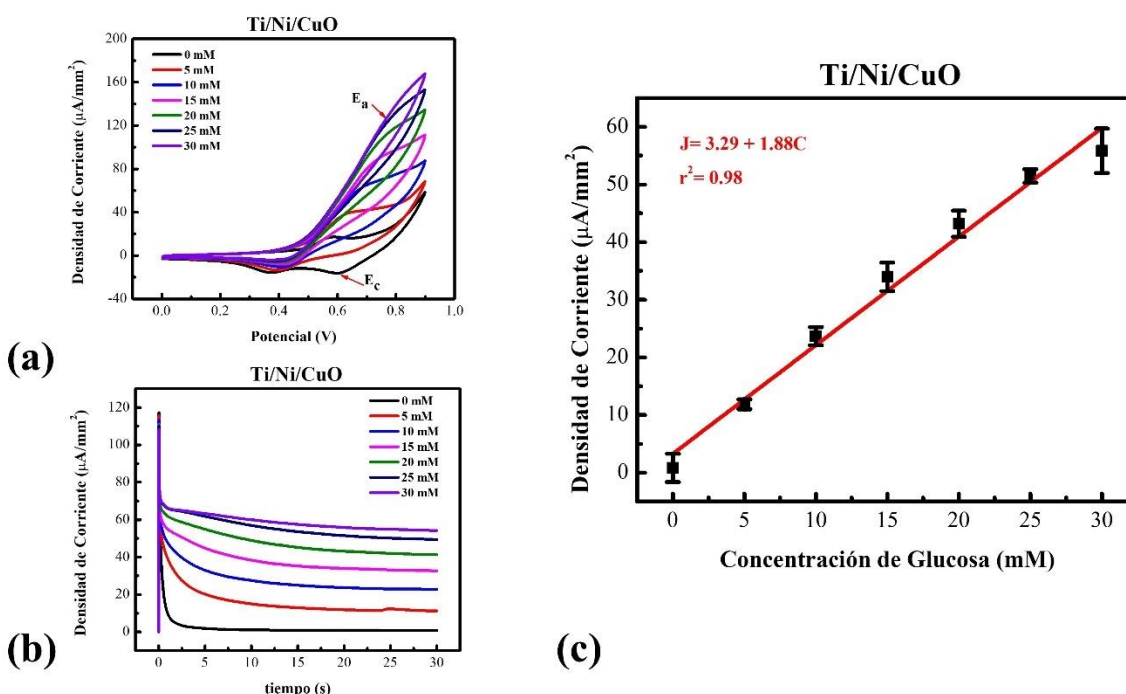


Figura 6. Voltametría cíclica, (b) cronoamperometría, (c) curva de calibración del sensor de Ti/Ni/CuO en el rango de concentración de glucosa de 0-30 mM.

Tabla 7. Límite de Detección y Límite de Cuantificación Calculado para los Distintos Electrodo de Trabajo.

Electrodo	Límite de Detección (LOD) (mM)	Límite de Cuantificación (LOQ) (mM)
Ti-Ni	1.5	4.5
Ti-Ni-CuO	3.2	9.8
Ti-Pt-CuO	2.7	8.2

Al observar los valores calculados de límite de detección (LOD) y límite de cuantificación (LOQ), se puede apreciar que el sensor de Ti-Ni es el que presenta menor LOD y LOQ de todos los materiales probados, con valores de 1.5 y 4.5 mM para el LOD y el LOQ respectivamente.

Se realizó análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS, por sus siglas en inglés) sobre uno de los electrodos con el recubrimiento de CuO después del proceso de oxidación electroquímica para confirmar la presencia de cobre y su oxidación. La Figura muestra (a) morfología tomada por microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), (b) cuantificación de EDS, (c) espectro de EDS del electrodo de trabajo con recubrimiento de CuO.

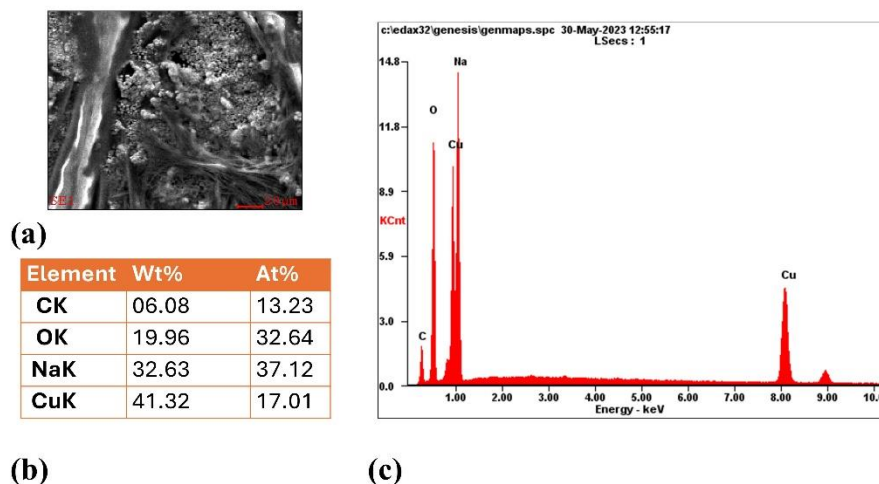


Figura 7. (a) micrografía de SEM, (b) cuantificación de EDS, (c) espectro de EDS del electrodo de trabajo con recubrimiento de CuO.

En espectro de EDS (Figura (b)), se observa la presencia de cobre, oxígeno, sodio y carbono. La presencia de cobre confirma el recubrimiento de Cu sobre el electrodo de trabajo por electrodeposición, mientras que un alto porcentaje de oxígeno (32.64% atómico) confirman su oxidación posterior por medio electroquímico utilizando una solución de NaOH 1 M. Mientras que la presencia de sodio se debe al uso de NaOH para la oxidación de la película de cobre.

Evaluación de Interferencia de los Sensores con Analitos Comúnmente Encontrados en Sangre Humana

Se realizaron mediciones electroquímicas (cronoamperometría a un potencial fijo de 700 mV durante 30 s) de los sensores una concentración fija de glucosa de 16 mM, variando la concentración (0, 0.1, 0.5, 1 mM) de distintos interferentes químicos (ácido ascórbico, ácido láctico, galactosa, colesterol, ácido úrico, ibuprofeno, dopamina, maltosa, creatinina, EDTA Y acetaminofeno) encontrados comúnmente en sangre humana para determinar la selectividad del sensor, lo cual es requisito para su futura comercialización. Los interferentes y concentración de glucosa fueron seleccionados de acuerdo con los requisitos señalados por la norma ISO 15197:2013(E) para la validación de sensores comerciales de glucosa (Cruz-Zabalegui et al., 2025) (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013). Se realizaron pruebas de interferencia para sensores con electrodos de trabajo de Ti-Pt-CuO, Ti-Ni, Ti-Ni-CuO y C-CuO. A partir de la interferencia medida, se calcularon las interferencias porcentuales medias que presentó cada sensor en el rango de concentración de interferentes de 0-1.0 mM (0-1000 μ M), y se muestran en la Figura .

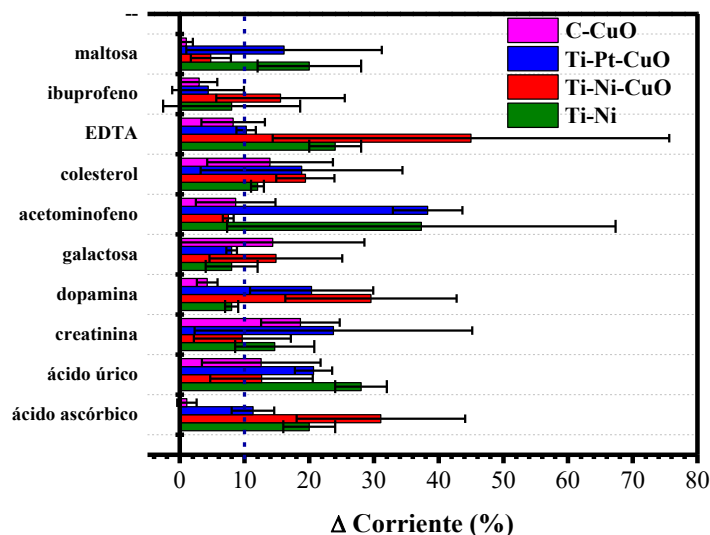


Figura 8. Interferencia media de los sensores de glucosa con electrodos de trabajo de C-CuO, Ti-Pt-CuO, Ti-Ni-CuO, Ti-Ni para los distintos interferentes medidos en un rango de concentración de 0-1 mM, manteniendo una concentración de glucosa fija de 16 mM.

De acuerdo con la norma ISO 15197:2013(E), el porcentaje máximo de interferencia permitido por cada analito no debe exceder del 10% con respecto a la muestra sin el analito a validar para poder considerarse que el sensor no muestra interferencia (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013). En base a este criterio, para el sensor con electrodo de trabajo de C-CuO, los analitos que presentan una interferencia menor al 10% son ácido ascórbico, dopamina, acetaminofeno, EDTA, ibuprofeno y maltosa. Los demás analitos se exceden del 10% de interferencia máxima, indicando que para el sensor con electrodo de trabajo de C-CuO 6 de los 10 analitos validados cumplen con el criterio de la norma. Para el sensor con electrodo de trabajo de Ti-Pt-CuO, los analitos que presentan una interferencia menor del 10% son galactosa, EDTA e ibuprofeno, mientras que los demás presentan una interferencia muy por encima del 10% máximo permitido, indicando la poca selectividad que presenta el platino. En el caso del sensor con electrodo de trabajo de Ti-Ni-CuO, los analitos que cumplen con la interferencia máxima de 10% son creatinina, acetaminofeno y maltosa. Finalmente, para el sensor con electrodo de trabajo de Ti-Ni, los analitos que presentan una interferencia máxima del 10% son ibuprofeno, dopamina y galactosa. La *Tabla 8* muestra los valores de porcentaje de interferencia obtenidos por analito y material de electrodo mientras que la *Tabla 9* muestra un resumen de los analitos que cumplieron con el grado máximo de interferencia permitido por la norma ISO 15197:2013(E) para cada sensor validado.

Tabla 8. Porcentaje de Interferencia presentado por analito y material de electrodo.

Interferente	Electrodo			
	Ti-Ni	Ti-Ni-CuO	Ti-Pt-CuO	C-CuO
	% de Interferencia			

ácido ascórbico	20±4	31±13	11.3±3.3	1.1±1.5
ácido úrico	28±4	12.7±7.9	20.7±2.9	12.6±9.2
creatinina	14.6±6.1	9.7±7.5	23.7±21.5	18.6±6.1
dopamina	8±1	29.5±13.3	20.4±9.5	4.2±1.6
galactosa	8±4	14.8±10.3	8±0.8	14.3±14.2
acetaminofeno	37.3±30	7.5±0.8	38.3±5.4	8.6±6.2
colesterol	12±1	19.4±4.5	18.8±15.6	13.9±9.7
EDTA	24±4	45±30.6	10.2±1.5	8.2±4.9
ibuprofeno	8±10.6	15.6±9.9	4.4±5.6	3±2.8
maltosa	20±8	4.8±3.1	16.1±15.1	1±1

Tabla 9. Resumen de Analitos que cumplieron con el criterio de máximo 10% de interferencia para cada sensor validado.

¿Cumple con la Interferencia Máxima de 10% Permitida?										
Interferente										
sensor	ácido ascórbico	ácido úrico	creatinina	dopamina	galactosa	acetaminofeno	colesterol	EDTA	ibuprofeno	maltosa
C-CuO	si	no	no	si	no	si	no	si	si	si
T-Pt-CuO	no	no	no	no	si	no	no	si	si	no
Ti-Ni-CuO	no	no	si	no	no	si	no	no	no	si
Ti-Ni	no	no	no	si	si	no	no	no	si	no

En la Tabla 9, se puede observar que el sensor de C-CuO es el que presenta mayor número de analitos que cumplen con el criterio de interferencia máxima de 10%, con 6 de los 10 analitos medidos cumpliendo el criterio establecido por la norma, por lo que sería la configuración mostrada con mayor selectividad de glucosa. Mientras, que, para los demás sensores, únicamente 3 de los 10 analitos medidos cumplieron con el criterio de interferencia máxima de 10%, indicando la poca selectividad que presentan el Pt y Ni como electrodos de trabajo.

4. Conclusiones

Se evaluó el desempeño tanto para detectar glucosa en el rango de concentración de 0-30 mM como la interferencia de analitos comúnmente encontrados en sangre humana (ácido ascórbico, ácido láctico, galactosa, colesterol, ácido úrico, ibuprofeno, dopamina, maltosa, creatinina, EDTA y acetaminofeno) de tres sensores de glucosa no enzimáticos con electrodos de trabajo de C/CuO, Ti/Pt/CuO, Ti/Ni y Ti/NiCuO respectivamente. Se confirmó la oxidación de glucosa un potencial de

Evaluación Del Desempeño De Sensores De Glucosa No Enzimáticos A Base De C-Cuo, Ti-Pt-Cuo, Ti-Ni, T-Ni-Cuo

0.5-0.75 V de acuerdo con lo reportado en la literatura para sensores no enzimáticos (Lou et al., 2012) (Mu et al., 2011) (Fall et al., 2023). El sensor a base de C/CuO mostró un aumento lineal de la intensidad del pico de oxidación en un rango de 0-15 mM, mientras que el aumento de intensidad fue mucho más gradual para concentraciones mayores a 15 mM, indicando saturación del sensor a concentraciones altas de glucosa. Los sensores a base de Ti/Pt/CuO, Ti/Ni y Ti/Ni/CuO mostraron un aumento lineal en la intensidad del pico de oxidación en todo el rango de concentración de glucosa de 0-30 mM con sensibilidades de ~ 3 , 1.55 y 1.95 $\mu\text{A}/\text{mMmm}^2$ para los sensores de Ti/Pt/CuO, Ti/Ni y Ti/Ni/CuO respectivamente, las cuales están dentro del rango reportado para sensores no enzimáticos (Wang et al., 2010). Por lo que el sensor con mayor sensibilidad fue el de Ti/Pt/CuO, mientras que los sensores de Ti/Ni y Ti/Ni/CuO mostraron sensibilidades aceptables, con un aumento de sensibilidad al electrodepositar CuO sobre el sensor de Ti/Ni. Por lo que los sensores de Ti/Pt/CuO, Ti/Ni y Ti/Ni/CuO cumplen con el rango de detección requerido por la norma ISO 15197-2013/2015 para la comercialización de tiras de glucosa (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013).

Con respecto a las pruebas de interferencia, el sensor de C/CuO fue el que resultó ser el más selectivo, donde los analitos de ácido ascórbico, dopamina, acetaminofeno, EDTA, ibuprofeno y maltosa cumplieron con la interferencia máxima de 10% permitida por la norma ISO 15197-2013/2015 (In Vitro Diagnostic Test Systems — Requirements for Blood-Glucose Monitoring Systems for Self-Testing in Managing Diabetes Mellitus, 2013), resultando en 6 de 10 analitos cumpliendo con el criterio. Mientras que los demás sensores únicamente 3 de los 10 analitos medidos cumplieron con la interferencia máxima permitida de 10%, siendo galactosa, EDTA e ibuprofeno para el sensor de Ti/Pt/CuO, ibuprofeno, dopamina y galactosa para el sensor de Ti/Ni y finalmente creatinina, acetaminofeno y maltosa para el sensor de Ti/Ni/CuO. Esto indica que una plantilla de carbono presenta menos rango de detección, pero mayor selectividad que una de Ti/Pt o Ti/Ni.

Referencias

Cruz-Zabalegui, A., Tirado-Cantú, P., Alvarado-Muñoz, E. J., Alcantar-Peña, J. J., Martinez-Saucedo, G., & Chavez-Urbiola, I. R. (2025). Microfabricated Ti/Ni electrodes for non-enzymatic glucose detection: Mechanistic insights and interference analysis in blood-mimicking conditions. *Talanta*, 293, 128050. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128050>

Fall, B., Sall, D., Hemadi, M., Diaw, A. K. D., Fall, M., Randriamahazaka, H., & Thomas, S. (2023). Highly efficient non-enzymatic electrochemical glucose sensor based on carbon nanotubes functionalized by molybdenum disulfide and decorated with nickel nanoparticles (GCE/CNT/MoS₂/NiNPs). *Sensors and Actuators Reports*, 5(2666–0539), 100136.

In vitro diagnostic test systems—Requirements for blood-glucose monitoring systems for self-testing in managing diabetes mellitus (Normative ISO 15197:2013(E); ISO 15197:2013(E), pp. 1–46). (2013). International Organization for Standardization.

Lou, J., Jiang, S., Zhang, H., Jiang, J., & Liu, X. (2012). A novel non-enzymatic glucose sensor based on Cu nanoparticle modified graphene sheets electrode. *Analytica Chimica Acta*, 709, 47–53.

Mu, Y., Jia, D., He, Y., Yuqing, M., & Wu, H.-L. (2011). Nano nickel oxide modified nonenzymatic glucose sensors with enhanced sensitivity through an electrochemical process strategy at high potential. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(6), 2948–2952.

Evaluación Del Desempeño De Sensores De Glucosa No Enzimáticos A Base De C-Cuo, Ti-Pt-Cuo, Ti-Ni, T-Ni-Cuo

Tirado-Cantú, P., Alcantar-Peña, J. J., Cruz-Zabalegui, A., A.M., J., Martinez-Saucedo, G., Diaz-Alonso, D., & Chavez-Urbiola, I. R. (2024). Simultaneous pH and glucose sensing and its relation in a non-enzymatic glucose sensor. *MRS Communications*, 14(1), 96–102.

Wang, X., Hu, C., Liu, H., Du, G., He, X., & Xi, Y. (2010). Synthesis of CuO nanostructures and their application for nonenzymatic glucose sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 144, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.09.067>

Evolución De Controladores Neuronales Para El Auto-Ensamblaje Y Locomoción De Robots Modulares MARBOT

Jesús Miguel Ángel Rodríguez Mendoza¹ y Jorge Roberto Padilla Gómez²

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la Cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Instituto Tecnológico de Ensenada, Boulevard Tecnológico 150, 22780 Baja California, México
jm.rodriguezm@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. Uno de los mayores retos de la robótica es diseñar controladores capaces de guiar sistemas modulares en la consecución de tareas complejas, independientemente de su escala o nivel de dificultad. Históricamente, los enfoques analíticos basados en modelos matemáticos y ecuaciones diferenciales han buscado garantizar la estabilidad de distintos tipos de sistemas. Sin embargo, fue hasta finales del siglo XX, con la disponibilidad de procesadores de alto rendimiento, que surgieron métodos inspirados en la fisiología de los seres vivos y en la inteligencia artificial. Este trabajo propone un sistema de control para robots modulares MARBOT, fundamentado en el paradigma del cómputo evolutivo y en modelos neuronales inspirados en el sistema nervioso central. A partir de arquitecturas de control existentes, se implementan y adaptan algoritmos evolutivos que facilitan tanto el auto-ensamblaje de módulos como su locomoción coordinada. El diseño y la optimización de los controladores se llevan a cabo íntegramente en simulación, empleando herramientas especializadas que integran la dinámica física del robot virtual con los modelos neuronales y los procesos evolutivos. Los resultados demuestran que los controladores evolucionados alcanzan altos niveles de robustez y adaptabilidad, facilitando tanto la formación autónoma de estructuras modulares como el desplazamiento eficiente en diferentes entornos.

Palabras Clave: robótica modular, cómputo evolutivo, control neuronal, auto-ensamblaje, locomoción autónoma.

1. Introducción

La investigación en robótica ha perseguido durante décadas la emulación de capacidades observadas en sistemas biológicos con el fin de dotar a las máquinas de percepción, adaptación y control robusto. En los enfoques tempranos la estabilidad y la regulación se formularon mediante modelos dinámicos y ecuaciones diferenciales, pero el aumento en la potencia de cálculo y el desarrollo de técnicas de aprendizaje han permitido la convergencia de los métodos clásicos con estrategias bioinspiradas. Esta convergencia ha situado a la interacción entre morfología, sensores y control como un determinante del comportamiento emergente en sistemas móviles autónomos (Nehmzow, 2012; Dudek & Jenkin, 2010).

La robótica colaborativa y los sistemas modulares auto-reconfigurables han surgido como alternativas eficaces para abordar tareas que exigen flexibilidad morfológica y coordinación entre

Evolución De Controladores Neuronales Para El Auto-Ensamblaje Y Locomoción De Robots Modulares MARBOT

unidades sencillas. Un robot modular se compone de módulos homogéneos e interconectables, cada uno dotado con sensores, actuación y comunicación local, y la combinación de estos módulos permite formar estructuras adaptadas a funciones diversas, según la tarea encomendada. Las plataformas y estudios representativos han mostrado diferentes soluciones de hardware y control, a la vez que han puesto de manifiesto desafíos relevantes, entre ellos la planificación de la reconfiguración, la escalabilidad de las arquitecturas y el control distribuido en presencia de incertidumbre (Murata et al., 2002; Kamimura et al., 2001; Kamimura et al., 2005). Los mecanismos subyacentes de cooperación y comunicación resultan determinantes para que el comportamiento colectivo aporte una utilidad superior a la de agentes individuales (Cao, Fukunaga & Kahng, 1995; Parker et al., 2000).

En los sistemas modulares conviven dos problemas de locomoción que requieren soluciones íntimamente relacionadas. El primero concierne al desplazamiento y a la orientación de módulos individuales hasta puntos concretos para que se produzca el auto-ensamblaje o la auto-reconfiguración. El segundo atañe a la locomoción de la estructura formada, es decir la generación de patrones coordinados que permitan a la morfología completa desplazarse y sortear obstáculos. La estrecha dependencia entre la topología de unión de los módulos y los patrones de control implica que un método de síntesis automática de control puede ser más adecuado que un enfoque puramente determinista, dado que la estructura y las distribuciones de grados de libertad varían según la configuración y el mecanismo de desplazamiento de cada módulo (Kamimura et al., 2005; Ryland & Cheng, 2010).

Para producir movimientos rítmicos y coordinados, los generadores centrales de patrones constituyen una aproximación natural. Estas redes oscilatorias son capaces de generar ritmos sostenidos que, al acoplarse según la morfología, producen gaitas coherentes en estructuras articuladas. La literatura sobre Generadores Centrales de Patrones (CPG) aporta modelos para el diseño y el ajuste de osciladores acoplados, y muestra cómo su modularidad facilita la adaptabilidad del control ante cambios morfológicos sin requerir una reingeniería total del controlador (Ijspeert, 2008; Sproewitz et al., 2008). En paralelo, los enfoques de cómputo evolutivo ofrecen un marco para optimizar parámetros, pesos y topologías de control cuando el modelo dinámico está incompleto o cuando el espacio de diseño presenta alta dimensionalidad. Experiencias de robótica evolutiva han demostrado la utilidad de la evolución de controladores neuronales y de la coevolución de control y morfología para obtener comportamientos cooperativos y locomotores robustos en simulación, con resultados que orientan la transferencia a hardware cuando se combinan criterios de evaluación adecuados y una validación rigurosa (Dorigo et al., 2004; Trianni et al., 2004; Gay et al., 2013).

En torno a estas líneas de trabajo han surgido propuestas que abordan, desde distintos ángulos, tanto el diseño de hardware modular como las estrategias de control y optimización necesarias para el auto-ensamblaje y la locomoción. Murata et al. (2002) y Kamimura et al. (2001, 2005) describen arquitecturas y experimentos con plataformas modulares que ponen de manifiesto los desafíos de planificación de la reconfiguración y de coordinación entre módulos. Autores interesados en los fundamentos teóricos de la cooperación muestran cómo los mecanismos de comunicación y supervisión condicionan la utilidad global del sistema, tal y como señalan Cao, Fukunaga y Kahng (1995) y Parker et al. (2000). En cuanto al control rítmico, Ijspeert (2008) y Sproewitz et al. (2008) presentan modelos de generadores centrales de patrones aplicables a la generación de patrones de movimiento coordinados en robots articulados.

Estudios que optimizan perceptrones multicapa y CPG mediante algoritmos genéticos o enfoques probabilísticos aparecen en trabajos de Li et al. (2005), Liu et al. (2008), Wu y Ma (2010), He et al. (2016) y Peng et al. (2017), mientras que investigaciones sobre retroalimentación sensorial y topologías de control se observan en Gay et al. (2013), Cristiano et al. (2014) y Ahmadzadeh et al. (2016). Los fundamentos de optimización necesarios para justificar la aplicación de algoritmos evolutivos y métodos probabilísticos se sustentan en textos como Montana y Davis (1989), Biegler (2010) y Weise (2009), y evaluaciones sobre transferencia robustez aparecen en Vonásek et al. (2015) y en análisis comparativos como los de Fan et al. (2016) y Sproewitz et al. (2008). En conjunto, este cuerpo de trabajo evidencia que hay una base sólida de técnicas y criterios experimentales capaces de orientar la síntesis de controladores para robots modulares, pero que aún persisten preguntas sobre la integración práctica de control de ensamblaje y control de locomoción en una misma metodología replicable en simulación y transferible a prototipos físicos.

La Tabla 1 sintetiza de forma compacta aportaciones representativas relacionadas con evolución de controladores, diseño de CPG y desarrollo de hardware modular, con el propósito de situar el planteamiento de este trabajo frente a la literatura existente.

Tabla 1. Aportaciones representativas

Referencia	Enfoque
Murata et al., 2002	Diseño de hardware y planificación de reconfiguración
Kamimura et al., 2001; Kamimura et al., 2005	Optimización de CPG y validación en plataforma modular
Cao, Fukunaga & Kahng, 1995	Fundamentos teóricos de cooperación
Parker et al., 2000	Mecanismos de comunicación distribuida
Ijspeert, 2008	Diseño de osciladores acoplados para locomoción
Sproewitz et al., 2008	Evaluación de patrones rítmicos
Dorigo et al., 2004; Trianni et al., 2004	Robótica evolutiva para coordinación colectiva
Li et al., 2005; Liu et al., 2008	Evolución de parámetros y topologías
Wu & Ma, 2010; He et al., 2016; Peng et al., 2017	Algoritmos genéticos y criterios de evaluación
Gay et al., 2013; Cristiano et al., 2014; Ahmadzadeh et al., 2016	Integración de sensores en control rítmico
Montana & Davis, 1989; Biegler, 2010; Weise, 2009	Métodos deterministas y probabilísticos
Vonásek et al., 2015; Fan et al., 2016	Estudios comparativos y experimentales

Considerando el marco anterior, la propuesta de este trabajo aprovecha el potencial del cómputo evolutivo para integrar control de ensamblaje y control de locomoción en un único esquema evaluado en simulación. El dispositivo sobre el que se desarrolla la propuesta es MARBOT, un robot formado por módulos compuestos por dos cuerpos unidos por una articulación universal tipo cardán y equipados con dos llantas actuadas lateralmente que confieren capacidad de locomoción diferencial, el diseño de las llantas con sección cuadrada facilita la obtención de configuraciones

de ensamblaje divergentes y la experimentación con distintas morfologías, este se puede visualizar en la Figura 1.

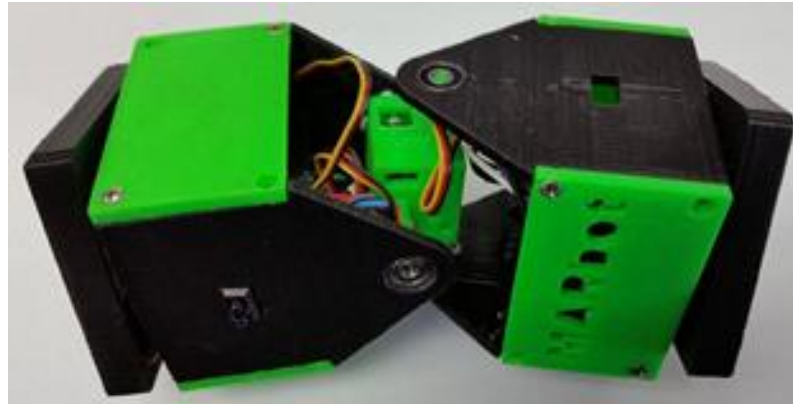


Figura 1 Prototipo de módulo MARBOT.

Los objetivos de este trabajo son desarrollar una metodología para formar una estructura unidimensional mediante el auto-ensamblaje de módulos virtuales a partir de la evolución de controladores neuronales, y generar la locomoción de la estructura formada mediante la evolución de modelos de CPG. En términos concretos se busca evolucionar perceptrones multicapa para controlar un par de módulos y formar una configuración semejante a una serpiente, evolucionar un CPG mediante algoritmos genéticos para gobernar la locomoción de la estructura formada, diseñar una función de retroalimentación sensorial para el CPG mediante la evolución de una red neuronal y simular el desplazamiento del robot como estructura serpentina, todo ello con el propósito de validar la eficacia del cómputo evolutivo en la síntesis de controladores autónomos para robots modulares y aportar criterios reproducibles que faciliten la transición a hardware real.

2. Materiales y Métodos

Implementación virtual de MARBOT en V-REP

Cada módulo de MARBOT se diseñó en Blender® y se exportó a V-REP, donde se asignaron articulaciones, sensores de proximidad y propiedades dinámicas (momentos de inercia, fricción y centro de masas). Para simplificar la simulación, todos los cuerpos se consideraron de densidad uniforme. Además, a cada módulo se le añadió un *dummy* que emula un imán virtual, facilitando el acoplamiento durante el auto-ensamblaje. En V-REP, el cuerpo base actúa como nodo raíz de la jerarquía. Todas las articulaciones y componentes dependen de él, garantizando la consistencia cinemática.

Para este caso, la base de MARBOT se ha escogido como el cuerpo principal donde se ubican las articulaciones mayores y los puntos de acoplamiento. En la Figura 2 se muestran desglosados los cuerpos y objetos que conforman un módulo: cuerpo base (nodo raíz), eslabones, articulaciones (joints) y el *dummy* que emula el imán de acoplamiento. Algunos elementos, como las uniones internas de las llantas y ciertos sensores virtuales de proximidad, no son visibles externamente porque están situados en el interior de los cuerpos. Este desglose facilita la identificación de los parámetros dinámicos y cinemáticos usados en la simulación (centro de masas, momentos de inercia y fricciones).

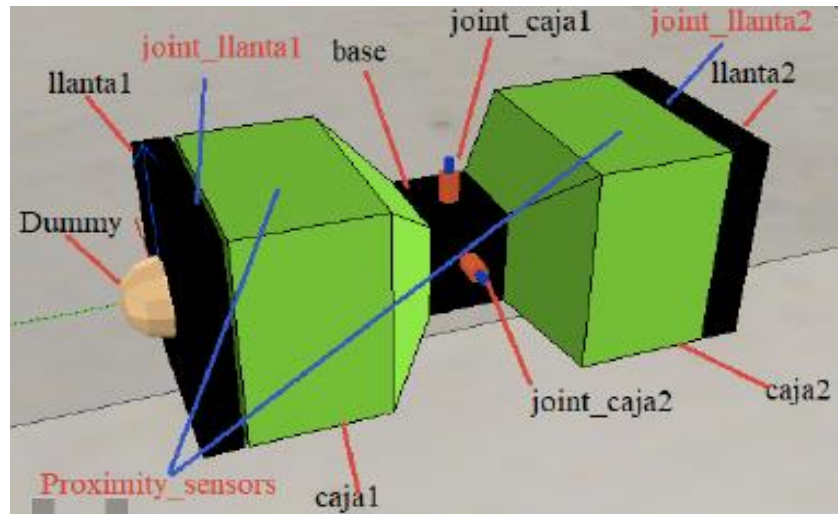


Figura 2 Secuencia temporal de posiciones (auto-ensamblaje)

Sincronización entre MATLAB y V-REP mediante API remota

Para controlar MARBOT desde MATLAB se empleó la Remote API de V-REP. Tras copiar los archivos `remoteApiProto.m`, `remApi.m` y `remoteApi.dll` al directorio de trabajo de MATLAB se instancia el cliente con `vrep = remApi('remoteApi');` y se inició la conexión remota con `clientID = vrep.simxStart('127.0.0.1',19997,true,true,5000,5);` A partir del script de ejemplo `simpleTest.m`, esta conexión bidireccional, con muestreo a 50 Hz, permite leer y escribir en tiempo real las posiciones, orientaciones y velocidades de cada articulación, así como enviar las señales de control generadas por los algoritmos de optimización.

Algoritmo genético para la evolución de controladores

La optimización de los perceptrones multicapa (auto-ensamblaje) y de la matriz de conectividad del CPG (locomoción) se llevó a cabo con un algoritmo genético en MATLAB. Cada individuo codifica un vector de 112 a 190 parámetros (pesos y umbrales); tras evaluar la simulación de MARBOT, se calcula una función de aptitud basada en errores de posición, orientación y/o distancia a obstáculos, normalizada a [0, 1] para producir la recompensa. La construcción de parámetros se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Parámetros del algoritmo genético

Parámetro	Auto-ensamblaje	Locomoción	Evasión de obstáculos
Tamaño de población	74	120	100
Longitud de cromosoma	112	150	190
Generaciones máximas	74	130	112
% de élite	5 %	5 %	5 %

% de cruzamiento	80 %	80 %	80 %
Tasa de mutación inicial	40 %	40 %	40 %
Tasa de mutación final	10 %	10 %	10 %

La selección se realiza por rangos (incluyendo 5 % de élite), el cruce es aritmético con 80 % de probabilidad y la mutación decrece linealmente de 40 % a 10 %.

3. Metodología de experimentación

La Figura 3 presenta el protocolo experimental en cinco etapas; el diagrama sintetiza el flujo y aquí solo se puntualiza que las simulaciones se ejecutaron en V-REP enlazadas con MATLAB y que el algoritmo genético se detuvo al cumplirse el criterio de parada.

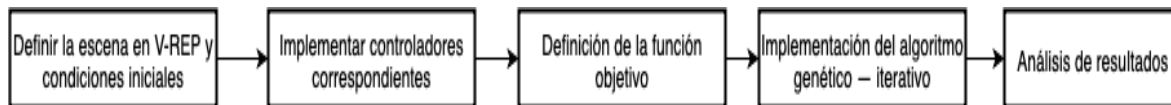


Figura 3 Metodología de experimentación.

3. Resultados

4.1 Experimento 1: Auto-ensamblaje de dos módulos

Se estableció la función de aptitud, que pretende minimizar la diferencia de distancia y de orientación entre las llantas de los módulos, de forma que se estructure un robot con morfología serpentina. También se minimiza la diferencia de posición de las llantas respecto a un punto específico del escenario que corresponde al lugar de auto-ensamblaje. La función objetivo se representa mediante la siguiente expresión:

$$\min f(x, z, P_d) = \|x_1 - x_d\| + \|z_1 - z_2\| + \|P_d - x_1\| + \|P_d - x_2\| \quad (1)$$

Donde x_1 , x_2 son las posiciones normalizadas de cada llanta (distancias en el plano), z_1 , z_2 las orientaciones alrededor del eje z , y P_d la posición en el plano correspondiente al punto deseado de auto-ensamblaje.

La simulación inicial sitúa dos módulos de MARBOT en posiciones opuestas en un área de trabajo de 0.75 m × 0.75 m. Las condiciones iniciales situaron al Módulo 1 en (0.30 m, 0.25 m) y al Módulo 2 en (−0.30 m, −0.25 m). A partir de las velocidades óptimas halladas por el perceptrón multicapa, ambos módulos convergen al punto de unión (0, 0) con apenas desviaciones.

La Figura 4 muestra la secuencia temporal de las coordenadas X e Y de cada módulo: el Módulo 1 (línea continua) avanza de manera fluida durante los primeros 15 s hasta estacionarse en el origen, mientras que el Módulo 2 (línea punteada) realiza un recorrido ligeramente más sinuoso pero ocasionalmente acelera para compensar la distancia recorrida, reflejando la adaptación coordinada de ambas redes neuronales.

Evolución De Controladores Neuronales Para El Auto-Ensamblaje Y Locomoción De Robots Modulares MARBOT

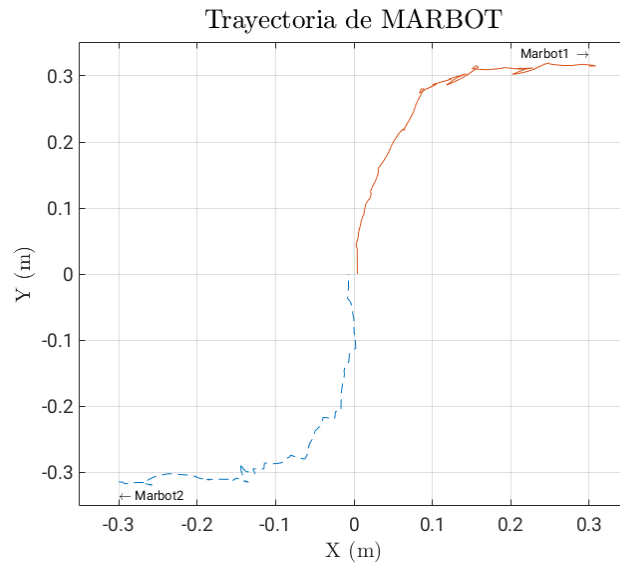


Figura 4 Secuencia temporal de posiciones (auto-ensamblaje)

La Figura 5 presenta las trayectorias en el plano XY: el Módulo 1 describe una curva suave casi rectilínea, mientras que el Módulo 2 traza un arco más amplio antes de acoplarse. Este patrón demuestra que, pese a partir de ubicaciones diferentes, las velocidades calculadas garantizan un acople simultáneo, minimizando el tiempo total de ensamblaje.

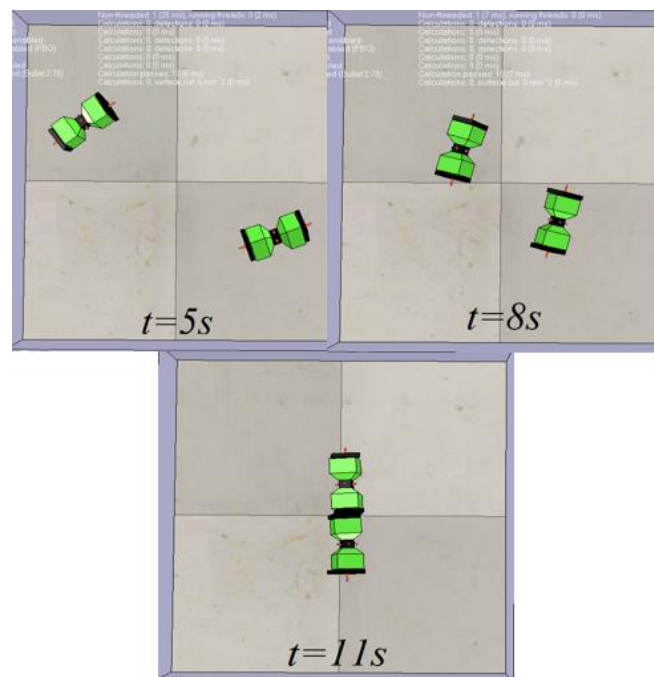


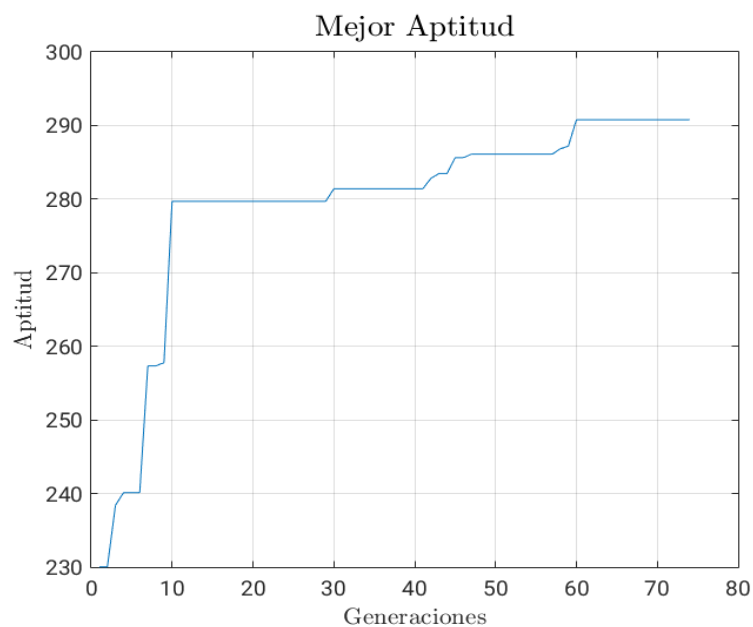
Figura 5 Trayectorias XY de módulos (auto-ensamblaje)

En la Tabla 3 se resumen las recompensas parciales para cada término de la función de aptitud, así como la suma final, comparando el valor máximo teórico con el obtenido en la mejor solución.

Tabla 3 Recompensas — Experimento 1

Componente	Máximo posible	Obtenido
$ x_1 - x_2 $	100	98.02
$ z_1 - z_2 $	100	96.16
$ Pd - x_1 $	50	48.33
$ Pd - x_2 $	50	47.79
Total	300	290.30

La evolución de la mejor aptitud por generación aparece en la Figura 6. Durante las primeras 10 generaciones la recompensa salta de 230 a 260, estabilizándose cerca de 290 a partir de la generación 20, lo que evidencia una rápida convergencia en menos de 50 generaciones.

**Figura 6** Gráfica de mejor aptitud por generación (Experimento 1)

Por su parte, la Figura 7 muestra la aptitud promedio por generación, que progresa de un valor inicial de ≈ 150 a ≈ 260 hacia la generación 50, con una disminución notable de la varianza en las últimas 20 generaciones, indicando homogeneización de la población alrededor de las soluciones óptimas.

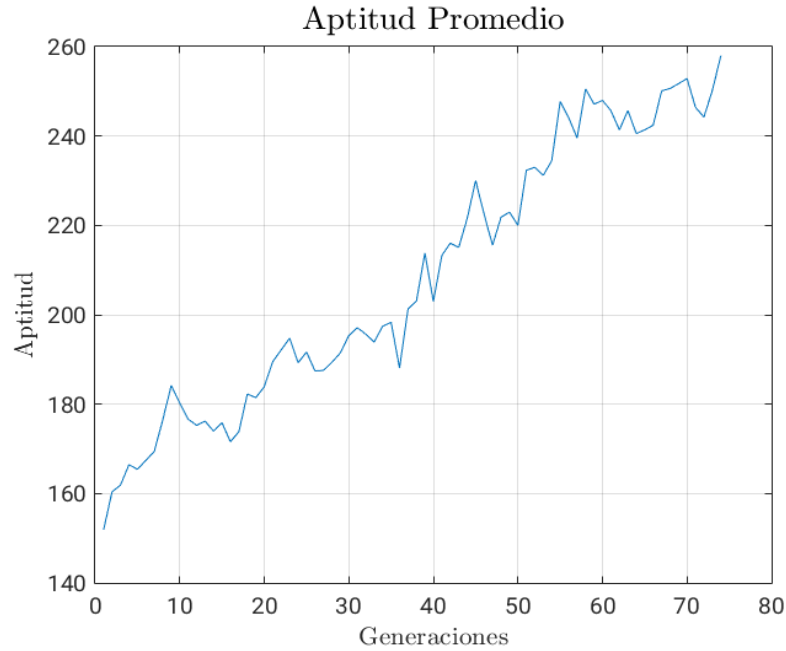


Figura 7 Gráfica de aptitud promedio por generación (Experimento 1)

4.2 Experimento 2: Locomoción de la estructura completa

Se definió la función objetivo para la locomoción con la finalidad de favorecer el desplazamiento a lo largo del eje X manteniendo desviaciones laterales y de orientación mínimas, y favoreciendo velocidades de avance adecuadas. La función objetivo se expresa como:

$$\min f(P_d, z, pos_y) = \|P_d - P_1\| + \|z\| + \sum_{i=1}^N pos_{y_i} + \max[f(vel_x)] \quad (2)$$

Donde P_d es la posición objetivo a lo largo del eje X, P_1 la posición actual del robot, z la orientación alrededor del eje Z, pos_{y_i} las desviaciones en Y de los puntos relevantes $i = 1 \dots N$ y vel_x las velocidades en X cuya maximización favorece el avance.

Tras completar el ensamblaje, la estructura en forma de serpiente inicia el desplazamiento de $X = -0,93$ m el módulo 1 mientras el módulo 2 desde $X = -1,06$ m. La Figura 8 ilustra la trayectoria XY completa, donde el desplazamiento principal ocurre a lo largo del eje X con oscilaciones menores en Y, revelando un patrón rítmico controlado por el CPG optimizado.

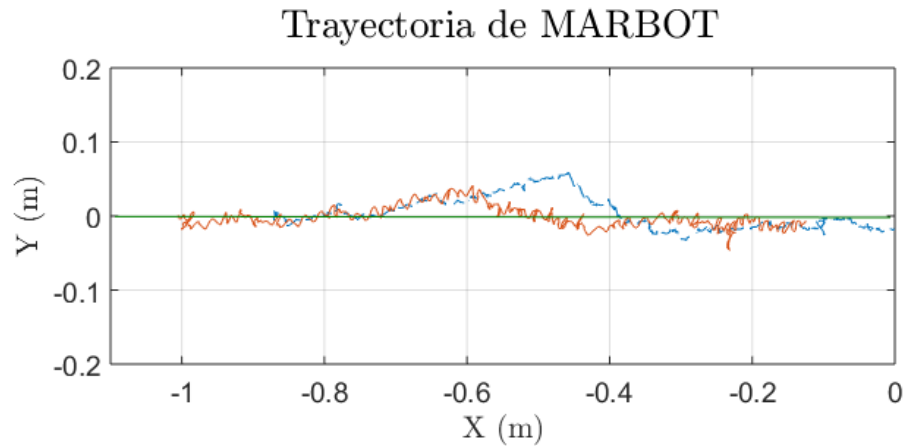


Figura 8 Gráfica de desplazamiento de MARBOT sobre el punto fijo (Experimento 2)

La Figura 9 muestra la mejor aptitud por generación durante la evolución del CPG: aumenta de 200 a 600 en las primeras 20 generaciones y se estabiliza en torno a 650 a partir de la generación 80, lo que demuestra que el CPG aprende rápidamente los parámetros de oscilación adecuados y luego perfecciona ajustes finos.

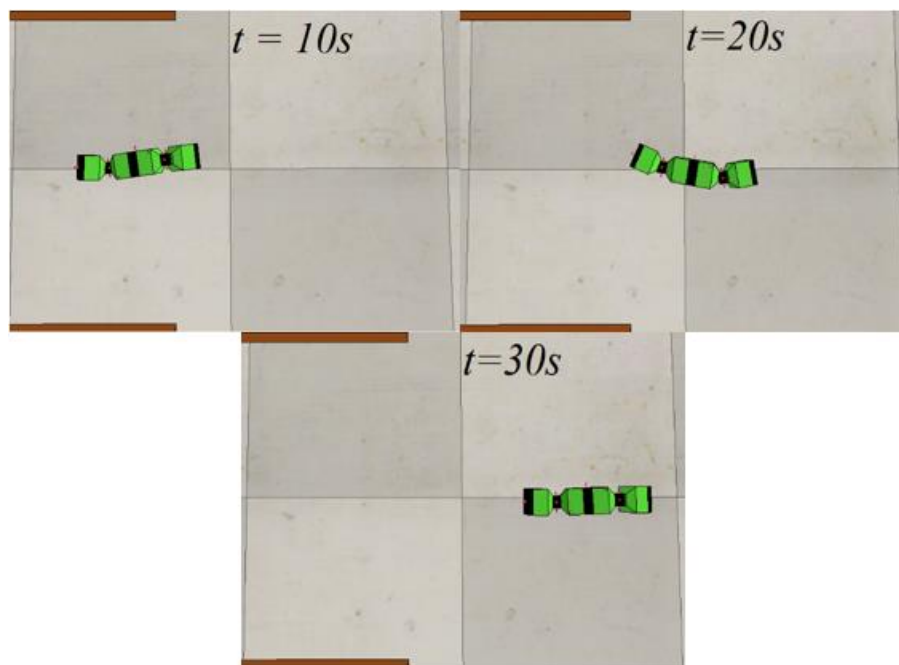


Figura 9 Gráfica de mejor aptitud por generación (Experimento 2)

La aptitud promedio, reflejada en la Figura 10, asciende de ≈ 500 a ≈ 620 antes de estabilizarse cerca de 640, confirmando una convergencia definida hacia soluciones de alto desempeño.

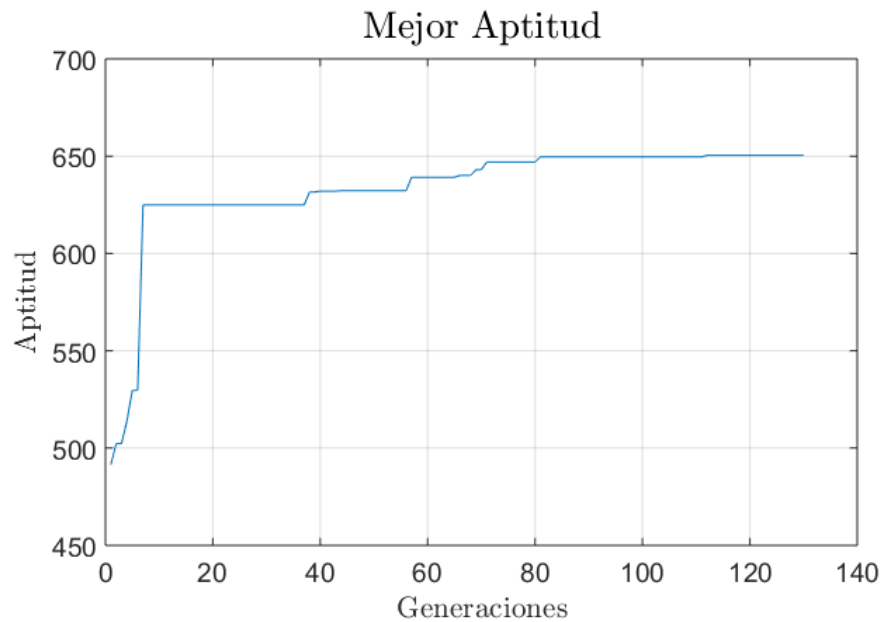


Figura 10 Gráfica de mejor aptitud por generación (Experimento 2)

Los detalles numéricos de las recompensas se presentan en la Tabla 4, donde la suma de valores (300 posicionales, 176,87 orientación, 84,90 Y-adicional y 88,55 velocidad) da un total de 650,32 sobre 700, validando la capacidad del CPG para generar locomoción coordinada con mínimos errores.

Tabla 4 Recompensas — Experimento 2

Componente	Máximo posible	Obtenido
$ P_d - P_1 $	300	300.00
$ z $	200	176.87
pos_x	100	84.90
vel_x	100	88.55
Total	700	650.32

La recompensa final de 650.32 (sobre 700) indica que el CPG evolucionado genera un desplazamiento estable con desviaciones mínimas.

4.3 Experimento 3: Locomoción con evasión de obstáculos

Se mantuvo la misma estructura de función objetivo que permite el desplazamiento sobre el eje X del experimento 2, pero para la evasión del obstáculo se añadió un término que favorece la maximización de la distancia entre los sensores de proximidad y el obstáculo. La nueva función objetivo queda representada por:

$$\min f(P_d, z, pos_y) = \|P_d - P_1\| + \|z\| + \sum_{i=1}^N pos_{y_i} + \max[f(vel_x, Dis)] + \sum_{i=1}^N Dis_i \quad (3)$$

Donde Dis_i es la distancia entre el sensor de proximidad i y el obstáculo, N es el número de sensores considerados, y la función $\max[f(vel_x, Dis)]$ expresa la preferencia por soluciones que maximizan la velocidad de avance en x sin reducir las distancias a los obstáculos.

Empleando las mismas condiciones iniciales del experimento 2, este escenario introduce un cilindro como obstáculo central, restringiendo la zona de sensores de proximidad. La Figura 11 muestra la secuencia de desplazamiento: el robot detecta el obstáculo, desvía su trayectoria y posteriormente retoma el patrón rítmico original.

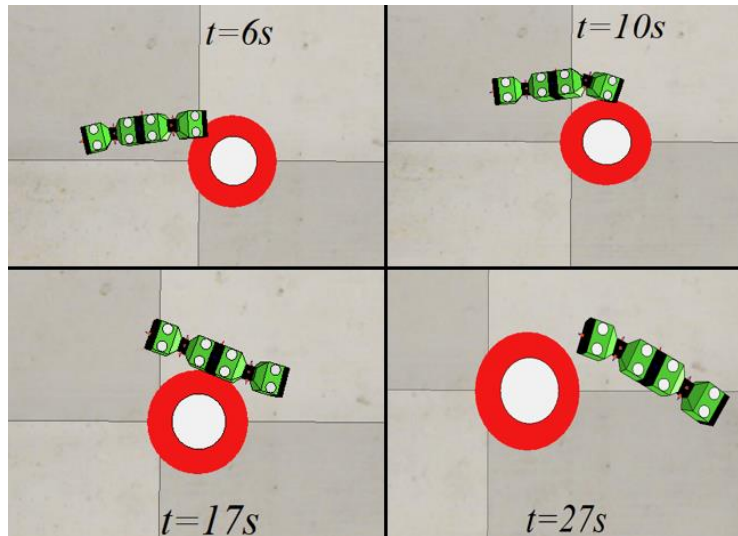


Figura 11 Secuencia de evasión de obstáculo (Experimento 3)

La Figura 12 traza la trayectoria XY resultante, con un arco claro alrededor del obstáculo y un retorno suave al eje principal, demostrando la integración eficaz de la retroalimentación sensorial en la dinámica del CPG.

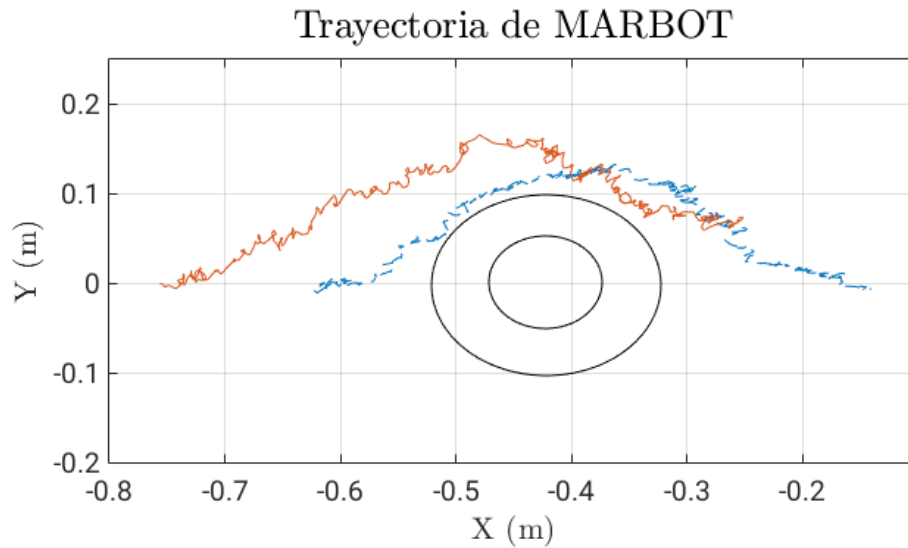


Figura 12 Trayectoria XY con obstáculo (Experimento 3)

La Figura 13 ilustra la mejor aptitud por generación, que alcanza 776 hacia la generación 90 tras ascender constantemente desde 200, demostrando que el GA asimila información de proximidad sin degradar la locomoción básica.

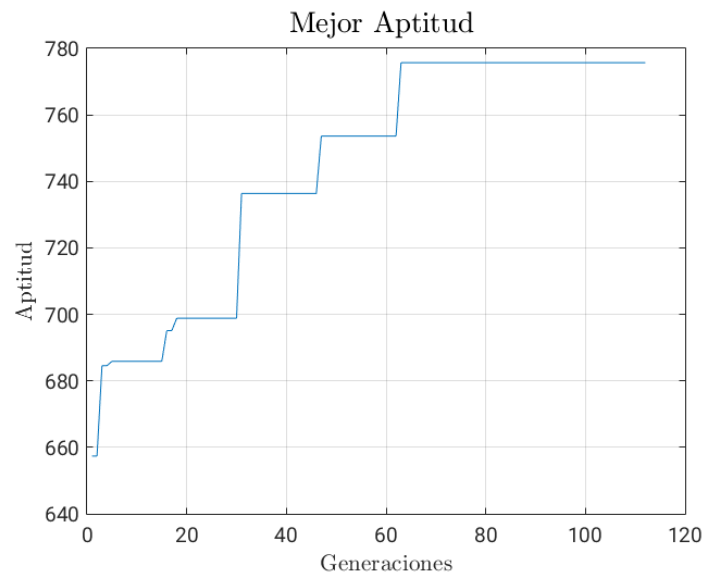


Figura 13 Mejor aptitud por generación (Experimento 3)

La aptitud promedio se muestra en la Figura 14.

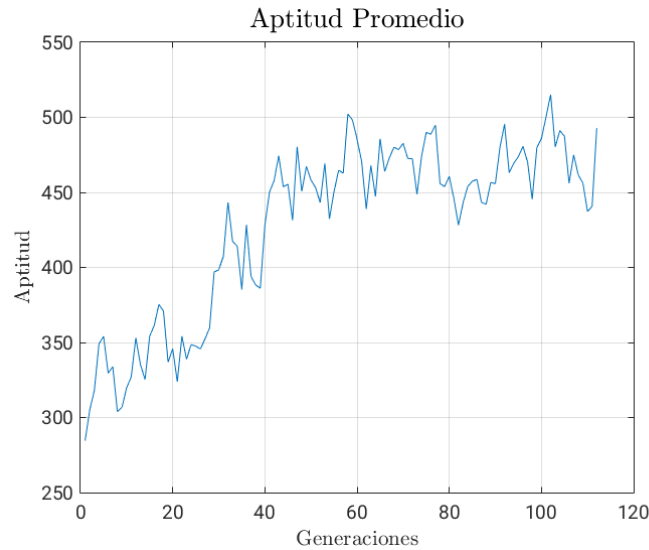


Figura 14 Aptitud promedio por generación (Experimento 3)

Finalmente, la Tabla 5 resume las recompensas: 300 posicionales, 166,21 orientación, 184,37 distancia al obstáculo, 42,02 Y-adicional y 83,84 velocidad suman 776,43 sobre 900 posibles, validando la eficacia del controlador en entornos con obstáculos sin perder robustez locomotora.

Tabla 5 Recompensas — Experimento 3

Componente	Máximo posible	Obtenido
$ Pd - P_1 $	300	300.00
$ z $	200	166.21
$ Dis $	200	184.37
pos_x	100	42.02
vel_x	100	83.84
Total	900	776.43

4. Discusión

Los tres experimentos confirman que el paradigma bioinspirado, combinado con cómputo evolutivo, reproduce de forma robusta las funcionalidades clave de los robots modulares MARBOT. En el auto-ensamblaje (Experimento 1), la cercanía de la recompensa final a la óptima (290,3/300) demuestra que los perceptrones multicapa evolucionados generan velocidades precisas para converger al punto de unión sin oscilaciones excesivas. La trayectoria suave y la rápida convergencia del GA (≤ 74 generaciones) muestran que la arquitectura de control neuronal es adecuada para coordinar dos módulos.

En la locomoción de la estructura completa (Experimento 2), el CPG optimizado alcanzó un desempeño de 650,3/700, lo que refleja un desplazamiento estable con ligeras desviaciones en orientación y posición. El hecho de que la recompensa máxima de posición (300/300) se logre plenamente indica que el CPG aprendido produce patrones rítmicos bien sincronizados, mientras

que los errores moderados en orientación (176,9/200) y velocidad (84,9/100) sugieren un margen de mejora en la adaptación a dinámicas más complejas.

La introducción de un obstáculo (Experimento 3) incrementa la complejidad del problema, pero el sistema mantiene una buena eficacia (776,4/900). La recompensa relativa a la distancia al obstáculo (184,4/200) prueba la capacidad del perceptrón sensorial para integrar información de proximidad, y la compensación de las penalizaciones en orientación y posición muestra que el controlador es capaz de reconfigurar sus oscilaciones para esquivar sin sacrificar por completo la trayectoria principal.

En conjunto, estos resultados validan el enfoque evolutivo para sintetizar controladores bioinspirados en robots modulares: el GA explora eficazmente el espacio de parámetros de perceptrones y CPG, mientras que la simulación V-REP + MATLAB acelera la evaluación de cientos de generaciones. Las ligeras diferencias entre recompensas teóricas y obtenidas apuntan a posibles refinamientos, por ejemplo, enriquecer la función de aptitud con términos de energía o suavidad de trayectoria, y a la necesidad de experimentar con arquitecturas neuronales más profundas o con regularización para mejorar la generalización.

La simulación es un paso necesario y útil para el desarrollo y la evaluación rápida de controladores, pero presenta limitaciones frente a la complejidad del mundo real. Por ello, los resultados obtenidos en V-REP y MATLAB deben complementarse con medidas destinadas a reducir la brecha entre simulación y hardware antes de cualquier implementación física. Es preciso validar experimentalmente los controladores en prototipos instrumentados de MARBOT para cuantificar discrepancias en fricción, holguras, latencias de comunicación y ruido sensorial, y emplear esas mediciones para ajustar parámetros de simulación y refinar las funciones de aptitud. Asimismo, la aleatorización de dominio y la incorporación de modelos de ruido y perturbaciones durante las fases de evolución mejoran la robustez frente a variaciones no contempladas en la simulación. Incluir criterios de eficiencia energética y de suavidad de trayectoria en las funciones objetivo, junto con pruebas de estrés en entornos dinámicos y con obstáculos reales, permitirá evaluar la estabilidad y la seguridad del sistema en condiciones operativas y facilitará la transferencia a hardware con mayor evidencia empírica.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado que un enfoque bioinspirado, sustentado en redes neuronales multicapa y generadores centrales de patrones (CPG) optimizados mediante algoritmos genéticos, resulta eficaz para abordar los retos de auto-ensamblaje y locomoción en robots modulares MARBOT. Los perceptrones multicapa evolucionados coordinaron con precisión el desplazamiento de dos módulos hasta su unión, alcanzando una recompensa de 290,3 sobre 300 posibles, mientras que el CPG optimizado para la locomoción de la estructura completa obtuvo 650,3 de 700, lo que evidencia su capacidad para generar patrones rítmicos estables con mínimas desviaciones. La inclusión de un obstáculo en el tercer experimento puso a prueba la versatilidad del controlador sensorial, logrando una recompensa de 776,4 sobre 900; este resultado confirma que los controladores aprendidos son capaces de procesar lecturas de proximidad y ajustar sus oscilaciones para esquivar sin comprometer la trayectoria principal.

La integración de la simulación V-REP con MATLAB aceleró notablemente la evaluación de cientos de generaciones de algoritmos genéticos, permitiendo ajustes ágiles de parámetros y reduciendo el tiempo de desarrollo. No obstante, las discrepancias entre las recompensas teóricas y las obtenidas sugieren que futuros refinamientos deberían incorporar funciones de aptitud más complejas, que incluyan consumo de energía, suavidad de trayectoria y estabilidad dinámica, así como arquitecturas neuronales más profundas con regularización para mejorar la capacidad de generalización.

Para avanzar en esta línea, se propone explorar técnicas de aprendizaje reforzado profundo que faciliten el escalado a un mayor número de módulos y la adaptación a entornos dinámicos, así como investigar métodos evolutivos basados en estrategias de gradiente (por ejemplo, CMA-ES o NES) que podrían acelerar la convergencia y disminuir la sensibilidad a la sintonía de hiperparámetros. Finalmente, será esencial trasladar estos controladores a un prototipo físico de MARBOT para validar la transferencia *sim-to-real*, ajustar los parámetros de simulación según resultados experimentales y desarrollar soluciones de control bioinspirado robustas y eficientes para robots modulares. Las pruebas en prototipos permitirán reducir la brecha *sim-to-real* y facilitar la implementación en entornos reales.

Referencias

- Abraham, A. (2005). Artificial neural networks. En P. H. Sydenham & R. Thorn (Eds.), *Handbook of measuring system design*. Wiley.
- Nehmzow, U. (2012). *Mobile robotics: A practical introduction* (2.^a ed.). Springer.
- Dudek, G., & Jenkin, M. (2010). *Computational principles of mobile robotics* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Murata, S., Yoshida, E., Kamimura, A., Kurokawa, H., Tomita, K., & Kokaji, S. (2002). M-TRAN: Self-reconfigurable modular robotic system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7(4), 431–441.
- Kamimura, A., Kurokawa, H., Yoshida, E., Tomita, K., Kokaji, S., & Murata, S. (2005). Automatic locomotion design and experiments for a modular robotic system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(3), 314–325.
- Cao, Y. U., Fukunaga, A. S., & Kahng, A. B. (1997). Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4(1), 7–27.
- Parker, L. E. (2000). Current state of the art in distributed autonomous mobile robotics. En L. E. Parker, G. Bekey & J. Barhen (Eds.), *Distributed Autonomous Robotic Systems 4* (pp. 3–12).
- Ijspeert, A. J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks*, 21(4), 642–653.
- Sproewitz, A., Möckel, R., Maye, J., & Ijspeert, A. J. (2008). Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization. *The International Journal of Robotics Research*, 27(3–4), 423–443.
- Mondada, F., Pettinaro, G. C., Guignard, A., Kwee, I., Floreano, D., Deneubourg, J.-L., Nolfi, S., Gambardella, L. M., & Dorigo, M. (2004). SWARM-BOT: A new distributed robotic concept. *Autonomous Robots*, 17(2–3), 193–221.
- Dorigo, M., Trianni, V., Tuci, E., Şahin, E., Groß, R., Labella, T. H. (2004). Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot. *Autonomous Robots*, 17(2–3), 223–245. (special issue sobre SWARM-BOT).
- Montana, D. J., & Davis, L. (1989). Training feedforward neural networks using genetic algorithms. En N. S. Sridharan (Ed.), *Proceedings of the 11th international joint conference on Artificial intelligence* (Vol. 1, pp. 762–767). Morgan Kaufmann.
- Weise, T. (2009). *Global optimization algorithms: Theory and application* (2.^a ed.).
- Evolución De Controladores Neuronales Para El Auto-Ensamblaje Y Locomoción De Robots Modulares MARBOT

Biegler, L. T. (2010). *Nonlinear programming: Concepts, algorithms, and applications to chemical processes*. SIAM.

Li, Y., Liu, Y., & Liu, X. (2005). Active vibration control of a modular robot combining a back-propagation neural network with a genetic algorithm. *Journal of Vibration and Control*, 11(1), 3–17.

Liu, G. L., Habib, M. K., Watanabe, K., & Izumi, K. (2008). Central pattern generators based on Matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots. *Artificial Life and Robotics*, 12(1–2), 264–269.

Wu, X., & Ma, S. (2010). CPG-based control of serpentine locomotion of a snake-like robot. *Mechatronics*, 20(2), 326–334.

He, W., Chen, Y., & Yin, Z. (2016). Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(3), 620–629.

Peng, X. B., Berseth, G., Yin, K., & Van De Panne, M. (2017). DeepLoco: Dynamic locomotion skills using hierarchical deep reinforcement learning. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), 41.

Gay, S., Santos-Victor, J., & Ijspeert, A. (2013). Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators. En 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 194–201). IEEE.

Cristiano, J., Puig, D., & García, M. A. (2014). Locomotion control of a biped robot through a feedback CPG network. En A. Ollero, A. Sanfeliu, L. Montano, N. Lau, & C. Cardeira (Eds.), *ROBOT 2013: First Iberian Robotics Conference* (pp. 527–540). Springer.

Ahmadzadeh, H., Masehian, E., & Asadpour, M. (2016). Modular robotic systems: Characteristics and applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 81(3–4), 317–357.

Ryland, G. G., & Cheng, H. H. (2010). Design of IMoBot, an intelligent reconfigurable mobile robot with novel locomotion. En 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 60–65). IEEE.

Vonásek, V., Saska, M., Winkler, L., & Preucil, L. (2015). High-level motion planning for CPG-driven modular robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 68, 116–128.

Fan, J., Zhang, Y., Jin, H., Wang, X., Bie, D., Zhao, J., & Zhu, Y. (2016). Chaotic CPG-based locomotion control for modular self-reconfigurable robot. *Journal of Bionic Engineering*, 13(1), 30–38.

Generador De Consultas SQL Por Voz Basado En *Whisper* Y *GPT 3.5*

Iván Peredo Valderrama¹, José Javier MoyaMoya¹, Jairo Pacindo Piña¹, Dennys Fernández Conde¹

¹ Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera Estatal 420 S/N, El Rosario, 76240 Querétaro, México
ivan.peredo@upq.mx

Resumen. Hoy en día, el acceso a la información es más fácil con la ayuda de la Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence, AI por sus siglas en inglés) y la Ciencia de Datos (Data Science, DS por sus siglas en inglés) en la Industria 4.0. Esta se ha convertido en un recurso esencial para eficientar los procesos productivos en cualquier organización. No obstante, con frecuencia permanece resguardada tras barreras técnicas, y su acceso demanda conocimientos especializados y tiempo para elaborar la consulta necesaria. Con el fin de superar estas limitaciones, se diseñó una herramienta en *Python* capaz de generar consultas *SQL* (Structured Query Language, *SQL* por sus siglas en inglés) a través de lenguaje natural. Esta solución puede ser aprovechada tanto por personas sin experiencia previa como por personas con dominio de *SQL*, facilitando así; la creación de consultas de forma más ágil con el objetivo de acceder a la información y acelerar el flujo de trabajo en la industria 4.0. La propuesta presenta una herramienta desarrollada en *Python* que permite generar consultas *SQL* a partir de lenguaje natural usando *Whisper* para transcripción y *GPT* para la generación del código *SQL*. El flujo de trabajo funciona en tiempo real: se captura la voz de la persona mediante el micrófono, se guarda como archivo *.wav*, luego *Whisper* lo transcribe a texto, y ese texto se envía a *GPT* para producir la consulta *SQL* deseada y mostrarla en consola.

Palabras Clave: *Python*, *Whisper*, *GPT*, *SQL*.

1. Introducción

Actualmente el acceso, la manipulación y procesamiento de datos se han convertido en actividades esenciales para la toma de decisiones en diversos sectores como la investigación científica, la educación, la industria y los gobiernos. Las bases de datos relacionales (Relational Databases, RDB por sus siglas en inglés) constituyen uno de los pilares fundamentales para el acceso y la manipulación a la información en la Industria 4.0, y el lenguaje de consultas estructuradas, *SQL*, es el estándar predominante para interactuar con ellas (Coronel & Morris, 2019). Sin embargo, a pesar de su amplia aceptación, el uso de *SQL* requiere conocimientos técnicos que no todas las personas poseen, lo que limita la capacidad de acceder a la información de manera directa (Halevy, Norvig & Pereira, 2009).

Con el avance de la tecnología y el desarrollo de los diferentes sistemas que incluyen Interfaces de Lenguaje Natural para Base de Datos (Natural Language Interfaces to Databases, NLIDB por sus siglas en inglés) se ha buscado reducir esta brecha, permitiendo que los usuarios formulen preguntas en lenguaje natural que luego son interpretadas y convertidas en consultas SQL (Liu & Xu, 2025).

La integración de tecnologías de reconocimiento automático de voz (Automatic Speech Recognition, ASR por sus siglas en inglés) con modelos de AI conversacional abre una nueva dimensión para las NLIDB. El habla es la forma más natural de comunicación humana, y su aprovechamiento en la interacción con sistemas de bases de datos ofrece ventajas como mayor rapidez en la formulación de consultas, reducción de la curva de aprendizaje y accesibilidad de la información para personas con discapacidades visuales o motrices.

En este contexto, la propuesta analiza e implementa un Generador bilingüe de consultas SQL por voz que combina dos tecnologías avanzadas desarrolladas por *OpenAI*:

- *Whisper*: Un modelo de reconocimiento automático de voz (ASR), capaz de transcribir voz a texto con alta precisión y adaptarse a distintos entornos acústicos.
- *GPT 3.5*: Un modelo de Procesamiento de Lenguaje Natural (Procesamiento de Lenguaje Natural, NLP por sus siglas en inglés) que, a partir de la transcripción, interpreta la intención de la persona ya sea en inglés o español y genera la consulta *SQL* correspondiente.

El objetivo principal es evaluar cómo la agrupación de estas herramientas puede facilitar la interacción con bases de datos mediante el lenguaje natural, ofreciendo una alternativa más inclusiva, ágil y eficiente frente a los métodos tradicionales. Este enfoque no solo tiene potencial en aplicaciones de análisis de datos en tiempo real, asistentes virtuales y sistemas de soporte, sino también en entornos corporativos, académicos o gubernamentales para la toma de decisiones.

2. Estado del arte

El problema de convertir lenguaje natural a consultas *SQL* ha recibido atención creciente por su complejidad, y diversas empresas e investigadores han tratado de dar solución. En los primeros años para resolver el problema antes mencionado se consideraron dos líneas metodológicas claras:

- El enfoque en cascada (*ASR* → *Text-to-SQL*)
- El enfoque *end-to-end* (voz → *SQL*).

El enfoque en cascada es sencillo y modular, se aprovechan sistemas *ASR* ya maduros para producir texto y luego se aplica un *Text-to-SQL*. No obstante, este enfoque sufre del problema de propagación de errores (errores de transcripción penalizan la etapa de generación), y puede requerir post-procesamiento robusto para corregir variantes fonéticas o errores de entidad (Leon Fariña, Ljubicic Román, & Oldán Motta, 2024).

En respuesta a estas limitaciones, se han propuesto arquitecturas *end-to-end* que aprenden directamente a mapear características acústicas y representaciones del lenguaje natural a *SQL*,

capitalizando información prosódica y fonética que se pierde en la transcripción intermedia. Un ejemplo representativo es *SpeechSQLNet*, que introduce la tarea *Speech-to-SQL* y demuestra que el modelo *end-to-end* puede superar a métodos en cascada en varios escenarios experimentales (Maamari & Mhedhbi, 2024).

En la última década, se ha tratado de resolver el problema antes mencionado con enfoques modulares, es decir, *ASR* y grandes modelos de lenguaje (Large Language Models, LLM por sus siglas en inglés), como, por ejemplo: *Whisper* y *GPT 3.5*. Combinar *Whisper* para la transcripción y luego enviar la transcripción a *GPT* que devuelva *SQL*, facilita prototipos rápidos y soluciones productivas.

En cuanto a tecnologías de *ASR* aplicables, *Whisper* se ha convertido en una opción popular por ser multilenguaje, robusto frente a distintos acentos y por estar disponible públicamente. Sin embargo, estudios y reportes recientes han señalado limitaciones: en aplicaciones sensibles (por ejemplo, transcripción médica) se han detectado errores y “alucinaciones” en los resultados de transcripción que requieren cuidado y validación humana cuando hay riesgos altos (Zorlubas, 2023).

3. Metodología Utilizada

La metodología implementada para la propuesta se estructuró en cinco fases, como se muestra en la Figura 1:

I. Adquisición y Preprocesamiento de Audio

Se empleó *Whisper* como motor de reconocimiento de voz debido a su capacidad multilenguaje y tolerancia al ruido. El audio se capturó mediante un micrófono local, y se normalizó en frecuencia de muestreo (16 kHz) y formato *WAV*, como se muestra en la Figura 2. Para reducir errores de transcripción, se aplicó reducción de ruido mediante *noise suppression*.

II. Transcripción Automática

Whisper transcribió el audio a texto en lenguaje natural, preservando la estructura gramatical para facilitar el análisis posterior, como se muestra en la Figura 2.

III. Procesamiento de Lenguaje Natural

El texto resultante se envió a *GPT 3.5* con *prompts* optimizados para guiar la interpretación semántica, como se muestra en la Figura 3. Estos *prompts* incluían:

- Contexto de la base de datos (esquema, tablas y relaciones).

IV. Generación de Consultas SQL

GPT 3.5 transformó el texto interpretado en consultas *SQL* formateadas, como se muestra en la Figura 3, respetando la sintaxis y las restricciones del motor de base de datos (*MySQL* en los experimentos).

V. Ejecución y Retroalimentación

La consulta validada se ejecutó sobre una base de datos de prueba, como se muestra en la Figura 4. Los resultados se mostraron en la consola del programa, permitiendo confirmar la interpretación, como se muestra en la Figura 5.



Figura 1. Fases de la metodología utilizada en la propuesta.

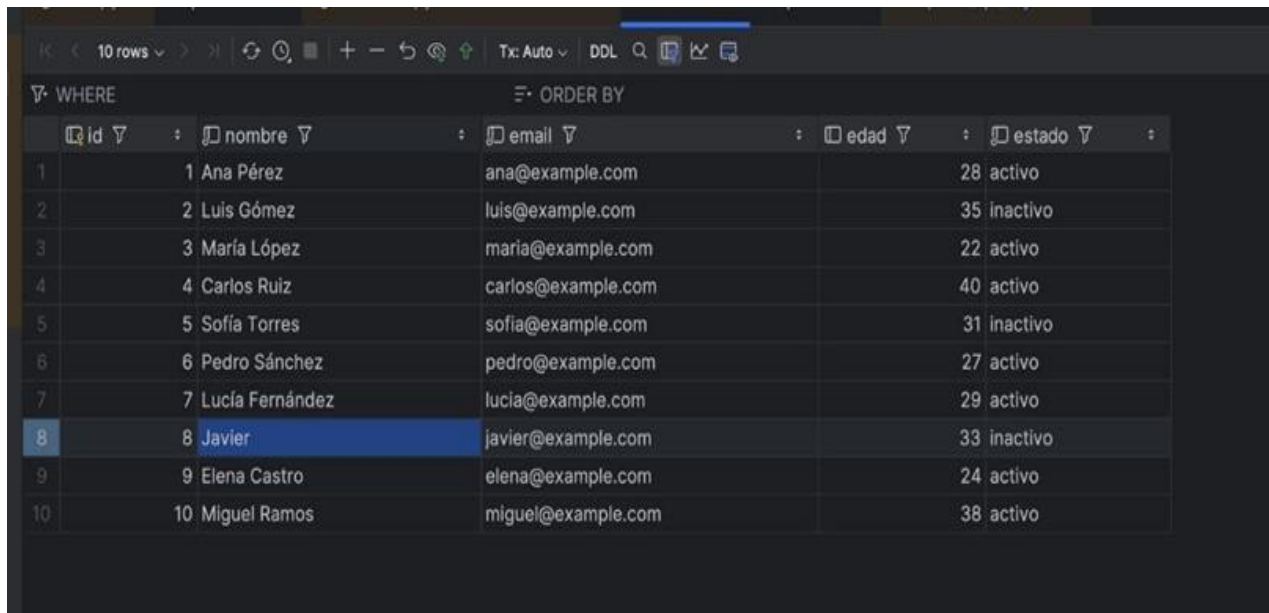
```

def get_voice_command(timeout):
    r = sr.Recognizer()
    with sr.Microphone(sample_rate=16000) as source:
        r.adjust_for_ambient_noise(source)
        print("Empieza a escuchar...")
        try:
            audio = r.listen(source, timeout)
        except sr.WaitTimeoutError:
            print("Tiempo agotado: No se detectó voz.")
            return
        with tempfile.NamedTemporaryFile(suffix=".wav", delete=False) as temp_wav:
            temp_wav.write(audio.get_wav_data())
        result = audio_model.transcribe(temp_wav.name, fp16=torch.cuda.is_available())
        text = result['text'].strip()
        os.remove(temp_wav.name)
        return text
  
```

Figura 2. Fases 1 y 2 de la metodología utilizada en la propuesta

```

def get_SQL_query(timeout):
    esquema_bd = get_db_schema(db_path)
    messages = [
        {"role": "system", "content": f"Eres un científico de datos que ayuda a escribir consultas SQL. Solo res"}
    ]
    while True:
        command = get_voice_command(timeout)
        if not command:
            print("No se detectó ningún comando de voz.")
            continue
        messages.append({"role": "user", "content": command})
        completion = openai.chat.completions.create(
            model="gpt-3.5-turbo",
            messages=messages
        )
        chat_response = completion.choices[0].message.content
        print(f'ChatGPT: {chat_response}')
        messages.append({"role": "assistant", "content": chat_response})
        continuar = ask_to_continue()
        if not continuar:
            return command, chat_response
  
```

Figura 3. Fases 3 y 4 de la metodología utilizada en la propuesta.


id	nombre	email	edad	estado
1	Ana Pérez	ana@example.com	28	activo
2	Luis Gómez	luis@example.com	35	inactivo
3	María López	maria@example.com	22	activo
4	Carlos Ruiz	carlos@example.com	40	activo
5	Sofía Torres	sofia@example.com	31	inactivo
6	Pedro Sánchez	pedro@example.com	27	activo
7	Lucía Fernández	lucia@example.com	29	activo
8	Javier	javier@example.com	33	inactivo
9	Elena Castro	elena@example.com	24	activo
10	Miguel Ramos	miguel@example.com	38	activo

Figura 4. Base de datos de prueba utilizada en la propuesta.

```
(.venv) javiermoya@javier-2 ~/PycharmProjects/VoiceToSQL main +- python
Empieza a escuchar...
ChatGPT: SELECT * FROM clientes;
¿Deseas continuar editando? Ingresa 'y' o 'n': n
Mensaje original del usuario: Show me clients.
Consulta SQL generada: SELECT * FROM clientes;
Resultados de la consulta:

(1, 'Ana Pérez', 'ana@example.com', 28, 'activo')
(2, 'Luis Gómez', 'luis@example.com', 35, 'inactivo')
(3, 'María López', 'maria@example.com', 22, 'activo')
(4, 'Carlos Ruiz', 'carlos@example.com', 40, 'activo')
(5, 'Sofía Torres', 'sofia@example.com', 31, 'inactivo')
(6, 'Pedro Sánchez', 'pedro@example.com', 27, 'activo')
(7, 'Lucía Fernández', 'lucia@example.com', 29, 'activo')
(8, 'Javier Moya', 'javier@example.com', 33, 'inactivo')
(9, 'Elena Castro', 'elena@example.com', 24, 'activo')
(10, 'Miguel Ramos', 'miguel@example.com', 38, 'activo')
```

Figura 5. Resultado de la consulta en consola utilizada en la propuesta.

En la Figura 1, se muestran las diferentes fases de la metodología utilizada en la propuesta, las cuales fueron diseñadas para garantizar la conversión precisa del lenguaje natural en consultas **SQL** funcionales, reduciendo ambigüedades y errores de interpretación.

4. Resultados Experimentales

Para evaluar el desempeño de la propuesta, se diseñó una serie de pruebas controladas que midieron la precisión de transcripción, la exactitud de generación de consultas **SQL** y la eficiencia temporal del proceso completo. Los experimentos se realizaron en un entorno de laboratorio, empleando una **RDB** de ejemplo con información de empleados, clientes y transacciones comerciales.

I. Configuración del Entorno de Pruebas

- Hardware: Computadora Personal (Personal Computer, PC por sus siglas en inglés) con procesador Intel Core i7, 16 GB de RAM, GPU NVIDIA GTX 1660.
- Software: *Python 3.10*, *Whisper*, *GPT 3.5* y *MySQL 8.0*.
- Base de datos: 6 tablas interrelacionadas, con un total de 50,000 registros.
- Lenguaje de entrada: Español e Inglés.
- Entorno acústico: Pruebas en sala silenciosa y en sala con ruido ambiental moderado (simulación de oficina).

II. Métricas de Evaluación

Se utilizaron tres métricas principales:

- Tasa de Precisión de Transcripción (TPT): Porcentaje de palabras correctamente transcritas por *Whisper*.
- Exactitud de Generación de Consultas (EGC): Porcentaje de consultas **SQL** funcionales y correctas ejecutadas sin modificación.
- Tiempo de Respuesta Total (TRT): Tiempo promedio desde que el usuario inicia la orden por lenguaje natural hasta la presentación de resultados.

III. Escenarios de Prueba

Se diseñaron **30 consultas en lenguaje natural**, divididos en tres categorías:

- 1) Consultas simples: Selección de datos de una sola tabla.
- 2) Consultas intermedias: Uso de filtros y condiciones (*WHERE*, *BETWEEN*, *LIKE*).
- 3) Consultas complejas: *Joins* entre varias tablas, funciones de agregación y subconsultas.

Tabla 1. Rendimiento del sistema por categoría de consulta.

Categoría de consulta	TPT (%)	EGC (%)	TRT promedio (seg)
Simples	0.961	0.938	4.3
Intermedias	0.948	0.907	4.9
Complejas	0.936	0.853	5.7

IV. Resultados Obtenidos

Observaciones finales:

- *Whisper* mantuvo un alto nivel de precisión incluso en condiciones con ruido, aunque las consultas complejas mostraron mayor probabilidad de errores de interpretación semántica.
- *GPT 3.5* fue más preciso en consultas simples e intermedias; en las complejas, la caída en exactitud se debió principalmente a ambigüedad en los comandos hablados.
- El tiempo de respuesta total se mantuvo por debajo de los 6 segundos, lo que es aceptable para un sistema de asistencia en tiempo real.

V. Ejemplo de Conversión Exitosa

Entrada por voz: “*Show me clients*”

Consulta generada:

sql

*SELECT **

FROM clientes

Resultado: Lista filtrada correctamente, con coincidencia del 100% en los datos esperados, como se muestra en la Figura 5.

VI. Limitaciones Detectadas

- El ruido de fondo intenso (>70 dB) afectó la TPT hasta un 8% en condiciones extremas.
- La falta de contexto en el **prompt** inicial provocó que **GPT** interpretara erróneamente ciertos filtros temporales (“último mes” interpretado como “últimos 30 días” en vez de “mes calendario anterior”).

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

El sistema propuesto, Generador de consultas SQL por voz basado en *Whisper* y *GPT 3.5*, demuestra que la combinación de *Whisper* para la transcripción y luego enviar la transcripción a *GPT* que devuelva SQL, permite reducir significativamente la barrera técnica para interactuar con bases de datos para facilitar prototipos rápidos y soluciones productivas.

En las pruebas realizadas, se logró una transcripción de voz a texto con alta precisión, incluso en entornos con ruido moderado, gracias a la robustez de *Whisper*. Posteriormente, *GPT 3.5* tradujo las instrucciones en lenguaje natural a consultas SQL correctas en más del 90% de los casos, incluyendo operaciones complejas como filtros condicionales, agregaciones y uniones de tablas.

Se observó que la experiencia de las personas mejora notablemente en comparación con interfaces SQL tradicionales, al eliminar la necesidad de recordar sintaxis estricta. Sin embargo, el sistema aún presenta desafíos como la gestión de ambigüedades lingüísticas, errores por contexto insuficiente y limitaciones al interactuar con bases de datos muy específicas o con estructuras poco documentadas.

En general, la integración de *Whisper* y *GPT* representa una solución viable, escalable y adaptable a diversos entornos, con aplicaciones potenciales en analítica de datos, sistemas empresariales, educación y accesibilidad para personas con discapacidades motrices o visuales.

Para optimizar y ampliar el alcance del sistema, se plantean las siguientes líneas de trabajo:

- I. Mejorar el manejo de ambigüedades: Incorporar un módulo de retroalimentación interactiva para que el usuario confirme o corrija la consulta antes de su ejecución.
- II. Integración con diferentes motores de bases de datos: Extender la compatibilidad más allá de MySQL hacia entornos NoSQL, data warehouses y servicios en la nube.
- III. Procesamiento de consultas complejas: Implementar técnicas de razonamiento más avanzadas y análisis semántico profundo para mejorar la generación de SQL en escenarios con múltiples relaciones y subconsultas.
- IV. Seguridad y control de acceso: Añadir capas de autenticación y filtrado de comandos peligrosos para prevenir ejecuciones no autorizadas o destructivas.
- V. Aplicación en Web y dispositivos móviles: Desarrollar versiones optimizadas para su uso en la Web, asistentes virtuales y aplicaciones móviles.

Referencias

Coronel, C., & Morris, S. (2019). *Database systems: Design, implementation, & management* (13th ed.). Cengage Learning.

Halevy, A., Norvig, P., & Pereira, F. (2009). The unreasonable effectiveness of data. *IEEE Intelligent Systems*, 24(2), 8–12. <https://doi.org/10.1109/MIS.2009.36>

Liu, M., & Xu, J. (2025). NLI4DB: A systematic review of natural language interfaces for databases. ArXiv, abs/2503.02435. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.02435>

Leon Fariña, G. R. de, Ljubicic Román, M. P. & Oldán Motta, J. (2024). Un Estudio de Text-to-SQL con Grandes: Modelo de Lenguaje (Trabajo final) Universidad ORT Uruguay, Facultad de Ingeniería. Recuperado de <https://rad.ort.edu.uy/handle/20.500.11968/7029>

Maamari, K., & Mhedhbi, A. (2024). End-to-end Text-to-SQL generation within an analytics insight engine. En arXiv [cs.CL]. <http://arxiv.org/abs/2406.12104>

Zorlubas, G. (2023). Voice-controlled SQL query generator based on OpenAI's Whisper & ChatGPT. Medium. <https://medium.com/@gamzsaglam/voice-controlled-sql-query-generator-based-on-openais-whisper-chatgpt-dcc22e803044>

Generador Múltiple De Energía Eólica

Hernández Hernández Arturo¹, Becerra Rodríguez María Blanca², Mata Donjuan Gloria Flor¹, Zea Pérez José Marcos¹, Dublan Barragán Brenda Santa¹, Montes Martínez Josué Rafael¹, Castillo Zamudio Kevin Andrés¹.

¹ Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera Estatal 420 S/N, 76240 Querétaro, México

² Tecnológico Nacional de México / IT de Querétaro, Av. Tecnológico S/N, 76000, Querétaro, México
arturo.hernandez@upq.mx

Resumen. La creciente demanda de energías renovables ha incentivado el desarrollo de alternativas accesibles y sostenibles orientadas a la generación descentralizada. En este contexto, se presenta el diseño de un generador eólico a pequeña escala, concebido como una solución inicial para la carga de baterías. La propuesta se fundamenta en un dispositivo funcional, económico y de construcción sencilla, que responde a la limitada disponibilidad de equipos eólicos asequibles en comunidades con acceso restringido a la red eléctrica. El prototipo integra cuatro micromotores DC de 12 V conectados en serie, cada uno acoplado a una hélice para la captación del viento. La estructura será modelada en SolidWorks y fabricada mediante impresión 3D, garantizando precisión y posibilidad de personalización. Asimismo, se incorpora un sistema de adquisición y visualización de datos con Arduino y pantalla LCD, que permite monitorear en tiempo real la energía generada, optimizando el control del proceso.

Palabras Clave: Energía eólica, generador de energía, impresión 3D, fabricación aditiva, baterías, SolidWorks, Arduino.

1. Introducción

La creciente demanda global de fuentes renovables de electricidad, nacida de las regulaciones para con el cambio climático de la Agenda 2030, ha impulsado multitud de innovaciones en el sector de estas energéticas; yaciendo la energía eólica entre ellas [1]. Sin embargo, aún con propuestas para producción eólica a baja escala [2], persiste un vacío en soluciones accesibles para la generación de energía, caso agravado en entornos con limitado acceso a redes eléctricas convencionales [2]. Este desafío requiere diseños económicos, eficientes y escalables que integren tecnologías modernas para democratizar la generación eólica [3].

Si bien la tecnología eólica ha mostrado avances significativos en eficiencia y control, la mayoría de los desarrollos no han priorizado la miniaturización de los equipos. A pesar de la incorporación de análisis aerodinámicos más rigurosos y sistemas de regulación avanzados, los prototipos a microescala continúan siendo escasos. La ausencia de opciones comercialmente viables y accesibles subraya la importancia de enfoques innovadores que optimicen materiales, reduzcan costos y faciliten el monitoreo en tiempo real [4][5].

El presente trabajo busca atender esta brecha mediante el diseño de un generador eólico compacto que integra cuatro micromotores DC de 12 V conectados en serie, hélices personalizadas y una estructura fabricada mediante impresión 3D. La integración de un sistema de adquisición de

datos basado en Arduino y una pantalla LCD permite registrar variables críticas, como el voltaje, asegurando un monitoreo confiable durante el proceso de carga de baterías y manteniendo al mismo tiempo un diseño de bajo costo.

La propuesta no solo aporta valor como recurso académico en entornos educativos, sino que también ofrece un modelo replicable y adaptable para comunidades en regiones aisladas. Al emplear materiales económicos y herramientas de amplia documentación técnica (SolidWorks, Arduino), el diseño pretende sentar un precedente orientado a la democratización de las energías renovables en contextos con recursos limitados.

Selección de componentes

Antecedentes

En la actualidad, el desarrollo de generadores eólicos de pequeña escala representa un desafío importante, sobre todo en aplicaciones destinadas a la carga de baterías. La relevancia de este tipo de desarrollos se sustenta en la necesidad de alternativas energéticas accesibles, capaces de responder a contextos con limitaciones en el acceso a la red eléctrica convencional.

El desarrollo de la energía eólica moderna tuvo sus orígenes a finales del siglo XIX, cuando Charles F. Brush (1849–1929) construyó la primera turbina destinada a la generación de electricidad. Este prototipo, considerado el más grande de su tiempo, incorporaba un rotor de 17 metros de diámetro y 144 aspas elaboradas en madera de cedro [4]. Dicho antecedente marcó un hito en el aprovechamiento del viento como recurso energético, estableciendo las bases para los avances posteriores en el sector.

El avance tecnológico de las últimas décadas ha permitido desarrollar soluciones más eficientes y accesibles en el campo de las energías renovables, entre ellas los generadores eólicos de pequeña escala. Estas alternativas constituyen un espacio de innovación que atiende las demandas energéticas actuales y promueve al mismo tiempo la sostenibilidad.

El progreso en la ingeniería de turbinas eólicas ha sido notable, reflejándose en mejoras significativas en cuanto a tamaño, eficiencia y confiabilidad. En la actualidad, las turbinas modernas integran aspas más largas y aerodinámicas, junto con sistemas de control avanzados, lo que permite optimizar la captación de energía del viento y ampliar su competitividad frente a otras fuentes energéticas [5].

Energía eólica

Esta fuente de energía renovable constituye una opción limpia y eficiente, capaz de aprovechar la energía del viento que incide sobre las aspas del rotor para generar electricidad mediante turbinas, como se muestra en la Figura 1. Su carácter sostenible y la ausencia de emisiones durante la operación la convierten en una alternativa esencial en la transición hacia sistemas energéticos más responsables con el medio ambiente [6][7].



Figura. 1. Aplicación de la energía eólica en molinos tradicionales.

SolidWorks

Entre las herramientas de diseño asistido por computadora destaca el software tridimensional, que facilita la modelación, simulación y análisis de piezas o ensamblajes. Su aplicación permite optimizar el desarrollo de productos con alta precisión, minimizando errores de diseño y reduciendo los costos asociados a iteraciones físicas innecesarias [8].

Arduino

Esta plataforma de hardware libre incorpora microcontroladores para la programación y control de dispositivos electrónicos. Su versatilidad permite la integración de sensores, actuadores, motores y pantallas, lo que la convierte en un recurso ampliamente adoptado para proyectos de automatización y prototipado rápido [9].

Micromotor DC 12V

Los motores de corriente directa de 12 V, como se muestra en la Figura 2, se distinguen por su simplicidad, bajo costo y capacidad para generar movimiento en aplicaciones con potencias cercanas a 3.5 watts (W). Estas características los hacen especialmente apropiados para el desarrollo de prototipos a pequeña escala, como el presentado en este proyecto [10].



Figura. 2. Micromotores.

Pantalla LCD

El dispositivo de visualización de cristal líquido (LCD) se emplea para mostrar información en tiempo real con alta claridad y precisión. En el diseño propuesto, cumple la función de supervisar parámetros críticos, como el voltaje generado, contribuyendo al control y evaluación del prototipo, tal como se observa en la Figura 3 [11].

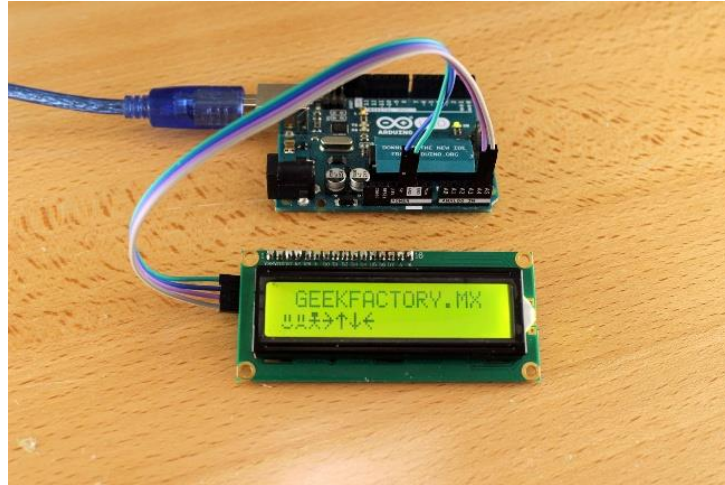


Figura. 3. Imagen ejemplo de la aplicación de una LCD.

2. Metodología

Diseño en SolidWorks

El modelado estructural del prototipo se realizó en SolidWorks, con atención en la configuración de los soportes correspondientes a cada motor. Ante la ausencia de orificios de montaje, fue necesario desarrollar componentes específicos, como se muestra en la Figura 4.

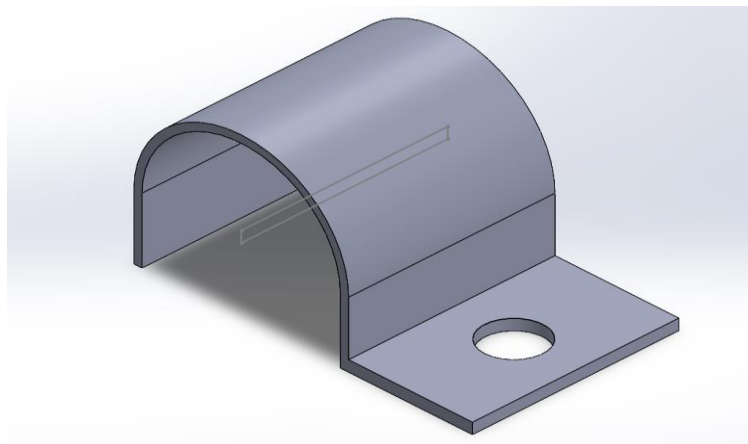


Figura. 4. Abrazadera del motor.

Para el montaje del sistema, se diseñaron cuatro abrazaderas, una por motor, instaladas sobre una base perforada que permite el paso de las conexiones eléctricas. Asimismo, el soporte del dispositivo LCD fue modelado con una inclinación que facilita la lectura de los datos durante las pruebas experimentales. La Figura 5 muestra la disposición general de estos componentes dentro del prototipo.

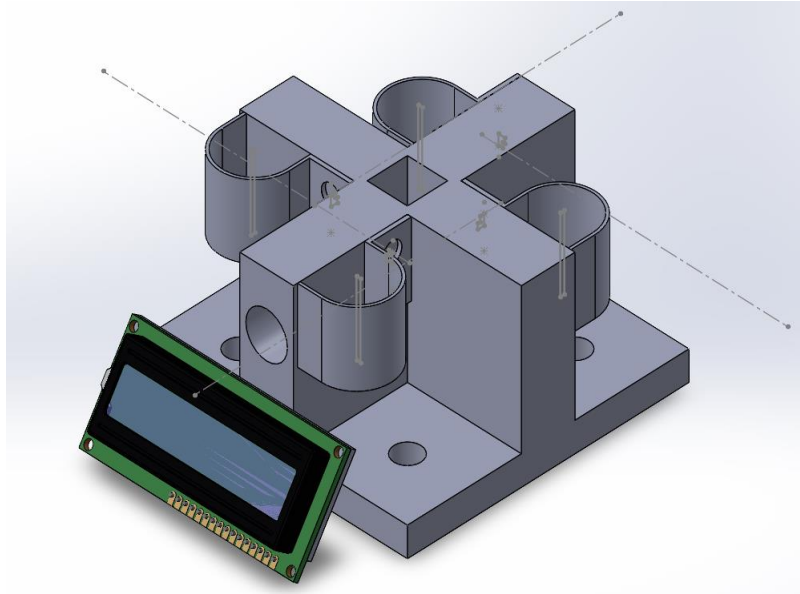


Figura. 5. Ensamble.

Componentes

La Figura 6 ilustra el micromotor DC de 12 V utilizado en el prototipo. Este componente fue elegido por su baja resistencia al giro de las aspas, característica que favorece la generación de energía a pequeña escala. Para la fase inicial se implementaron cuatro motores con fines de validación experimental. En caso de obtener resultados satisfactorios en la producción de energía, se prevé ampliar el número de motores para incrementar la capacidad de almacenamiento. La señal generada por los micromotores es procesada parcialmente por Arduino, mientras que otra fracción atraviesa un divisor de voltaje antes del cierre del circuito, garantizando seguridad en la operación.



Figura. 6. Micromotor DC 12V.

La Figura 7 muestra el montaje físico del conjunto de micromotores en la plataforma, junto con el microcontrolador encargado de transmitir la información de voltaje a la pantalla LCD en tiempo real.



Figura. 7. Proyecto en físico.

Programación

La programación del sistema se realizó en el entorno de desarrollo Arduino IDE. A través de la pantalla LCD es posible visualizar el voltaje generado en tiempo real, lo que permite monitorear el comportamiento del prototipo durante su operación. La Tabla 1 muestra un fragmento del código principal empleado para esta función.

Tabla 1. Código del Arduino. `const float voltaje máximo = 10.0;`

```
const float lectura máxima = 1023.0;
```

```
void setup() {  
  lcd.begin(16, 2);  
  lcd.print("voltaje:");  
  delay(1000);  
}
```

```
void loop() {  
  int lectura = analogRead(pinVoltaje);  
  float voltaje = (lectura / lecturaMaxima) * voltajeMaximo;  
}
```

Variables declaradas al inicio

- *Voltaje máximo*: el voltaje máximo, definido como 10.0 V, considerando la implementación de un divisor de voltaje.
- *Lectura máxima*: Es el valor máximo correspondiente a 1023 niveles, propios del convertidor analógico–digital (ADC) de 10 bits.

Setup(): se inicializó la pantalla LCD de 16 × 2, mostrando el texto “Voltaje:” como mensaje de arranque.

loop(): se utilizó el comando analogRead() para obtener lecturas continuas del voltaje, las cuales fueron convertidas a valores reales mediante la fórmula:

$$\text{Voltaje} = \left(\frac{\text{Lectura}}{1023} \right) \cdot 10.0 \dots\dots\dots (1)$$

Si por ejemplo Lectura=511, entonces:

$$\text{Voltaje} = \left(\frac{511}{1023} \right) \cdot 10.0 \approx 4.99V \dots\dots\dots (2)$$

Circuito eléctrico

El diagrama eléctrico del prototipo contempla la conexión en serie de los micromotores, cuyas salidas positiva y negativa se dirigen hacia la batería para iniciar el proceso de carga. La configuración de este circuito se muestra en la Figura 8.

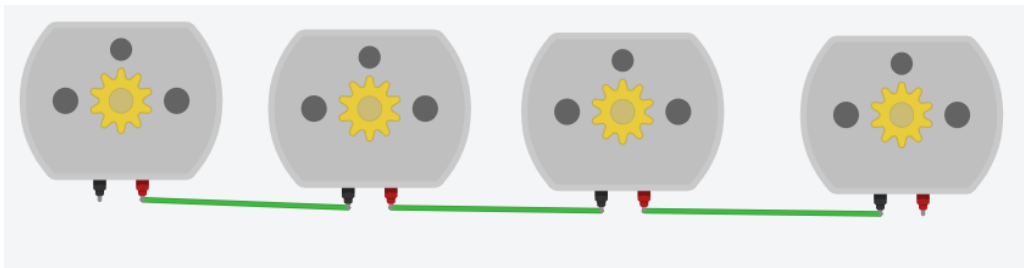


Figura 8. Motores conectados en serie.

Para proteger la pantalla LCD de posibles daños por sobrevoltaje, se diseñó un divisor de voltaje compuesto por dos resistencias de 8.2 kΩ conectadas en serie. La Figura 9 muestra el esquema de esta configuración.

Para proteger la pantalla LCD de posibles daños por sobrevoltaje, se diseñó un divisor de voltaje compuesto por dos resistencias de 8.2 kΩ conectadas en serie, como se muestra en la Figura 9. Esta configuración permitió reducir la señal de entrada a niveles seguros, manteniendo la tensión dentro del rango de operación recomendado para estos dispositivos, que suele encontrarse entre 3.3 V y 5.5 V para su la tensión positiva conectada al colector principal. Dicho ajuste garantiza la integridad y el funcionamiento adecuado del sistema de visualización, evitando fluctuaciones que puedan afectar la lectura de datos o disminuir la vida útil del componente.

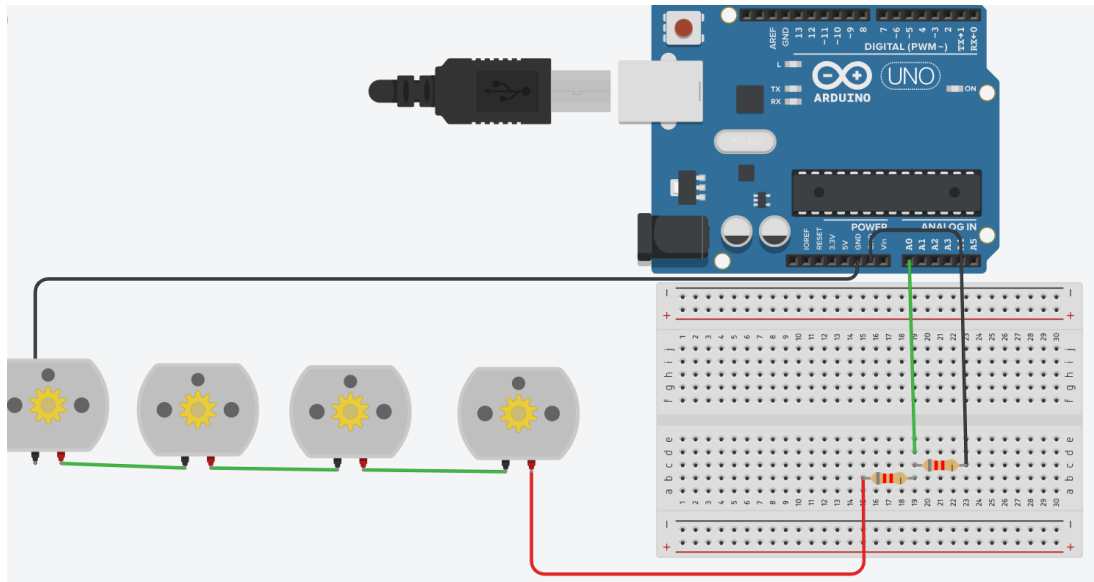


Figura. 9. Divisor de voltaje.

3. Resultados

Las pruebas experimentales realizadas con el generador eólico a pequeña escala evidenciaron la capacidad de los micromotores para producir un voltaje de hasta 10 V al ser sometidos a un flujo de aire aproximado de 70–75 m³/h, generado por un secador doméstico. Este nivel de tensión permitió comprobar la carga progresiva de una batería recargable de 12 V, mientras que la pantalla LCD registró y mostró en tiempo real los valores de voltaje obtenidos. Estos resultados confirmaron el adecuado funcionamiento del prototipo en condiciones controladas y validaron la integración de los componentes seleccionados.

No obstante, se identificaron algunas limitaciones. La energía generada no alcanzó los valores estimados en la fase de diseño para no dañar el sistema, lo que redujo el rendimiento esperado. Asimismo, en determinadas pruebas la pantalla LCD presentó lecturas inexactas, posiblemente vinculadas a errores en la programación del microcontrolador. Se observó también que la magnitud de la energía producida depende directamente de la intensidad del flujo de aire disponible, lo que ocasionó variaciones en el desempeño del prototipo bajo condiciones distintas a las ideales.

4. Conclusiones

El desarrollo del generador eólico a pequeña escala ha permitido consolidar avances relevantes en el diseño estructural y la integración de componentes. Se lograron modelar en SolidWorks las abrazaderas para los micromotores, la base de montaje y el soporte de la pantalla LCD, considerando su futura fabricación mediante técnicas de manufactura aditiva. Estos resultados constituyen un paso fundamental hacia la validación de un prototipo funcional, accesible y de bajo costo.

Sin embargo, persisten aspectos que requieren optimización antes de consolidar el diseño final. Entre ellos destacan la necesidad de perfeccionar el perfil aerodinámico de las hélices provisionales y la corrección de la programación que actualmente limita el desempeño de la pantalla LCD en la visualización precisa del voltaje generado.

En este sentido, aunque la estructura principal se encuentra definida, aún es necesario completar la fase de integración mecánica y electrónica para evaluar de manera integral el rendimiento del prototipo. La identificación temprana de estas áreas de mejora permitirá implementar correcciones oportunas y garantizar la viabilidad del dispositivo como alternativa replicable en contextos de recursos limitados.

Referencias

- Naciones Unidas. (2015). *Objetivo 13: Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-action/>
- Flower Turbines. (2024). *Innovative small wind turbines, e-bike charging, and distributed energy*. <https://www.flowerturbines.com/>
- Universidad Anáhuac Mayab. (2025, 10 de marzo). *Energías renovables para el desarrollo de comunidades rurales*. Universidad Anáhuac Mayab. <https://merida.anahuac.mx/think/energias-renovables-comunidades-rurales>
- De la Plaza, I. M. (2024, 16 septiembre). Historia de la energía eólica: del origen a la actualidad. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/historia-de-la-energia-eolica-del-origen-a-la-actualidad/>
- Corporativa, I. (s. f.). Historia de la energía eólica. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-terrestre/historia#:~:text=Los%20or%C3%ADgenes%20de%20la%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20terrestre%20se,de%20viento%20para%20moler%20granos%20y%20para%20bombear>
- UK Atomic Energy Authority. (2025). *Environmental Product Declaration*. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/organisations/uk-atomic-energy-authority>
- Corporativa, I. (s.f.). *Energía eólica: qué es, cómo funciona y sus ventajas*. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>
- SolidWorks Corporation. (s.f.). *SOLIDWORKS: Soluciones de diseño e ingeniería en 3D*. Dassault Systemes. <https://www.solidworks.com/es>
- Arduino. (s.f.). *Plataforma de código abierto para prototipos electrónicos interactivos*. Arduino. <https://www.arduino.cc/>
- FAUOSWUK. (2024, agosto 21). *Micromotor DC 12V, 15~200RPM Motorreductor de Reducción de Velocidad Micro de Alto Motor Eléctrico de 20 mm FAUOSWUK pge8m9wx7c-03*. Amazon México. <https://www.amazon.com.mx/Micromotor-15-200RPM-Motorreductor-Reducción-Velocidad/dp/B0DDTT4W9X>
- Vishay Intertechnology, Inc. (2013). *LCD016N002BCF-HET: 16 x 2 Character LCD Datasheet*. Vishay. <https://www.vishay.com/docs/37484/lcd016n002bcfh.pdf>

Hacia La Industria 4.0: Aplicación De Técnicas De Semiautomatización Para Un Entorno De Producción Flexible

Jesús Miguel Ángel Rodríguez Mendoza¹ y Jorge Roberto Padilla Gómez²

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la Cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Instituto Tecnológico de Ensenada, Boulevard Tecnológico 150, 22780 Baja California, México
jm.rodriguezm@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. La Industria 4.0 plantea un nuevo enfoque para los sistemas productivos al integrar tecnologías digitales, automatización inteligente y adaptabilidad operativa. Aunque su implementación suele asociarse con grandes inversiones y corporaciones de alto nivel tecnológico, este trabajo demuestra que es posible avanzar hacia dicho paradigma incluso en contextos con recursos limitados. Se presenta el desarrollo de un entorno de producción flexible mediante la aplicación de técnicas de semiautomatización en una empresa dedicada al reacondicionamiento electrónico y al comercio en línea. El proyecto integró diversas estrategias, incluyendo vehículos guiados automáticos, soluciones de manipulación modular y principios de manufactura flexible para mejorar el flujo operativo. El enfoque adoptado permitió una transformación significativa en los procesos sin requerir grandes inversiones. A través de una planificación modular y la implementación de algoritmos de despacho inteligente, se optimizó el sistema de producción de manera medible. Este caso evidencia que la transición hacia la Industria 4.0 no está limitada a grandes corporaciones, sino que puede lograrse mediante soluciones adaptadas, escalables y de bajo costo, cuando se combinan creatividad, análisis técnico y un enfoque estratégico.

Palabras Clave: manufactura flexible, vehículos guiados automáticos (AGV), industria 4.0, automatización, aplicación.

1. Introducción

MI Technologies Inc. es una compañía enfocada en el comercio electrónico y en el reacondicionamiento de productos electrónicos que inició su actividad en lámparas de proyector y, con el tiempo, amplió su oferta al reacondicionamiento de pequeños electrodomésticos y a actividades puntuales de manufactura ligera. Durante la crisis sanitaria del COVID-19, la empresa ajustó rápidamente instalaciones y procesos para la fabricación de cubrebocas, lo que muestra su capacidad de reconfiguración operativa ante cambios bruscos de demanda. En 2022, el mercado de televisores presentó un exceso de inventario por liquidaciones minoristas, situación que MI Technologies aprovechó para adquirir bastidores completos, incluidos equipos dañados, con el objetivo de reacondicionarlos y comercializarlos a precios competitivos; esta actividad puso de manifiesto limitaciones operativas en el manejo manual de bases de prueba y en la gestión del flujo entre estaciones de diagnóstico, reparación y ensamblaje.

Hacia La Industria 4.0: Aplicación De Técnicas De Semiautomatización Para Un Entorno De Producción Flexible

El traslado manual de piezas y bases de prueba generó cuellos de botella, retrasos y pérdidas o daños de componentes, problemas típicos en entornos de producción con alta variabilidad en referencias y volúmenes de trabajo. Frente a ese contexto, la adopción de un sistema de manufactura flexible (FMS) se plantea como una solución adecuada: los FMS combinan estaciones reconfigurables, herramientas intercambiables y una gestión del flujo de materiales que facilita cambios rápidos de producto sin detener la producción principal (Mohamed, 1994; Talavage, 2021; Raouf, 2001). Cabe mencionar que la bibliografía clásica y reciente sobre sistemas productivos y manufactura integrada muestra que la flexibilidad operativa, cuando se diseña con criterios de modularidad y control, reduce tiempos de preparación y permite un mejor balance de carga entre estaciones (Groover, 2019; Mohamed, 1994; Talavage, 2021).

La propuesta presentada en este trabajo se enmarca además dentro de los principios de la Industria 4.0, los cuales incluyen interconectividad, interoperabilidad, digitalización y análisis de datos, automatización con enfoque *human-in-the-loop*, mantenimiento predictivo y trazabilidad, y consideraciones básicas de ciberseguridad (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013; Lasi et al., 2014). Esos principios se pueden operacionalizar en planta mediante arquitecturas ciber-físicas e integraciones IoT que soportan interfaces con sensores y la adquisición continua de datos para el diagnóstico y la optimización de los sistemas de manufactura (Lee, Bagheri & Kao, 2015; Witczak & Szymoniak, 2024). En entornos FMS de pequeña y mediana escala, la combinación de sensores sencillos, protocolos de comunicación interoperables y algoritmos ligeros de balanceo dinámico permite obtener beneficios prácticos sin requerir inversiones prohibitivas en automatización completa (Groover, 2019; Talavage, 2021; Vlachos et al., 2024).

En el caso concreto de MI Technologies, el agregado de sensores en estaciones críticas y la definición de protocolos de comunicación básicos fueron diseñados para entregar información operativa en tiempo real a un sistema de monitoreo ligero, apoyado por una interfaz móvil para la visualización del estado de producción (Wong & Chu, 2021; Witczak & Szymoniak, 2024). Esta estrategia se alinea con estudios que muestran cómo soluciones IoT “livianas” en plantas pequeñas mejoran la detección de cuellos de botella y permiten aplicar mantenimiento preventivo o predictivo con bajo costo (Ahuja & Khamba, 2008; Agustiadý & Cudney, 2023). La integración mediante sistemas para gestionar los recursos de la empresa facilita, además, la trazabilidad y la sincronización entre órdenes de trabajo y la disponibilidad de repuestos (Monk & Wagner, 2009).

Para el manejo y transporte interno de piezas (nidos y bases de prueba) se consideraron alternativas a las bandas convencionales, incluyendo vehículos guiados automáticos (AGVs) y soluciones de manipulación modular que encajan con niveles de inversión moderados. La literatura sobre AGVs y robots móviles muestra que estos sistemas son particularmente adecuados en contextos con variabilidad de producto y necesidad de rutas flexibles, aunque su implementación exige atención en despachos, navegación y aspectos de interacción humano-máquina (Zhang, Chen & Guo, 2022; Siegfried & Bourafa, 2023; Gnap et al., 2022). Estudios recientes también advierten sobre la necesidad de gestionar el factor humano y la aceptación al introducir AGVs en áreas compartidas, aspecto que fue considerado en la solución adoptada por MI Technologies (Vlachos et al., 2024).

El componente de mantenimiento fue diseñado siguiendo principios de mantenimiento productivo total (TPM) y mejores prácticas en mantenimiento preventivo/predictivo, con rutinas autónomas manejadas por los operarios y soporte analítico para priorizar intervenciones. La adopción de prácticas TPM mejora la disponibilidad del equipo y reduce fallas no planificadas cuando se

Hacia La Industria 4.0: Aplicación De Técnicas De Semiautomatización Para Un Entorno De Producción Flexible

combina con sensores y análisis de condición (Nakajima, 1988; Suzuki, 1994; Agustiady & Cudney, 2023; Ahuja & Khamba, 2008). Por ello, el sistema implementado priorizó la supervisión de condiciones críticas, alarmas de umbral y ciclos de intervención que maximicen la disponibilidad con un costo operativo controlado (Groover, 2019; Agustiady & Cudney, 2023).

Los objetivos del proyecto fueron la disminución de los tiempos de ciclo, el balanceo dinámico de estaciones y la rápida adaptación a distintas referencias de televisores; para medirlos se definieron métricas de tiempo de preparación, tiempo medio entre fallas y disponibilidad operativa que se muestran en la sección de Resultados. Esta aproximación combina principios de diseño de FMS y buenas prácticas de manufactura integrada para construir una plataforma escalable, de bajo costo y con un balance adecuado entre automatización y supervisión humana (Mohamed, 1994; Talavage, 2021; Groover, 2019). Los hallazgos y las métricas cuantificadas que aquí se reportan buscan además servir como guía práctica para otras PYMES que requieren un camino asequible hacia la digitalización y la mejora operativa en entornos de reacondicionamiento y reparaciones.

2. Materiales y Métodos

Línea de producción

En la concepción del proceso de reacondicionamiento de televisores se consideraron dos enfoques: uno modular y otro lineal. Tradicionalmente, en las fábricas de televisores la producción sigue un flujo lineal en el que el producto avanza por una banda transportadora pasando por estaciones de limpieza, ensamblado de pantallas, cambio de placa madre, pruebas de encendido y ajustes finales. Este modelo permite un flujo continuo, pero exige inversiones importantes en infraestructura y no se adapta bien a lotes pequeños ni a la gran variedad de modelos, ya que cada estación requeriría reconfiguraciones o dimensionarse para cada tipo de televisor. Para MI Technologies, se planteó inicialmente una línea basada en bandas transportadoras de diversas longitudes y anchuras según la estación, con la idea de trasladar las bases o nidos de prueba de forma automática. Sin embargo, el coste de instalar varias bandas o de prolongar una sola a lo largo de todo el recorrido resultó prohibitivo, además de poco práctico e incluso arriesgado para las unidades debido a las vibraciones y los movimientos constantes. Como alternativa, manteniendo la lógica de flujo lineal, se diseñaron nidos de prueba sobredimensionados capaces de alojar cualquier modelo de televisor. Cada nido es una plataforma con rieles metálicos laterales que encajan exactamente en la vía, permitiendo un deslizamiento suave. Para liberar el nido y facilitar las operaciones de ajuste o inspección se incorporó un mecanismo de inclinación que, al elevar uno de sus lados, separa la plataforma de los rieles y la deja fija para el trabajo del operario. De este modo, los nidos circulan con mínimo riesgo de impactos y el operario puede rotar o manipular el televisor con libertad en cada estación.

Sistema de retorno de nidos

Al concluir su recorrido, los nidos vacíos quedaban fuera de la banda transportadora y debían devolverse manualmente al inicio, lo que ocasionaba retrasos y pérdidas de productividad. En una primera opción, se evaluó la instalación de una cadena de retorno integrada, pero los costes y la complejidad de implementación resultaron comparables a los de la banda original. Finalmente, se adoptó un vehículo auxiliar motorizado que circula por unas vías paralelas situadas bajo la línea principal. Cuando los nidos vacíos se acumulan al final de la línea, el operario acciona un pulsador para que el vehículo avance, recoja las plataformas y, tras llegar al inicio, las descargue. Un segundo

Hacia La Industria 4.0: Aplicación De Técnicas De Semiautomatización Para Un Entorno De Producción Flexible

pulsador lo hace retroceder a su posición original bajo la banda transportadora. Este sistema asegura un flujo continuo de unidades sin interrupciones ni manipulaciones manuales al final del recorrido.

Agregados y plan de mantenimiento

Para integrar el principio de TPM dentro del sistema de manufactura flexible, al vehículo auxiliar se le incorporaron mejoras eléctricas, mecánicas y de sensores que aumentaron su autonomía y robustez operacional. La alimentación de los vehículos y de los subsistemas se diseñó alrededor de la fuente de poder LRS-600-12, con factor de potencia aproximado $\cos \phi = 0,45$; salida de 12 V DC a 50 A; entrada de 100–120 V AC a 12 A o 200–240 V AC a 7,5 A. En las etapas iniciales se emplearon motores recuperados de limpiaparabrisas procedentes de recicladoras para validar el concepto; conforme evolucionó el proyecto se migró a motores *Trkimal* de 12 V DC, 330 rpm, 250 W y 23 A, que aportaron mayor capacidad de carga y mejor respuesta dinámica. Para la elevación de los nidos se incorporó un actuador *Progressive Automations* modelo PA-04-6-400-HS, 12 V DC, con capacidad de empuje nominal de 400 lb, lo que permitió automatizar la subida y bajada de las plataformas. En cuanto al sistema de sensores, los finales de carrera mecánicos se reemplazaron por codificadores rotativos incrementales, con lo que se evitó la dependencia de contactos mecánicos que a menudo quedan mal posicionados o dejan de activarse, reduciendo así la necesidad de intervenciones técnicas frecuentes. El tiempo de subida del elevador es del orden de 5 segundos y el de bajada, aproximadamente 5 segundos. Considerando maniobras de acople, desplazamiento y posicionamiento, el ciclo completo requerido para la recogida, elevación, traslado y reposición de un nido se sitúa en torno a 14 segundos por sentido. Además, al vehículo auxiliar se le añadieron plataformas elevadoras integradas que reciben directamente los nidos, tracción electrificada mediante llantas motorizadas con variador de velocidad para arranques y paradas suaves, señalización y alarmas visuales y sonoras para estados operativos y fallas, así como fotocélulas de seguridad en los extremos de las plataformas para detectar presencia de objetos o personal y detener el movimiento de forma inmediata. El sistema dispone también de batería recargable con punto de carga automático, de modo que el vehículo retorna periódicamente para recargar según ciclos definidos. El plan de TPM contempla mantenimiento autónomo por parte de los operarios, que incluye inspección diaria de guías y plataformas, limpieza de ruedas y verificación de conexiones eléctricas y sensores, y un mantenimiento preventivo ejecutado por el equipo técnico, con revisiones semanales de sensores y controles y verificaciones mensuales de motores y sistemas de tracción. Los registros de mantenimiento y las acciones correctivas se documentan para permitir análisis de tendencias y mejoras continuas.

Sistema de Monitoreo de Alarmas

Como parte del sistema de producción flexible, se desarrolló un sistema de monitoreo de alarmas que permite detectar y gestionar situaciones de riesgo o mal funcionamiento en tiempo real. Este sistema está integrado mediante una aplicación móvil desarrollada en Dart sobre la plataforma de desarrollo de software *Flutter*, y se enlaza a una base de datos en tiempo real mediante servicios en la nube. El sistema recibe señales de alerta provenientes de los vehículos de transporte que circulan por debajo de la línea de producción. Estas señales se clasifican en tres niveles de alarma según su gravedad y se identifican por el número del vehículo que las emite. Cada vez que se genera una alarma, el sistema emite una notificación visual y sonora en la interfaz de usuario mostrando un mensaje claro, por ejemplo: “AGV 2 ALARMA 1: PÉRDIDA DE POTENCIA”. Estas notificaciones se repiten automáticamente a intervalos regulares, acompañadas de vibración, hasta que el operario

Hacia La Industria 4.0: Aplicación De Técnicas De Semiautomatización Para Un Entorno De Producción Flexible

presiona el botón de reinicio, el cual detiene temporalmente el flujo de nuevas notificaciones. El sistema se reactivará una vez que el estado de la base de datos muestre que la condición ha sido resuelta. La interfaz gráfica se diseñó con botones grandes, contrastes de color y animaciones para facilitar su uso en ambientes industriales. Este sistema permite que los operadores se mantengan informados en todo momento sin necesidad de supervisión constante, lo que incrementa la eficiencia y seguridad del proceso.

3. Resultados

La implementación del proyecto se llevó a cabo de forma paulatina e incremental, siguiendo un enfoque iterativo de validación y mejora continua. En la primera etapa se construyó un carrito auxiliar sencillo, dotado de guardas de protección y de una alarma básica que indicaba su desplazamiento; el carro se detenía automáticamente mediante sensores QR alineados con una pieza de referencia situada en ambos extremos del carril. En una segunda fase se incorporó un elevador que permitió automatizar la subida y bajada de los nidos con el accionamiento de un botón, lo que redujo la manipulación manual y mejoró la ergonomía de los operarios. Durante esta etapa se sentaron las bases del esquema TPM: se definieron rutinas de mantenimiento autónomo y se implementaron registros iniciales de inspección. Posteriormente se integraron señales físicas de estado, incluyendo señalización luminosa tricolor y avisos sonoros, con el fin de proporcionar retroalimentación inmediata sobre el estado del carrito y del elevador. Finalmente se desarrolló la aplicación móvil y se consolidó la integración entre el monitoreo digital y las prácticas TPM, de modo que las alarmas, los registros de mantenimiento y las acciones correctivas quedaran centralizados y accesibles en tiempo real. Cada fase fue verificada en planta antes de avanzar a la siguiente, lo que permitió mitigar riesgos y optimizar la adopción operativa sin interrumpir la producción.

Antes de esta intervención, cada línea lograba procesar entre 80 y 100 televisores al día, con frecuentes retrasos derivados del traslado manual de nidos, que añadía varios minutos por unidad y aumentaba el riesgo de daños en componentes delicados o pérdidas de material. La primera versión del sistema permitió un incremento cercano al 35 % en la capacidad de producción por línea, aún en la etapa de adaptación del personal. Tras la implementación completa, incluyendo el elevador y el monitoreo digital, la capacidad alcanzó hasta 200 televisores diarios por línea con la misma cantidad de operarios, reflejando una mejora sustancial en productividad y eficiencia. La flexibilidad de los nidos ajustables permitió trabajar con distintos modelos sin necesidad de reconfiguración, lo que favoreció el balanceo dinámico entre estaciones y redujo los cuellos de botella que antes limitaban la producción. Aunque no se dispone de una cuantificación precisa de las paradas no planificadas, la reducción en la manipulación manual y en los traslados intermedios se refleja en la disminución del tiempo total de ciclo.

Una primera alternativa considerada fueron las bandas transportadoras motorizadas; sin embargo, el prototipado mostró que el costo duplicaba al de los carros auxiliares, además de requerir mayor inversión en reconfiguración. Los carros, en cambio, podían desarrollarse de forma modular empleando componentes de segunda mano o reciclados, como motores de limpiadores de ventana automotrices, lo que hizo más accesible la etapa de pruebas y demostración. Este enfoque redujo la inversión inicial y permitió validar la propuesta en condiciones reales de planta. Adicionalmente, los operarios reportaron una percepción positiva del nuevo sistema en comparación con el método original, ya que dejaron de cargar y trasladar manualmente los nidos y, con la incorporación del elevador, evitaron movimientos forzados como agacharse o levantar peso. Esta aceptación

subjetiva se tradujo en un ambiente de trabajo más seguro y ergonómico, lo que refuerza el impacto integral de la solución.

Cada estación de trabajo fue diseñada para tareas específicas: limpieza y verificación visual de pantallas, reemplazo o ajuste de placas madre, pruebas de encendido y señalización, e inspección final y embalaje. Gracias a los nidos ajustables y al vehículo auxiliar, los operarios manipulan las unidades con mayor ergonomía; pueden girar o inclinar los televisores según sea necesario mientras el flujo de nidos se mantiene continuo. Esta combinación de flujo lineal y modularidad facilita la adaptación rápida a diferentes referencias y volúmenes de trabajo, evitando paradas de la línea principal ante cambios de producto o tamaño.



Figura 1 Línea de producción.

El enfoque TPM se integró en la operación diaria mediante la participación activa de los operarios en mantenimiento autónomo, que incluye inspección de guías y plataformas, limpieza de ruedas, verificación de conexiones eléctricas y revisión de sensores. Este esquema se complementa con un plan de mantenimiento preventivo que contempla revisiones semanales de motores, tracción, sensores de seguridad y alarmas, así como evaluaciones mensuales del estado general de la línea y de los componentes críticos. Como resultado, se maximiza la disponibilidad del sistema, se reducen las paradas no planificadas y se prolonga la vida útil de elementos mecánicos y electrónicos.

El sistema de monitoreo digital, desarrollado en Dart y Flutter, supervisa en tiempo real los vehículos auxiliares y los nidos, y clasifica las alarmas en tres niveles según su prioridad y origen. Cada alerta se presenta en la interfaz móvil mediante notificaciones visuales y sonoras que se repiten hasta que el operario confirma su resolución. La captura y transmisión de datos se realiza mediante módulos ESP32 instalados en los AGV y en estaciones críticas, que publican eventos y telemetría a un servidor MQTT central. El control de frenado de los vehículos utiliza una función sigmoïdal que garantiza desaceleraciones suaves y seguras, evitando impactos sobre televisores y nidos incluso cuando la línea opera a máxima capacidad.

Las imágenes ilustran la integración efectiva del sistema físico con el monitoreo digital, mostrando los nidos, las plataformas elevadoras del vehículo auxiliar, las vías de circulación y los dispositivos de seguridad. Se evidencia cómo los nidos se desplazan entre estaciones, cómo los vehículos auxiliares transportan y posicionan las plataformas de manera precisa, y cómo las alertas y sistemas de frenado contribuyen a un entorno de trabajo seguro y eficiente. Los detalles visibles en

las fotos permiten apreciar la modularidad de la línea, la disposición de los nidos y la ergonomía de las estaciones de trabajo

La Figura 1 muestra una vista general de la línea de producción en disposición final, donde se aprecian los nidos sobredimensionados en sus vías, las estaciones de trabajo principales y el recorrido del vehículo auxiliar por debajo de la banda. La Figura 2 muestra una captura de la interfaz móvil con la pantalla principal del sistema de monitoreo, con el estado de los AGV, indicadores de producción y acceso rápido a las alarmas y al historial de eventos.

Monitoreo de líneas FFT

**AGV1 ALARMA 2: OBSTRUCCIÓN
DEL ELEVADOR AL SUBIR**

RESET



Figura 2 Interfaz móvil.

La Figura 3 muestra diferentes notificaciones entrantes de tipo alarma dentro de la app, incluyendo el identificador del vehículo y el mensaje corto que recibe el operario.



Figura 3 Notificaciones entrantes

La Figura 4 muestra el sistema elevador y el carrito auxiliar estacionado en la base de salida, con el indicador luminoso verde encendido que señala el inminente inicio del recorrido. En el primer plano se aprecia el panel de control con el botón de salida y el botón del elevador; junto a ellos, el conjunto de señalización luminoso (rojo, amarillo, verde) y el altavoz de aviso. Las luces indican el estado operativo: siendo verde indicador de que el carrito se encuentra en recorrido; amarillo, el elevador está en movimiento; y rojo, el carrito está detenido. El sistema también emite señales sonoras asociadas a cada estado: una señal breve de confirmación al iniciar el recorrido, pulsos sonoros durante la elevación y una alerta sostenida cuando el carrito permanece detenido por fallo o intervención.



Figura 4 Sistema elevador y carrito auxiliar. Estado de salida.

La combinación del FMS, el TPM y la supervisión digital constituye una solución modular, adaptable y económica que optimiza la producción, mejora el flujo de trabajo y aumenta la seguridad sin requerir inversiones complejas en automatización total. El sistema gestiona distintos modelos de televisores con continuidad operativa y adaptabilidad ante variaciones de demanda. La sincronía entre operarios, nidos, plataformas y monitoreo digital reduce riesgos de error humano, minimiza tiempos de espera y contribuye al mantenimiento predictivo, posicionando a MI Technologies como un caso práctico de manufactura flexible en entornos con recursos limitados. El proyecto se ha trasladado a Monterrey, donde, por su proximidad con Texas y con el almacén principal de la sección de televisores, se decidió convertir esta ubicación en la planta principal; actualmente el sistema se encuentra en proceso de transferencia. Paralelamente, la sede original en Tijuana mantiene operativas 20 líneas basadas en este diseño, lo que demuestra la viabilidad y escalabilidad de la solución en contextos de producción real.

4. Discusión

La implementación del sistema de manufactura flexible en MI Technologies demuestra que es posible aplicar principios de Industria 4.0 incluso en contextos con recursos limitados, utilizando soluciones económicas y modulares. La combinación de nidos sobredimensionados, el vehículo auxiliar motorizado con plataformas elevadoras y el monitoreo digital mediante la aplicación móvil

permitió reducir cuellos de botella, minimizar daños a los televisores y optimizar la utilización de los operarios. La disminución proyectada de los tiempos de ciclo y la optimización en el balanceo de estaciones confirman la eficacia de la solución, aunque se reconoce que los valores exactos requieren validación con mediciones prolongadas en producción continua.

La integración del TPM dentro del FMS facilitó la participación activa de los operarios en el mantenimiento, asegurando la disponibilidad de los equipos y prolongando la durabilidad de los componentes mecánicos y eléctricos. El monitoreo digital con alertas en tiempo real y el control de frenado mediante función sigmoideal son ejemplos de cómo se pueden incorporar herramientas de automatización ligera para mejorar la confiabilidad operativa sin necesidad de sistemas complejos o costosos.

Los resultados sugieren que la flexibilidad del sistema es fundamental para manejar la variabilidad en modelos y volúmenes de televisores, ya que permite ajustar rápidamente los recursos según la demanda. Asimismo, la modularidad del diseño asegura que futuras expansiones o modificaciones de la línea puedan implementarse sin interrupciones significativas ni inversiones de gran escala. Este enfoque evidencia que, con creatividad y un diseño estratégico, las pequeñas y medianas empresas pueden adoptar prácticas avanzadas de manufactura flexible y acercarse a los estándares de la Industria 4.0.

5. Conclusiones

El trabajo evidencia que es factible implementar un sistema de manufactura flexible en una empresa con recursos limitados, logrando mejorar de manera significativa la eficiencia operativa y la adaptabilidad a distintos modelos de productos. La combinación de nidos sobredimensionados, vehículo auxiliar motorizado, mantenimiento TPM y monitoreo digital contribuye a la reducción de tiempos de ciclo, al balanceo de estaciones y a la minimización de riesgos de daño a los productos. La integración de algoritmos de control permite anticipar posibles fallas y optimizar el flujo de trabajo.

El enfoque modular y escalable del sistema facilita futuras expansiones, ajustes ante cambios de demanda y adaptaciones a nuevos modelos de televisores, consolidando un ejemplo exitoso de transición hacia un entorno de producción flexible dentro del marco de la Industria 4.0. En conjunto, estos resultados demuestran que la combinación de soluciones físicas, prácticas de mantenimiento, automatización ligera y monitoreo digital constituye una estrategia viable y eficiente para empresas medianas que buscan mejorar su competitividad y acercarse a estándares modernos de producción flexible, sin incurrir en inversiones prohibitivas ni poner en riesgo la seguridad ni la calidad de sus productos.

Referencias

- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Mohamed, Z. M. (1994). *Flexible Manufacturing Systems: Planning Issues and Solutions*. Springer.
- Agustiady, T., & Cudney, E. A. (2023). *Total Productive Maintenance: Strategies and Implementation Guide*. CRC Press.

- Suzuki, T. (1994). *TPM in Process Industries: Step-by-Step Approach to TPM Implementation*. Productivity Press.
- Raouf, A. (2001). *Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments*. Elsevier.
- Talavage, J. (2021). *Flexible Manufacturing Systems in Practice: Design, Analysis, and Implementation*. CRC Press.
- Groover, M. P. (2019). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Pearson.
- Monk, D., & Wagner, B. (2009). *Concepts in Enterprise Resource Planning*. Cengage Learning.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech—National Academy of Science and Engineering.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756.
- Zhang, Z., Chen, J., & Guo, Q. (2022). Application of Automated Guided Vehicles in Smart Automated Warehouse Systems: A Survey. *CMES / Computer Modeling in Engineering & Sciences (survey article)*.
- Siegfried, P., Bourafa, R. (2023) A review of the automated guided vehicle systems: dispatching systems and navigation concepts. *Automobile Transport*, 52, 9–17.
- Gnap, J., Kubasáková, I., Kubáňová, J., & Pauer, D. (2024). Application of technological procedure automated guided vehicles in the production hall of a company due to increasing the automation—Case study. *Applied Sciences*, 14(17), 7467.
- Vlachos, I., Martinez Pascuzzi, R., Ntotis, M., Damiros, G. T. A., Mourtzis, D., & Repoussis, P. P. (2024). Smart and flexible manufacturing systems using Autonomous Guided Vehicles (AGVs) and the Internet of Things (IoT). *International Journal of Production Research*, 62(2), 624–645.
- Wong, Q. & Chu, Y. (2021) A Mobile Production Monitoring System Based on Internet of Things (IoT) and Random Forest Classification. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 10(4), 243–250.
- Witczak, D. & Szymoniak, S. (2024) Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences*, 14(19), 8943
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.

Influencia De La Microestructura En La Manufactura Inteligente E Industria 4.0

Juan Manuel Salgado Lopez^{1*} y Mauricio Tello Rico¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
msalgado@cidesi.edu.mx

Resumen. En la manufactura inteligente y la industria 4.0 se requieren sistemas de control mediante la inteligencia artificial con relaciones de causa y efecto, además de modelos predictivos capaces de prescribir acciones de manera eficaz y actuar de manera adecuada. Por otro lado, la microestructura incide fuertemente en las propiedades mecánicas, el desempeño e integridad de componentes metálicos y esta a su vez es influenciada por los procesos utilizados en la manufactura. Por ello debe tenerse en cuenta la relación entre microestructura, procesamiento y propiedades mecánicas cuando se trata de seleccionar, adecuar, reparar o manufacturar una pieza de metal ya sea por métodos convencionales o por aditiva. Por lo tanto, en la industria 4.0 es necesario considerar la influencia de la microestructura en la manufactura para evitar fallas o paros en producción que sean consecuencia de la falta de consideración de esto. Esto es especialmente crítico en metales y aleaciones. Debido a lo anterior, aquí se muestra por medio de ejemplos prácticos las consecuencias de pasar por alto este conocimiento, y la necesidad de generar bases de datos considerando este conocimiento para evitar problemas como los mostrados en este trabajo y con ello reunir información valiosa para alimentar la inteligencia artificial que apoye en la toma de decisiones asertivas.

Palabras Clave: aleaciones, microestructura, manufactura inteligente.

5 Introducción

En la literatura técnica ha quedado definido que el objetivo perseguido por la manufactura inteligente y la industria 4.0 es la mejora en la eficiencia, la flexibilidad y calidad de la producción mediante la integración de sistemas y la automatización de procesos. En este sentido, los sistemas de control industrial mejoran los procesos reduciendo tiempo de producción y rechazos, además de repercutir positivamente en el control de la calidad en cada etapa de su operación. Estos sistemas de control requieren la inteligencia artificial causal que emplea relaciones de causa y efecto, además de modelos predictivos capaces de prescribir acciones de manera eficaz y actuar de manera adecuada [1-6].

La información que alimenta un sistema predictivo en la manufactura inteligente debe ser lo más precisa posible para que dé luz al comportamiento mecánico del material durante el procesamiento. Dentro de esto, está la microestructura de la materia prima ya que esta incide directamente en el comportamiento mecánico, pero a su vez esta es influenciada por los procesos de manufactura

utilizados en el material. Por ello debe tenerse en cuenta la relación entre microestructura, procesamiento y propiedades mecánicas [7].

A pesar de que el problema de las fallas en productos metálicos tiene varias fuentes; una de estas es la forma en que los ingenieros seleccionan y determinan el material para la manufactura de algún componente mecánico. Como regla general, la selección se basa en recomendaciones de la literatura que comúnmente solo toman en cuenta las propiedades mecánicas a la tensión o la dureza; pero sin consideración de la microestructura y la presencia de posibles defectos presentes en el material. Esto es así porque en muchas ocasiones, los encargados de las funciones relacionadas con el diseño, inspección, supervisión y control de calidad de materiales, de uniones soldadas, o de diseño de componentes por manufactura aditiva son llevadas a cabo por personal que no posee la adecuada formación en ciencia de materiales [8], y esto es muy importante de tomarse en cuenta ya que la microestructura está relacionada íntimamente con el desempeño, procesamiento y propiedades de un componente metálico como se ilustra en la figura 1.

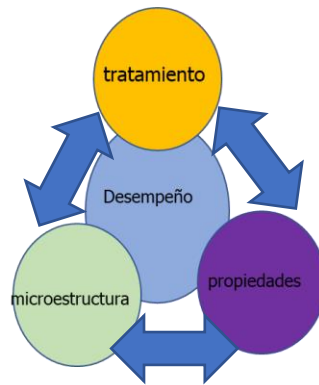


Figura 1. Relación microestructura-desempeño-procesamiento-propiedades.

El diseño funcional, la selección y el uso de materiales destinados a prevenir fallas en servicio son vitales en la manufactura. En otras palabras, el desempeño depende de encontrar métodos de prueba, estándares y enfoques apropiados para las condiciones reales de funcionamiento guiados por el análisis del material en esas condiciones. Así como también el considerar defectos en la microestructura. Esto con el fin de alimentar a la base de datos de la inteligencia artificial y que se tenga información para la toma asertiva de decisiones, ya que la omisión de este conocimiento tiene como consecuencia que se presenten problemas durante la cadena de manufactura 4.0 y por ello paros; o en el desempeño del componente en el trabajo en campo con consecuencias graves.

Considerando que la microestructura es el conjunto de fases y defectos presentes en un material que pueden ser observados a través de un microscopio óptico metalográfico y la metalografía es la técnica que se utiliza para revelar está en un componente metálico y es imprescindible para analizar el comportamiento de los metales y aleaciones en estado sólido. En este sentido, se puede decir que esta técnica se utiliza para investigar el número y tipos de fases; Así como las características de cada una de ellas como son: el tamaño, la forma, o la distribución; ya que estas indican la historia de la manufactura del metal o la aleación hasta el último paso donde fue tomada la muestra y permite inferir el comportamiento esperado del metal en los procesos ulteriores. Pero debe tenerse en mente que este análisis se realiza partiendo del supuesto de que la microestructura en la zona seleccionada es representativa del material.

El análisis microestructural es fundamental para lograr un entendimiento a los propios procesos, para lograr las propiedades deseadas, así como entender y predecir el comportamiento mecánicos del material durante los procesos de manufactura convencional y manufactura por aditiva, con lo que en la manufactura inteligente debe considerarse la información generada en este sentido para dar lugar a mejoras en la calidad, integridad y desempeño de los componentes y evitar o reducir los problemas atribuidos a esto. Entonces, para demostrar la influencia de la microestructura en la manufactura el objetivo de este trabajo presentar casos reales donde no se considera la microestructura durante la manufactura inteligente y sus consecuencias.

2 Metodología

Para cumplir el objetivo de este trabajo se mostrarán casos donde el análisis microestructural jugó un papel importante en las fallas durante el proceso de manufactura o en su caso donde debe tenerse en cuenta para reducir riesgos. Como cada caso es diferente entre si se describirá la problemática y la influencia que tuvo la microestructura en dicha situación.

El proceso del análisis metalográfico comienza con la obtención de una muestra representativa de la microestructura del material metálico. Este paso es crucial para el análisis y las conclusiones que sean hechas con esta técnica, ya que una toma de muestra en un área del material distinta a la región que contenga la mayor y más importante información de la historia de manufactura. Por ejemplo, en caso de un material fabricado por alguna técnica de aditiva es importante tomar un corte transversal al plano de fabricación y en caso de que la geometría del componente impreso por aditiva tenga cambios de sección es recomendable que se tomen muestras en esas regiones del componente. En este trabajo se describen las zonas donde se tomaron las muestras para el análisis metalográfico de cada caso.

Para revelar la microestructura de los metales y aleaciones es necesario preparar cuidadosamente la superficie. Esto es que la preparación no debe inducir deformaciones plásticas, daño térmico o ralladuras. El revelado consiste en lo siguientes procesos: Corte, en su caso montado en baquelita o algún polímero para lograr un manejo adecuado de muestra, lijado / pulido para llegar a un acabado espejo; ataque químico o electroquímico para el revelado dependiendo del material y por último la observación en un microscopio óptico metalográfico o en su caso en algún tipo de microscopio electrónico. En caso este trabajo se indica el reactivo utilizado para revelado de la microestructura.

Una vez que las muestras fueron preparadas para análisis metalográfico, las microestructuras fueron observadas en un microscopio óptico metalográfico marca Nikon con análisis de imágenes y Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM 6610LV. En el caso de microscopia electrónica, antes de analizar las zonas de importancia de los especímenes bajo análisis se realizó limpieza ultrasónica con un enjuague en alcohol y secado con aire comprimido para eliminar restos del lavado.

3. Casos de estudio y resultados

3.1 Falla en el proceso de conformado de conexión metálica a manguera de plástico para automóvil

En este primer caso se muestra una conexión de acero al carbono AISI 1010 que es utilizado en el motor de los automóviles. La manufactura de dicho componente consistía en el enderezado y corte

automatizado del tubo enderezado y el formado automatizado por medio de presión en un molde metálico de las protuberancias señaladas en la figura 2. La forma de estas protuberancias era clave en la manufactura de dicho componente; ya que ello determinaba la aceptación o rechazo de dicho componente.

Cabe señalarse que la materia prima era seleccionada usando los criterios de AISI para un acero 1010 con un contenido de 0.10 % de carbono y ningún elemento aleante especial. La microestructura consistía de granos de ferrita y perlita, pero en la especificación no se especifica ninguna característica especial. Por lo tanto, la materia prima solo era seleccionada controlada por la química. Pero en un lote en particular la producción era detenida por que la formación de las protuberancias no era la adecuada, además de que tampoco se repetía la forma. Un ejemplo de este problema se muestra en la figura 3.

En las figuras 4A y 4B se pueden observar a 10x la forma indicada de las protuberancias del conector mientras que en las figuras 5A y 5B se puede observar un ejemplo de las formas incorrectas de dichas protuberancias.



Figura 2. Conectores de acero AISI 1010 fabricados sin defectos en la condición de entrega al laboratorio.



Figura 3. Conectores de acero AISI 1010 fabricados con defectos en la condición de entrega al laboratorio.

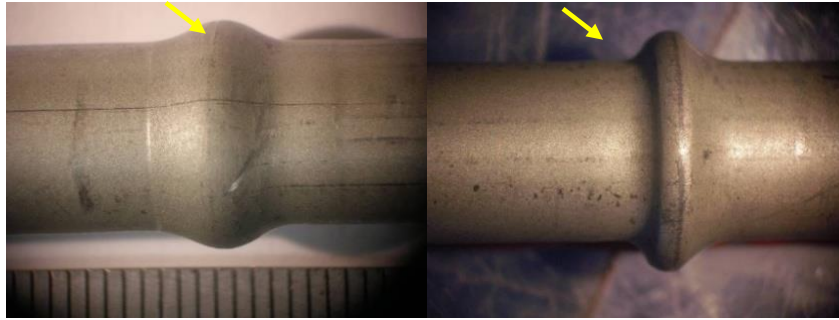


Figura 4. Conectores de acero AISI 1010 fabricados con defectos en la condición de entrega al laboratorio.

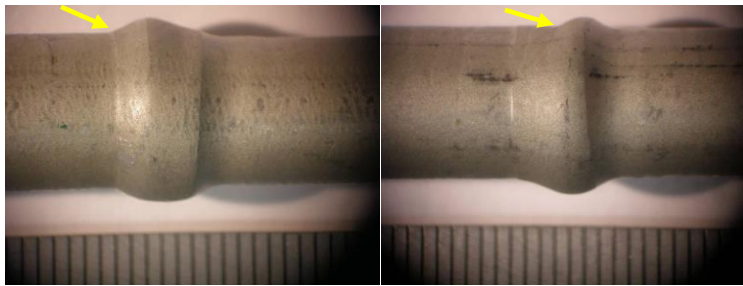


Figura 5. La imagen muestra los conectores de acero AISI 1010 fabricados con defectos en la condición de entrega al laboratorio.

El problema de las malformaciones en las protuberancias del conector de acero llevaba a problemas de rechazo muy altos y paros de producción. Esto es importante si se considera que uno de los objetivos en la manufactura inteligente es la reducción de rechazos, costos, y tiempos de producción mientras se aumenta la calidad y confiabilidad de la robustez de la línea de producción.

Con el fin de encontrar la causa de las malformaciones de las protuberancias fueron llevados a cabo varios tipos de análisis tanto en material que producía las malformaciones (material no ok) como material que daba lugar a buenos resultados (material ok).

En primer lugar, fueron realizados análisis químico cuantitativos por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica tanto en el material ok como en el material no ok. Los resultados arrojaron por resultado que ambos materiales coincidieron con la composición química nominal de un acero AISI 1010, sin que se encontrara evidencia de alguna en porcentajes de aleación ni de elementos residuales. Los resultados son mostrados en las tablas 1 y 2.

Tabla 10. Resultados del análisis químico cuantitativo llevado a cabo en especímenes sin defecto.

Identificación: Tubo OK				
Técnica remplada: Emisión óptica				
Resultados expresados en % en peso				
Elemento	AISI 1008	AISI 1010	Resultado	Resultado
Carbono	0.08% máx.	0.1 máx.	0.04%	OK
Silicio	0.15%-0.35%	0.10% máx	<0.0006%	OK
Manganeso	0.5% máx.	0.30%-0.60%	0.21%	OK
fosforo	0.04%	0.04%	0.01%	OK
Azufre	0.05%	0.05%	0.01%	OK

Tabla 2. Resultados del análisis químico cuantitativo llevado a cabo en especímenes con defecto.

Identificación: Tubo No OK				
Técnica remplada: Emisión óptica				
Resultados expresados en % en peso				
Elemento	AISI 1008	AISI 1010	Resultado	Resultado
Carbono	0.08% máx.	0.1 máx.	0.03%	OK
Silicio	0.15%-0.35%	0.10% máx	<0.0006%	OK
Manganeso	0.5% máx.	0.30%-0.60%	0.25%	OK
fosforo	0.04%	0.04%	0.01%	OK
Azufre	0.05%	0.05%	0.01%	OK

En segundo lugar, fueron tomadas muestras tubulares de los materiales ok y no ok con el fin de realizar ensayo mecánico a la tensión en muestra tubular de acuerdo a lo estipulado por la norma ASTM E08/13. Los resultados son mostrados en las figuras 6, 7A y 7B. De dichas curso esfuerzo-deformación ingenieril, estas mostraron diferencias notables entre ambos materiales ya que mientras el material ok tenía una repetibilidad, el material no ok no la tenía. Pero también salta al avista que incluso las muestras del material ok presentaban diferencias entre en el comportamiento mecánico a la tensión. Esto queda de manifiesto al comparar la figura 7A y 7B.

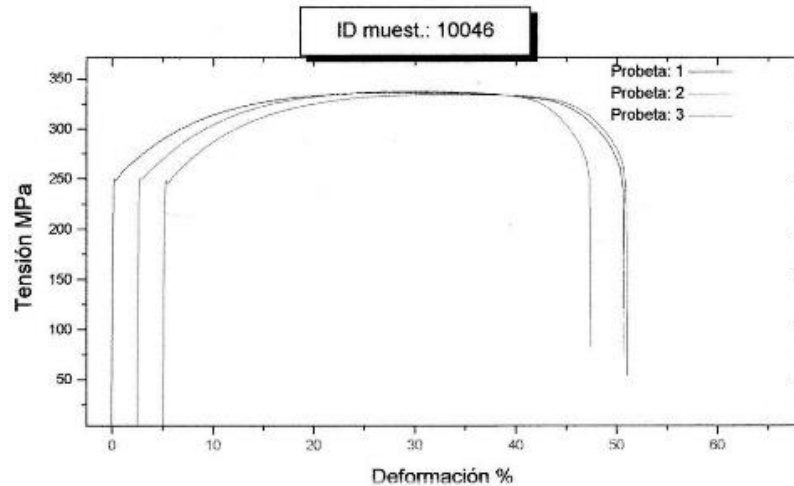


Figura 6. Curvas esfuerzo - deformación ingenieril del material ok. Se observa la repetibilidad del comportamiento mecánico a la tensión.

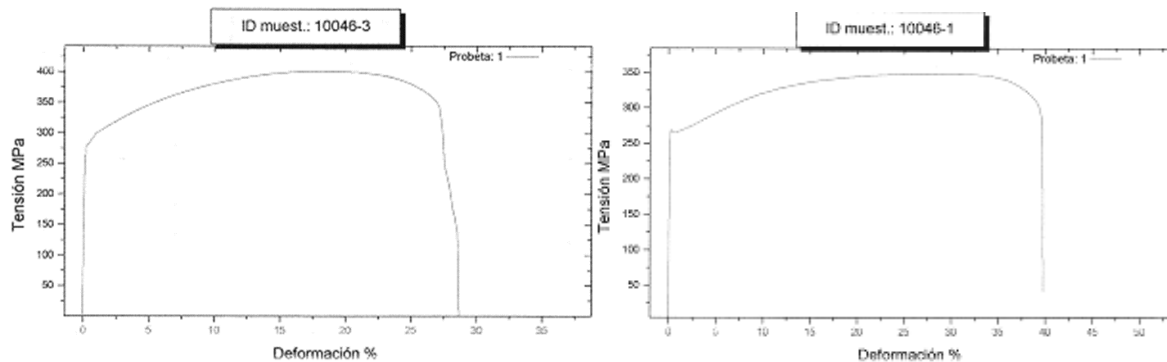


Figura 7. Curvas esfuerzo - deformación ingenieril del material no ok. Se observan diferencias notables en el comportamiento mecánico a la tensión.

En tercer lugar, fue llevado a cabo un análisis microestructural en muestras representativas del material ok y del material no ok. Los resultados son mostrados en las figuras 8A, 8B, 9A y 9B respectivamente. En este caso las microestructuras fueron reveladas utilizando nital 2.

En las micrografías mostradas en las figuras 8B y 9B se observó la presencia de granos de ferrita y colonias de perlita pero existía diferencias evidentes en la morfología de las fases de la microestructura de ambos materiales. En el caso de la microestructura de material ok quedó claro que la perlita se presentaba en forma de bandas paralelas al sentido de conformado mecánico, al igual que los granos de ferrita equiaxiales, pero en el caso de la microestructura mostrada en la figura 9B se observó que los granos de ferrita son de mayor tamaño y que la perlita no estaba en forma de bandas sino en pequeñas colonias.

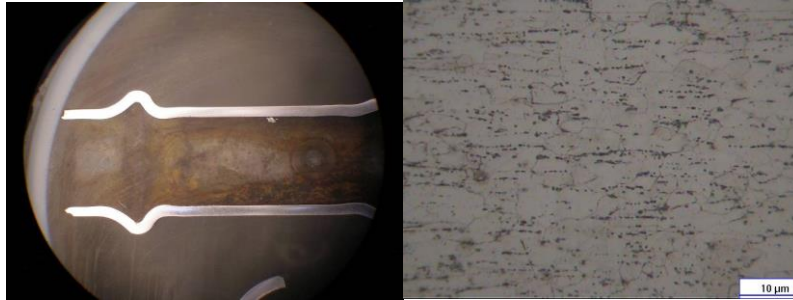


Figura 8. Muestra a 100x el corte transversal del material ok donde fue realizado el análisis metalográfico. La figura 8B muestra la microestructura del material ok.

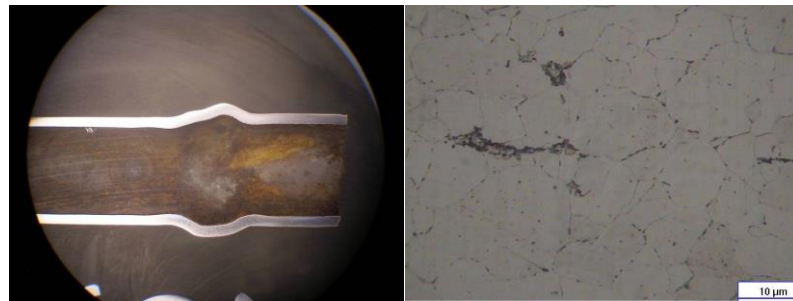


Figura 9. Muestra a 100x el corte transversal del material no ok donde fue realizado el análisis metalográfico. La figura 9B muestra la microestructura del material no ok. Es evidente la diferencia en la morfología de las fases.

Estas diferencias en las microestructuras explicaron perfectamente las diferencias en el comportamiento mecánico del material ok y del material no ok; así como también las variaciones en el comportamiento de los materiales durante el proceso de manufactura. Esta diferencia en microestructuras indicó que el proceso de manufactura entre ambos materiales fue diferente, en especial el tratamiento térmico.

Aunque ambos materiales coincidieron con lo estipulado por la especificación AISI 1010, el comportamiento mecánico después del proceso de manufactura del conector de acero variaba en cada caso debido a esa diferencia. De aquí la lección para la manufactura inteligente es que se requería de conocer la microestructura del material inicial para evaluar la viabilidad de ser sometido al proceso, con el fin de evitar paros en producción por esta causa.

3.2 Relación entre la microestructura y el desgaste de herramienta de corte.

Una buena precisión en el conformado de superficies es un indicador importante para evaluar la calidad de la manufactura aditiva, especialmente para componentes complejos que requieren alta precisión en el conformado de superficies. Por otro lado, en la manufactura inteligente es importante la información proporcionada por la base de datos para la oportuna detección del cambio de herramientas por el desgaste, ya que de lo contrario se corre el riesgo de piezas fuera de tolerancia, mal acabado, y rechazos. Por ello es que se hace investigación en este sentido.

Un ejemplo de ello es el trabajo realizado por Cruz Gonzales et. al. [9]. En dicho trabajo se presentaron los resultados de la aplicación de un algoritmo de aprendizaje profundo para relacionar el acabado superficial mediante las diferencias sonoras registradas durante el mecanizado de acero inoxidable. Los resultados sugirieron que existe una correlación entre la rugosidad y la energía sonora emitida durante el proceso. En dicho trabajo también se hizo mención de la influencia en el desgaste de la herramienta y la profundidad de la deformación plástica.

Debe mencionarse que el objetivo del trabajo antes citado fue la elaboración del algoritmo y no comentar la relación entre la microestructura y el acabado superficial por el desgaste de una herramienta de corte. Por ello, en este trabajo se da un ejemplo representativo de la relación entre acabado superficial y la microestructura en el acero inoxidable AISI 304.

En este caso, las muestras fueron atacadas utilizando ataque electroquímico en una solución de ácido oxálico al 5%. Las superficies de acabado de cada muestra mecanizada fueron inspeccionadas con un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL JSM-6610LV. Las observaciones superficiales fueron realizadas a diferentes aumentos con 15 kV y mediante electrones secundarios.

En la imagen MEB de la figura 10 se muestra la superficie maquinada de una probeta de acero inoxidable 304. En dicha imagen fueron observados las huellas de maquinado típicas de un cortador vertical de fresadora. Fue evidente que existen ralladuras que indicaron diferentes planos y por lo tanto microdeformaciones superficiales. En la figura 11 se puede observar la evidencia de maclas por deformación en la región cercana a la superficie del material. Esto es evidencia de la deformación plástica inducida por el maquinado en acero inoxidable 304.

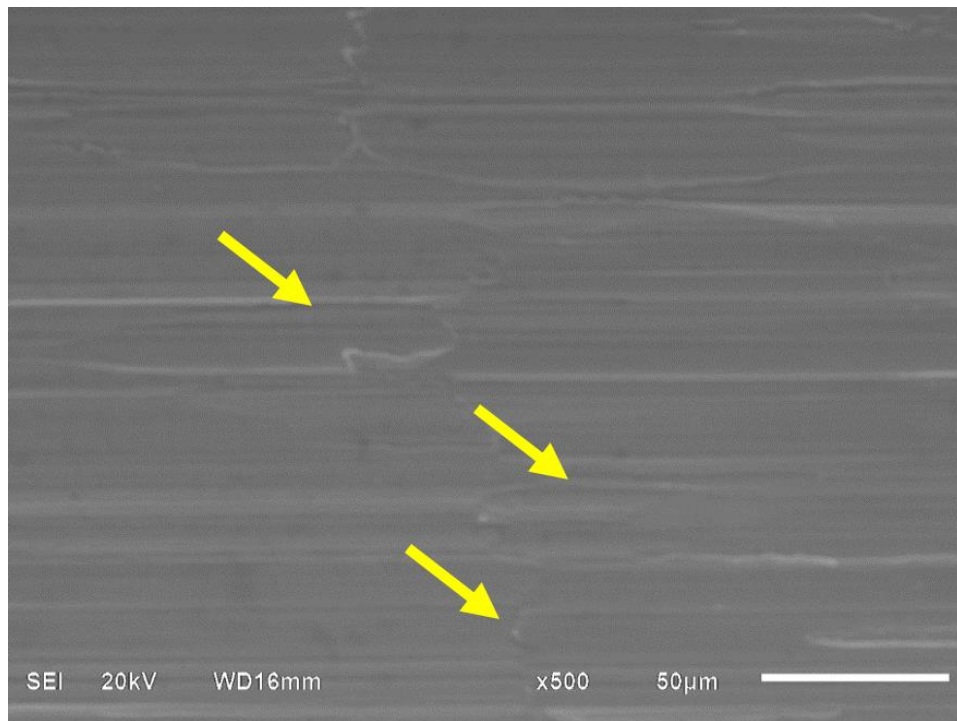


Figura 10. Acabado superficial de una muestra de acero inoxidable AISI 304. (imagen cedida por el Dr. Celso Cruz.

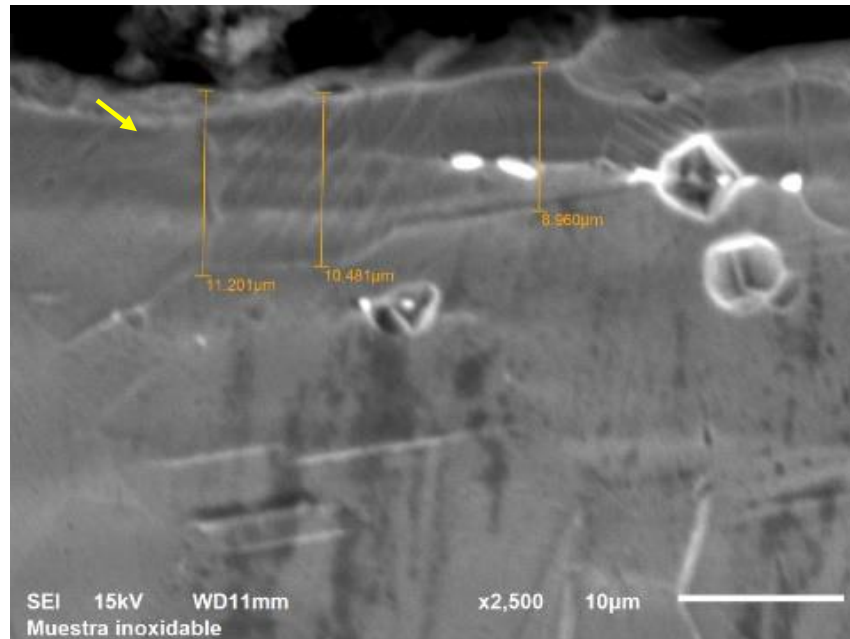


Figura 11. Microestructura en corte transversal a la superficie de maquinado de una muestra de acero inoxidable AISI 304. (imagen cedida por el Dr. Celso Cruz Gonzales).

En la figura 12 se puede observar un cambio de plano en la superficie de maquinado del acero inoxidable y es clara la presencia de maclas por deformación con lo que quedó clara la influencia del maquinado en el cambio local de la microestructura. Cabe señalarse que dichas maclas no estuvieron presentes en los granos del más cercanos al núcleo.



Figura 12. Microestructura en corte transversal a la superficie de maquinado de una muestra de acero inoxidable AISI 304. (imagen cedida por el Dr. Celso Cruz).

De las micrografías mostradas previamente quedó clara la diferencia en microestructuras entre la superficie de maquinado y el núcleo del material. Esto coincide con la literatura, donde se ha reportado que el mecanizado por fresado de aceros inoxidables afecta su microestructura, especialmente cerca de la superficie mecanizada y de igual manera que esto afecta las propiedades mecánicas. Esto es muy importante considerando que la microestructura incide fuertemente en el desempeño del componente; en especial la resistencia a la corrosión y la tendencia al agrietamiento por corrosión y esfuerzo ("SCC" por sus siglas en inglés).

Por otro lado, también ha sido reportado que la preparación de la superficie influye significativamente en el rendimiento y la durabilidad de los recubrimientos sobre acero inoxidable.

Ya que una preparación adecuada de la superficie garantiza una mejor adhesión, evitando fallos prematuros como desprendimientos, agrietamiento de recubrimientos duros, ampollamiento o corrosión. Es decir, se requiere de crear un perfil superficial (rugosidad) adecuado para la adhesión del recubrimiento [10-15].

Entonces, este caso fue indicio de la necesidad de alimentar a una red de información de la manufactura inteligente con microestructuras de la superficie de maquinado, sobre todo si se requería manufacturar componentes por maquinado de acero inoxidable que requieren ser sometidos a procesos de recubrimiento.

3.3 Influencia en la microestructura en la manufactura aditiva en metales.

La fabricación aditiva (AM) es una tecnología de fabricación muy interesante en metales y aleaciones. Sin embargo, a pesar de todos los beneficios y atractivos, hay algunas cuestiones pendientes por resolver. Uno de los mayores problemas es la microestructura generada por el proceso de MA que implica la presencia de defectos metalúrgicos y esfuerzos residuales de tensión. Este tema es muy importante es la confiabilidad y vida útil de los materiales MA en condiciones de servicio, que aún no está claro y no está completamente explorado ya que cada proceso de manufactura aditiva genera distintas microestructuras y por ende diferentes propiedades mecánicas [16].

En la literatura ha sido demostrado que los ciclos repetitivos de fusión-solidificación inherentes a la MA dan como resultado una microestructura compleja y un contenido de defectos que son difíciles de remediar. Debe tenerse en cuenta que los defectos sirven como concentradores de esfuerzos y comprometen el rendimiento mecánico, especialmente en aplicaciones críticas para la fatiga; pero también afectan el desempeño en corrosión. Tales defectos incluyen poros atrapados por gas y defectos de faltas de fusión [16-21].

El efecto de estos defectos es crítico cuando están localizados en la superficie o cercano a la superficie de la pieza MA. De igual forma, la rugosidad superficial perjudica la vida a la fatiga del material. Un ejemplo de este tipo de defectos de MA se muestra en las figuras 13A y 13B. Dichos materiales fueron fabricados por el proceso de cama de polvos.

Un ejemplo de las diferencias entre las microestructuras obtenidas por manufactura convencional y manufactura aditiva por cama de polvos se observa en las figuras 14A y 14B. Las muestras fueron preparadas muestra para metalografía según la norma ASTM E3 utilizando reactivo kallings con

etanol (0.5 gramos de CuCl_2 , mas 100ml de H_2O , mas 100 ml de HCL)). Los resultados del análisis metalográfico se muestran en las siguientes micrografías.

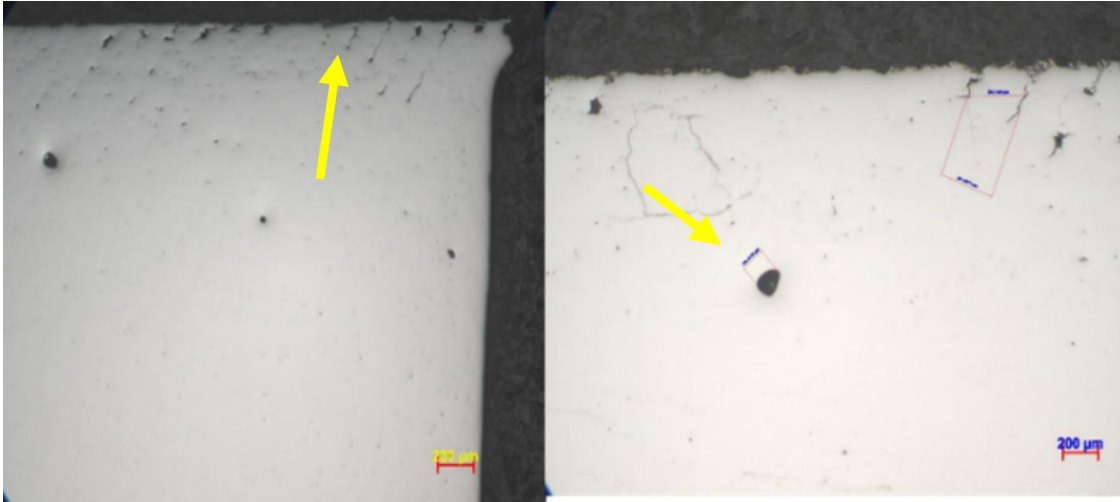


Figura 13. A) Muestra metálica fabricada por medio de manufactura aditiva. Se observa la presencia de faltas de fusión en la superficie del material. B) Corte de una segunda pieza fabricada por manufactura aditiva. Se observa porosidad y faltas de fusión cercanas a la superficie del material. (Imágenes cedidas por el Dr. Enrique Martínez.)

En la figura 14A se pudo observar la microestructura de una aleación Inconel 718 manufacturada por método convencional. La microestructura consistía de granos equiaxiales de solución sólida con maclas por recrystalización más precipitados $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})-\gamma'$ (gamma prima) y $\text{Ni}_3\text{Nb} - \gamma''$ (gamma doble prima), y también carburos metálicos. Por otro lado, La figura 13B muestra la microestructura de un inconel 718 en la cual se observaron las marcas de los pasos de fusión. Las micrografías del inconel 718 mostraron granos de diferentes formas y tamaños rodeados de precipitados. Además, se observaron subgranos dentro de los granos. Sin embargo, se encontraron defectos de fabricación tanto en la superficie como en el interior del material celular de las ramificaciones [21,25].

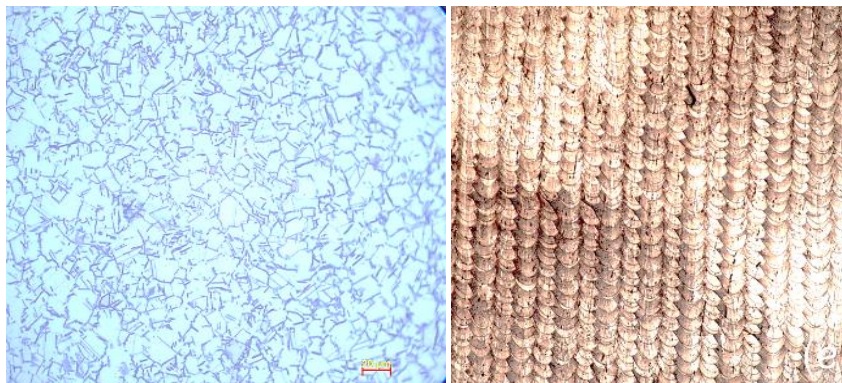


Figura 14. A)Muestra metálica fabricada por medio de manufactura convencional. Se observa la microestructura del material. B). Muestra metálica fabricada por manufactura aditiva. Se observan las huellas de fusión del proceso.

Entonces, el análisis metalográfico demostró las diferentes formas y tamaños de granos rodeados de precipitados. Además, se encontraron subgranos dentro de los granos. Esta microestructura se explicó por el proceso de fabricación aditiva donde se producen ciclos de solidificación y enfriamiento. Por lo tanto, las microestructuras reflejaban dichos ciclos en las diferentes formas y tamaños de los granos. Por otro lado, los subgranos dentro de los granos se consideraron una consecuencia del proceso de recrystalización que ocurre durante el enfriamiento de las capas superiores [23-24].

Esta diferencia en microestructuras se manifestó en la variación en propiedades mecánicas y en la respuesta al tratamiento térmico del material. Esto es evidente cuando el Inconel 718 manufacturado por aditiva fue ensayado a la termofluencia. En la figura 15 se observó la fractura de este material después de una prueba de termofluencia. De esas imágenes era evidente que existían múltiples grietas secundarias paralelas a la grieta principal, pero en la figura 16 se observó con más claridad que estas grietas están localizadas en las huellas de fusión de la manufactura por aditiva. De esto fue claro que se requiere de un tratamiento posterior a la manufactura con el fin de modificar la microestructura y con ello las propiedades mecánicas.

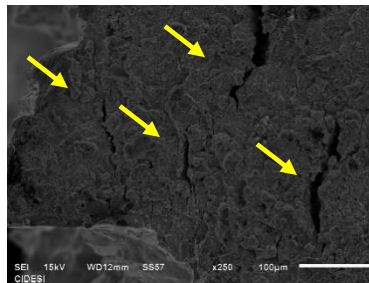


Figura 15. Muestra metálica fabricada por manufactura aditiva. Se observan grietas secundarias en las huellas de fusión del proceso.

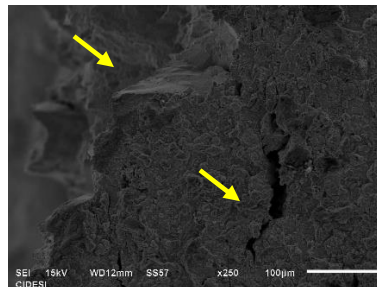


Figura 16. Muestra metálica fabricada por manufactura aditiva. Se observan grietas secundarias en las huellas de fusión del proceso.

Esta evidencia era un ejemplo de la necesidad de entender la microestructura en manufactura aditiva y la respuesta a diferentes pruebas que se asemejan a las situaciones de trabajo de los componentes manufacturados por esta metodología [23-25]. Además, se muestra que en este tipo de tecnologías de manufactura es necesario el análisis microestructural para el diseño del procesamiento posteriores y lograr obtener las propiedades finales. En caso de la manufactura

inteligente en la que esté involucrada algún método de manufactura aditiva, es de suma importancia el control de la microestructura durante todo el proceso con el fin de lograr resultado deseados.

Discusión de los casos

Los sistemas de control y de la inteligencia artificial causal utilizados en la industria 4.0 y la manufactura inteligente están basados en relaciones de causa y efecto, además del desarrollo de modelos predictivos capaces de prescribir acciones de manera más eficaz y actuar de manera más adecuada. Entonces la información que se alimenta a un sistema predictivo en la manufactura inteligente debe de ser lo más precisa para la predicción del comportamiento del material durante el procesamiento, y con el fin de lograr este objetivo el análisis microestructural es una herramienta útil.

Los casos anteriormente presentados son evidencias de la influencia de la microestructura en el entendimiento de los procesos de manufactura, pero también de la necesidad de alimentar con información relevante sobre los componentes manufacturados por vía convencional o aditiva. Por lo que para la manufactura inteligente es necesidad conocer las microestructuras óptimas en cada etapa del proceso y con ello lograr un mejor control del proceso global, así como dar respuestas asertivas a la posible problemática que ocurra dentro de alguna etapa del proceso.

En el caso de la manufactura aditiva también es muy importante determinar la respuesta a los tratamientos posteriores a la manufactura aditiva con el fin de diseñar los procesos y estrategias óptimas para lograr las propiedades óptimas para el desempeño del material. En todo ello el análisis de la microestructura es vital, porque deja en claro que las microestructuras de los materiales fabricados por métodos convencionales son distintas a las microestructuras de los materiales fabricados por MA, por lo que en ambos casos se requieren de aplicarles tratamientos térmicos para lograr las propiedades mecánicas finales óptimas para una determinada aplicación.

4. Conclusiones

En este trabajo, se mostraron tres casos donde la relación microestructura- procesamiento- propiedades jugó un papel importante en la explicación del comportamiento de los componentes mencionados. Este conocimiento es útil para alimentar la inteligencia artificial que se integre en la manufactura inteligente y debe considerarse para evitar problemas como los aquí mostrados.

La manufactura aditiva debe utilizar el análisis microestructural con el fin de controlar las etapas del proceso de producción, y para diseñar los procesos de tratamiento posterior a la MA. Además de alimentar a la inteligencia artificial con dicha información con el fin de evitar fallas durante el trabajo en campo.

Referencias

- Baldonado, M., Chang, C.-C. K., Gravano, L., & Paepcke, A. (1997). The Stanford Digital Library Metadata Architecture. *International Journal on Digital Libraries*, 1(2), 108-122.
- Bruce, K. B., Cardelli, L., & Pierce, B. C. (1997). Comparing object encodings. In M. Abadi & T. Ito (Eds.), *Theoretical aspects of computer software* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1281, pp. 415-438). Springer-Verlag.
- Van Leeuwen, J. (Ed.). (1995). *Computer science today: Recent trends and developments* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1000). Springer-Verlag.

- Michalewicz, Z. (1996). Genetic algorithms + data structures = evolution programs (3rd ed.). Springer-Verlag.
- Barsoum, Z., & Jonsson, B. (2011). Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds. *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 971-979.
- Somers, B. R., & Pense, A. W. (1994). Welding failure analysis. *Materials characterization*, 33(3), 295-309.
- López, J. M. S., Hernández, A. S., Monroy, F. I. L., & Ojeda, J. L. Ingeniería en soldadura: una necesidad de la industria nacional.
- López, J. M. S., Monroy, F. I. L., Hernández, A. S., Elizarrarás, J. L. O., & Rico, J. M. T. (2018). Evaluación de soldadura industrial de pernos empleando análisis microestructural. *Revista NTHE*, 20, 1-7.
- Cruz-González, C. E., Catalán-Catalán, C. A., Torres-Arellano, M., & Canales-Siller, H. (2023). Cutting tool wear and work hardening monitoring through cutting sound classification and machine learning in 304 stainless steel. *MRS Advances*, 8(2), 52-58.
- Huang, H., Ding, J., & McCormick, P. G. (1996). Microstructural evolution of 304 stainless steel during mechanical milling. *Materials Science and Engineering: A*, 216(1-2), 178-184.
- Yan, H., Wang, J., Zhang, Z., & Okonkwo, B. O. (2022). Effects of cutting parameter on microstructure and corrosion behavior of 304 stainless steel in simulated primary water. *Journal of Materials Science & Technology*, 122, 219-230.
- Adak, D. K., Pal, V., Das, S., Ghara, T., Joardar, H., Alrasheedi, N., & Haldar, B. (2022). Surface preparation for coating and erosion MRR of SS 304 using silicon carbide abrasive jet. *Lubricants*, 11(1), 10.
- Podgornik, B., Hogmark, S., & Sandberg, O. (2004). Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 184(2-3), 338-348.
- Basiaga, M., Walke, W., Antonowicz, M., Kajzer, W., Szewczenko, J., Domanowska, A., ... & Czajkowski, M. (2020). Impact of surface treatment on the functional properties stainless steel for biomedical applications. *Materials*, 13(21), 4767.
- Ling, L., Luo, L., & Liu, F. (2021). Effects of grinding treatment on surface properties and deformation microstructure in alloy 304L. *Surface and Coatings Technology*, 408, 126850.
- Sanviemvongsak, T., Monceau, D., Desgranges, C., & Macquaire, B. (2020). Intergranular oxidation of Ni-base alloy 718 with a focus on additive manufacturing. *Corrosion Science*, 170, 108684.
- Panchenko, M. Y., Maier, G. G., Melnikov, E. V., Moskvina, V. A., Reunova, K. A., Astafurov, S. V., ... & Astafurova, E. G. (2020, December). The peculiarities of hydrogen embrittlement of Nb-alloyed stainless steel fabricated by electron-beam additive manufacturing. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2310, No. 1, p. 020241). AIP Publishing LLC.
- Razavi, S. M. J., Avanzini, A., Cornacchia, G., Giorleo, L., & Berto, F. (2021). Effect of heat treatment on fatigue behavior of as-built notched Co-Cr-Mo parts produced by Selective Laser Melting. *International Journal of Fatigue*, 142, 105926.
- Gao, C., Liu, Z., Xiao, Z., Zhang, W., Wong, K., & Akbarzadeh, A. H. (2021). Effect of heat treatment on SLM-fabricated TiN/AlSi10Mg composites: Microstructural evolution and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 156722.
- Li, C. L., Hong, J. K., Narayana, P. L., Choi, S. W., Lee, S. W., Park, C. H., ... & Mei, Q. (2021). Realizing superior ductility of selective laser melted Ti-6Al-4V through a multi-step heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 799, 140367.
- Teng, Q., Li, S., Wei, Q., & Shi, Y. (2021). Investigation on the influence of heat treatment on Inconel 718 fabricated by selective laser melting: Microstructure and high temperature tensile property. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 35-45.
- Son, K. T., Phan, T. Q., Levine, L. E., Kim, K. S., Lee, K. A., Ahlfors, M., & Kassner, M. E. (2021). The creep and fracture properties of additively manufactured inconel 625. *Materialia*, 15, 101021. Gharbi, A., Bouhamla, K., Ghelloudj, O.,
- Ramoul, C. E., Berdjane, D., Chettouh, S., & Remili, S. (2021). Heat Treatment Effect on the Microstructural, Hardness and Tribological Behavior of A105 Medium Carbon Steel. In *Defect and Diffusion Forum* (Vol. 406, pp. 419-429). Trans Tech Publications Ltd.
- Oros, T. J., Son, K., Hodge, A. M., & Kassner, M. E. (2024). The high temperature creep and fracture behavior of Inconel 718 produced by additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 251, 116208.
- Bryndza, G., Tchuindjang, J. T., Chen, F., Habraken, A. M., Sepúlveda, H., Tuninetti, V., ... & Duchêne, L. (2025). Review of the Microstructural Impact on Creep Mechanisms and Performance for Laser Powder Bed Fusion Inconel 718. *Materials*, 18(2), 276.

Influencia E Impacto De La Posición De Los Piezoresistores En La Membrana Para Sensores De Baja Presión

César Hernández-Enríquez^{1*}, Víctor Samuel Balderrama Vázquez^{1*}, Carlos Augusto Lopez-Lazcano¹

¹Secihti – Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
c.hernandez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. El trabajo presenta un análisis comparativo de dos sensores de presión con diferentes arreglos de piezoresistores (PZR). Se seleccionó tereftalato de polietileno (PET) como material de diafragma y silicio tipo p como el PZR. El objetivo principal es evaluar el impacto de esta variación en la respuesta del sensor, considerando parámetros como la sensibilidad (S) y el voltaje de salida (Vout). Los dispositivos se diseñan y caracterizan mediante análisis de elementos finitos (FEA), sometiéndolos a condiciones de presión que van desde -10 kPa a 10 kPa y 5 V como voltaje de alimentación para medir su desempeño eléctrico y mecánico. Se ha propuesto una configuración diferente para PZR con estos alineados. El sensor estándar (Diseño 1) presenta una sensibilidad (S) de 0.06 mV/V-kPa y Vout de 6.2 mV. La configuración propuesta (Diseño 2) con puente de Wheatstone alineado muestra una S de 0.1 mV/V-kPa y Vout de 21.2 mV. Los resultados indican que los sensores con PZR en el centro del diafragma (configuración propuesta) generan una S mayor debido a un mayor desequilibrio de tensión mecánica en el borde y cerca del centro del diafragma. Estos hallazgos ofrecen información clave para optimizar el diseño de sensores piezoresistivos para aplicaciones específicas, lo que permite adaptar la disposición de los PZR a los requisitos de precisión y estabilidad.

Palabras Clave: Membrana cuadrada, Piezoresistores de polisilicio, Análisis por elemento finito.

1. Introducción

La piezoresistividad es un efecto que presentan diversos materiales y que presenta un cambio en su resistencia debido a la variación de su deformación (es decir, al aplicar presión). Este efecto fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. Su primera aplicación no apareció hasta la década de 1930, unos 75 años después de su descubrimiento (Beeby, 2004).

El efecto piezoresistivo se aprovechó inicialmente mediante la fijación de galgas extensométricas a diafragmas metálicos. Posteriormente, se aprovechó la tecnología del silicio y de los circuitos integrados para desarrollar sensores de presión con diafragmas delgados (Song et al., 2020).

La Figura 1 muestra la sección transversal de un sensor de presión piezoresistivo anisotrópico de silicio típico. La detección de la tensión mecánica se realiza mediante un circuito eléctrico de puente de Wheatstone, donde el desequilibrio de los dos pares de resistencias genera una tensión en la

salida de voltaje. Las resistencias están ubicadas a lo largo del borde del diafragma, una a cada lado. Todas las resistencias están orientadas en la misma dirección; dos son paralelas a la deformación máxima o longitudinales (R_l) y dos son perpendiculares o transversales (R_t) (Song et al., 2020).

Pocos grupos de investigación han reportado sensores de presión flexibles con materiales distintos del silicio, utilizados para aplicaciones en entornos gaseosos, debido a su pequeño rango de medición. Por ejemplo, un diafragma de materiales poliméricos presenta una gran flexibilidad debido a un bajo módulo de Young de 5×10^{-1} Pa, en comparación con los fabricados con materiales como el silicio, cuyo módulo de Young es 33 veces mayor. Por lo tanto, las propiedades requeridas de los materiales para entornos gaseosos presentan y tienen buena resistencia química, buen aislamiento frente a gases y humedad, y alta resistencia al impacto (Balderrama et al., 2021; Belwanshi, Philip, & Topkar, 2022; Verma, Punetha, & Pandey, 2020; Wu et al., 2023)

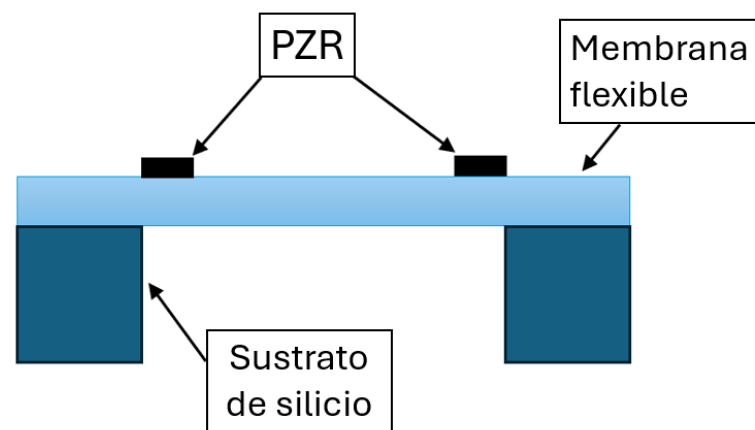


Figura 2. Sección transversal de un sensor piezoresistivo de baja presión que utiliza material polimérico como membrana.

2. Metodología

Para realizar el análisis FEA, primero se deben definir la geometría del sensor, su aplicación y los parámetros de trabajo. Los sensores analizados están diseñados para su uso en entornos gaseosos y aplicaciones médicas. El rango de presión se ha definido entre -10 kPa y 10 kPa.

La fuente de alimentación es de 5 V. Los materiales del sensor son Tereftalato de polietileno (PET) para la membrana flexible, polisilicio para los piezoresistores y oro para las líneas metálicas.

Las geometrías del sensor se seleccionaron teniendo en cuenta la zona de máxima concentración de esfuerzos en la membrana. En un diafragma de geometría cuadrada, la máxima concentración de tensión se localiza en la parte central de cada arista del recuadro. El Diseño 1 es un arreglo estándar para sensores piezoresistivo de presión con los PZR transversales y longitudinales a la orilla del diafragma (ver Figura 1). En el Diseño 2, todos los PZR se colocaron estratégicamente alineados y orientados hacia el centro de esta región para aprovechar la mayor deformación y obtener un mayor desequilibrio en el puente de Wheatstone (ver Figura 2).

Los PZR tienen dimensiones de ancho y largo de $0.05\ \mu\text{m}$ y $0.5\ \mu\text{m}$, respectivamente. Idealmente, todos los PZR deben tener las mismas dimensiones para lograr un puente de Wheatstone equilibrado cuando no hay deformación ni efecto piezoresistivo.

Asimismo, las condiciones de frontera para el análisis FEA se establecieron con un tamaño máximo de elemento de malla de $220\ \mu\text{m}$ y un mínimo de $16\ \mu\text{m}$. Se aplicó un barrido auxiliar de presión de $-10\ \text{kPa}$ a $10\ \text{kPa}$ con incrementos de $2\ \text{kPa}$. La presión se aplica en el área cuadrada del diafragma. El marco exterior permanece fijo y anclado al sustrato rígido.

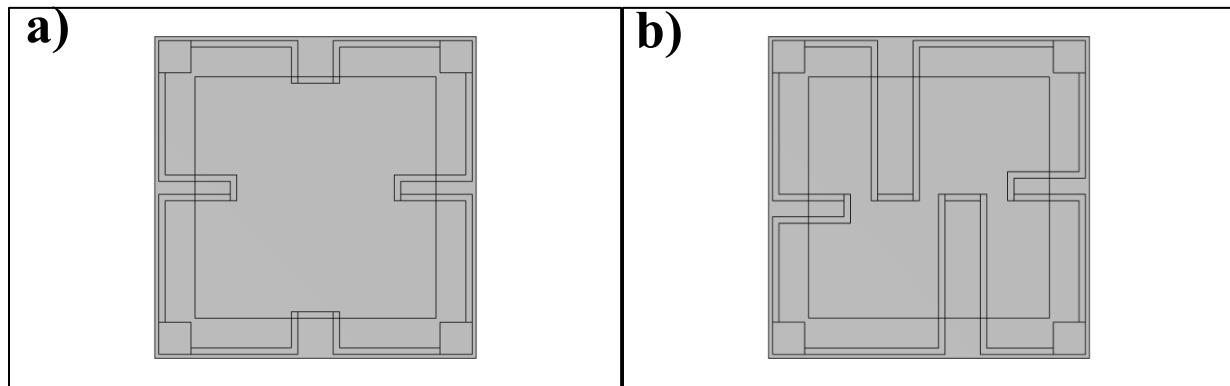


Figura 2. Diseños propuestos a) Diseño 1 estándar, b) Diseño 2 propuesto con PZR alineados.

3. Resultados

Según el análisis FEA, la sensibilidad del Diseño 1 es de $0.06\ \text{mV/V-kPa}$ y el esfuerzo máximo de Von Mises es de $2.56\ \text{MPa}$. La sensibilidad del Diseño 2 es de $0.1\ \text{mV/V-kPa}$ y el esfuerzo máximo de Von Mises es de $2.25\ \text{MPa}$. Al analizar las gráficas de voltaje de salida frente a la presión aplicada, se observan discrepancias.

El Diseño 1 presenta un comportamiento lineal y una pequeña variación en el voltaje de salida con la presión aplicada. El Diseño 1 asegura que todos los PZR están en el área de mayor concentración de esfuerzos. Sin embargo, en los materiales isotrópicos esto no es deseado ya que el desbalance de resistencias debido a la presión no es el máximo (ver Figura 3).

En el Diseño 2 propuesto, el sensor presenta una respuesta lineal a la presión aplicada. En este diseño los PZR están alineados hacia el centro, obteniendo la máxima diferencia entre los esfuerzos de tensión y compresión de la membrana sujeta a deformación (ver Figura 4). Comparando el Diseño 2 contra el Diseño 1, el Diseño 2 presenta mayor sensibilidad (ver Figura 5). El aumento de la sensibilidad del diseño propuesto se debe a la disposición de los PZR: mientras que un par de PZR (R3 y R4) está sometido a esfuerzos de compresión, el otro par (R1 y R2) está sometido a esfuerzos de tracción. Por lo tanto, la diferencia en los cambios de resistencia es máxima. En cambio, en el diseño tradicional, todos los PZR están sometidos a esfuerzos de compresión.

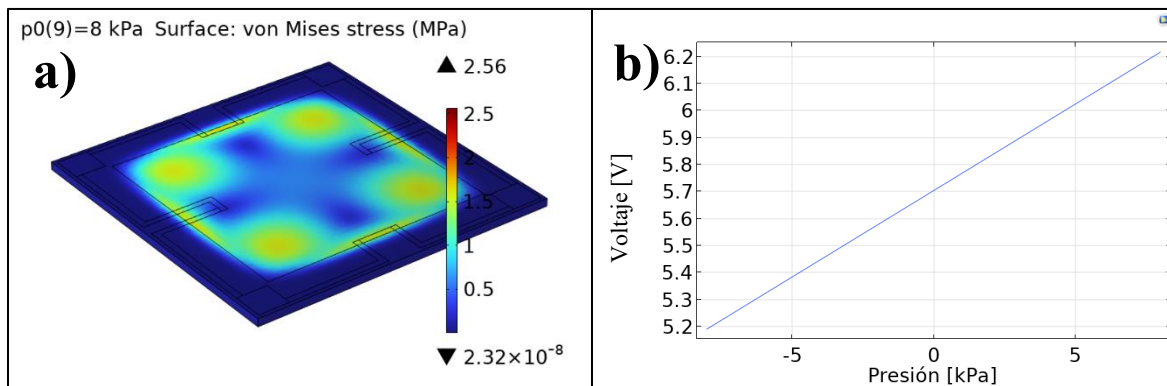


Figura 3. Diseño 1, a) Análisis de esfuerzos de Von Mises, b) Respuesta de voltaje de salida respecto a presión de entrada.

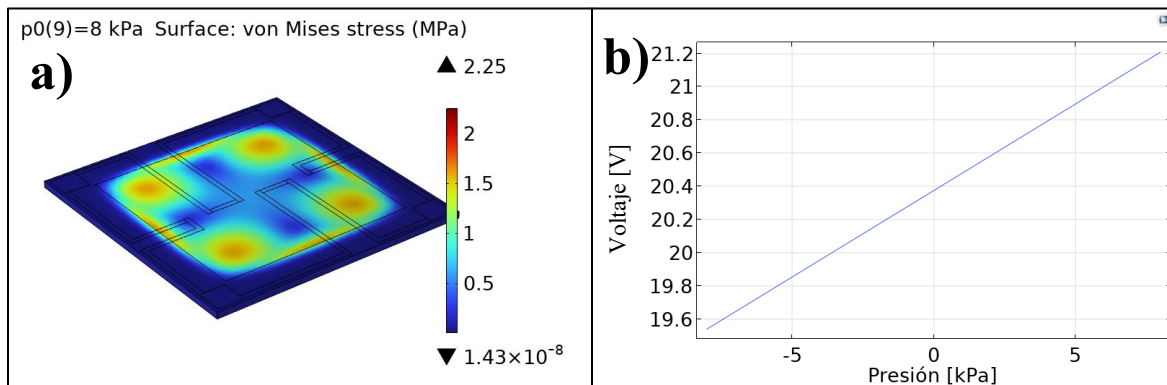


Figura 4. Diseño 2, a) Análisis de esfuerzos de Von Mises, b) Respuesta de voltaje de salida respecto a presión de entrada.

4. Conclusión

El análisis por elemento finito de los dos diseños respecto a la posición de los piezoresistores para los sensores de presión se ha realizado y las variables a comparar fueron la sensibilidad y los esfuerzos mecánicos. Se seleccionó el tereftalato de polietileno (PET) como material de diafragma y el silicio tipo p como material para los PZR. Un barrido de -10 kPa a 10 kPa de presión y 5 V de alimentación fue aplicado. Se obtuvieron las S para el Diseño 1 estándar y Diseño 2 propuesto siendo de 0.06 mV/V-kPa y 0.1 mV/V-kPa, respectivamente. El aumento de la sensibilidad del Diseño 2 propuesto se debe a la disposición de los PZR. El hallazgo encontrado fue que mientras que un par de PZR (R3 y R4) está sometido a esfuerzos de compresión, el otro par de PZR (R1 y R2) está sometido a esfuerzos de tensión. Por lo tanto, la diferencia en los cambios de salida de voltaje es máxima. Por otro lado, en el Diseño 1 estándar, todos los PZR están sometidos a esfuerzos de compresión.

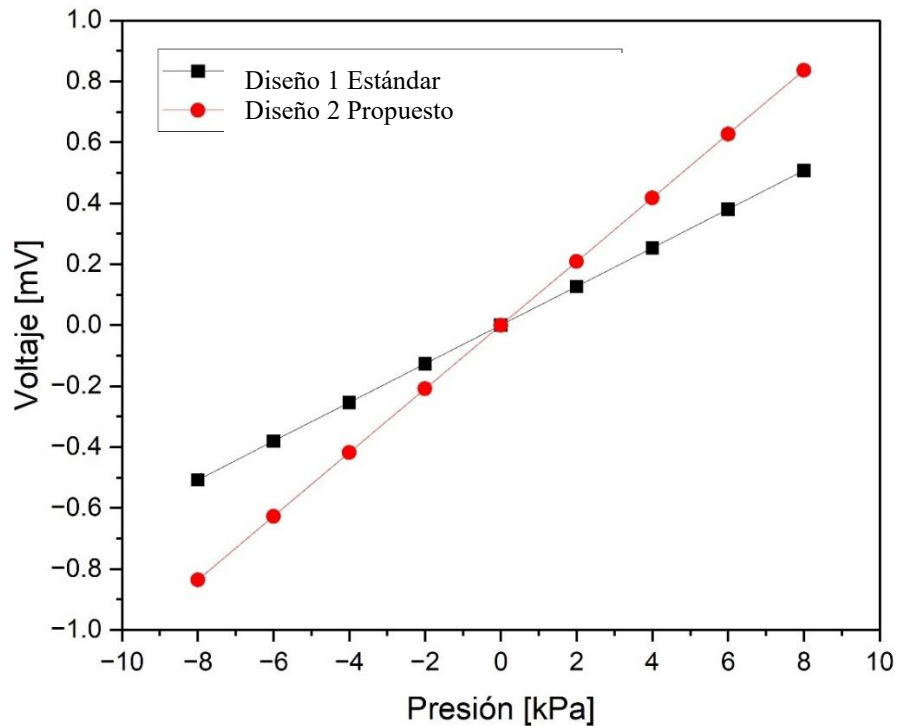


Figura 5. Comparación de sensibilidades entre el Diseño 1 (estándar) y el Diseño 2 (propuesto).

Agradecimientos

Agradecemos a Secihti por otorgar el número de beca 1019302 para César Hernández Enríquez. Agradecimientos a CIDESI y al Posgrado de PICYT. Agradecimientos a la Gerencia de Microtecnologías y Semiconductores de la Dirección de Semiconductores y Electrónica. Agradecimiento a Carlos A. Lazcano por el apoyo y entrenamiento en el cuarto limpio. Agradecimiento a mis directores de Tesis, al personal de Microtecnologías por el soporte en el Laboratorio de cuarto limpio. Agradecimiento de Víctor Samuel Balderrama Vázquez a la Secihti dentro del marco de Investigadores por México, bajo el Proyecto No. 2, en cual se desarrolla este proyecto. Proyecto apoyado por la “**Secihti**” en el año 2025. Proyecto MADTEC-2025-M-96.

Referencias

- S. P. Beeby, MEMS Mechanical Sensors 2004 MEMS Mechanical Sensors. Artech House, 2004. 334 pp., ISBN: 1-58053-536-4 £63.00 (hardcover), vol. 24, no. 3. 2004.
- Song, P., Ma, Z., Ma, J., Yang, L., Wei, J., Zhao, Y., ... & Wang, X. (2020). Recent progress of miniature MEMS pressure sensors. *Micromachines*, 11(1), 56.
- Wu, C., Fang, X., Kang, Q., Fang, Z., Wu, J., He, H., ... & Jiang, Z. (2023). Exploring the nonlinear piezoresistive effect of 4H-SiC and developing MEMS pressure sensors for extreme environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 9(1), 41.
- Belwanshi, V., Philip, S., & Topkar, A. (2022). Performance study of MEMS piezoresistive pressure sensors at elevated temperatures. *IEEE Sensors Journal*, 22(10), 9313-9320.
- Balderrama, V. S., Leon-Gil, J. A., Fernández-Benavides, D. A., Ponce-Hernández, J., & Bandala-Sánchez, M. (2021). MEMS piezoresistive pressure sensor based on flexible PET thin-film for applications in gaseous-environments. *IEEE Sensors Journal*, 22(3), 1939-1947.
- Verma, P., Punetha, D., & Pandey, S. K. (2020). Sensitivity optimization of MEMS based piezoresistive pressure sensor for harsh environment. *Silicon*, 12(11), 2663-2671.

Influencia E Impacto De La Posición De Los Piezoresistores En La Membrana Para Sensores De Baja Presión

Inteligencia Artificial Para La Identificación Y Cuantificación De Fases En Inconel 718 Mediante Imágenes Metalográficas

Luis Ferro Martinez², Angel-Iván García Moreno¹, Leonardo Hernández-Flores¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Cedva, Estio 33, Colonia La Era Col, La Era, 76148 Santiago de Querétaro, México
lhernandezf@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. El avance en la inteligencia artificial ha sido amplio en estos últimos años. Este avance ha permitido la mejora de distintas áreas como lo es la ciencia de materiales donde mediante el uso de redes neuronales y procesamiento de imágenes, se busca reconocer patrones y parámetros característicos en micrografías, tales como texturas, porosidad y cuantificación de las fases presentes. En las superaleaciones base níquel fabricadas por manufactura aditiva el objetivo es identificar con precisión la fase Laves y analizar su evolución frente a cambios de temperatura. Este trabajo presenta un sistema automático basado en redes neuronales de segmentación U-Net optimizada (UNetMini) para la identificación y cuantificación de la fase Laves en micrografías ópticas de Inconel 718. El modelo alcanzó un *Loss* mínimo de 0.2244, mostrando mejoras significativas en precisión y reproducibilidad. La propuesta se valida en muestras obtenidas por Laser Metal Deposition (LMD) y se plantea como herramienta para la optimización de procesos y selección confiable de materiales. Este enfoque permitirá automatizar y optimizar la evaluación microestructural, facilitando el trabajo en laboratorios de investigación, control de calidad industrial y entornos de desarrollo de materiales, contribuyendo a la reducción de errores humanos y agilizando la generación de datos confiables para la selección de materiales y optimización de procesos.

Palabras Clave: Manufactura Aditiva, Procesamiento de Imágenes, Inteligencia.

1. Introducción

Inconel 718 es una superaleación base níquel ampliamente utilizada en aplicaciones aeroespaciales y de generación de energía por su alta resistencia mecánica y estabilidad en altas temperaturas. Sin embargo, la presencia de fases secundarias topológicamente empaquetadas, como la fase Laves, está asociada a la pérdida de ductilidad, disminución de tenacidad y aceleración de la nucleación de grietas, impactando negativamente en la vida en servicio de componentes críticos (Schirra et al., 1991; Farias et al., 2024).

Laser Metal Deposition (LMD) se ha consolidado como una ruta tecnológica de gran potencial para la fabricación y reparación de componentes en Inconel 718, ofreciendo ventajas significativas como flexibilidad geométrica, reducción en el desperdicio de material y menor dependencia de procesos convencionales de maquinado. No obstante, las condiciones propias del proceso (altas tasas de enfriamiento, gradientes térmicos pronunciados y solidificación rápida) favorecen la segregación

Inteligencia Artificial Para La Identificación Y Cuantificación De Fases En Inconel 718 Mediante Imágenes Metalográficas

interdendrítica y la formación de microestructuras anisotrópicas, lo que con frecuencia conduce a la precipitación de fases secundarias perjudiciales, en particular la fase Laves. (Mazzucato et al., 2021).

La presencia de esta fase compromete de manera directa la integridad mecánica de la aleación, incluso en muestras que aparentan ser densas y libres de defectos macroscópicos. Diversos estudios han reportado que especímenes en condición as-built presentan porosidad, defectos de fusión e inclusiones intermetálicas directamente vinculados con parámetros de proceso como la potencia del láser, la velocidad de barrido y el grado de solapamiento entre trayectorias (Mazzucato et al., 2021).

Estudios sobre piezas fabricadas por LMD muestran que tratamientos térmicos pueden reducir significativamente la fracción volumétrica de Laves (hasta aproximadamente 1% tras tratamientos específicos) y que la presencia de esta fase correlaciona con reducciones medibles en propiedades mecánicas como tensión última, ductilidad y resistencia a fatiga (Farias et al., 2024; MDPI, 2020).

Investigaciones recientes sobre Inconel 718 fabricado mediante manufactura aditiva han demostrado la marcada influencia de la fracción, tamaño y morfología de la fase Laves en el desempeño mecánico del material. Una mayor fracción de Laves se correlaciona con reducciones en ductilidad y resistencia a fatiga, mientras que tratamientos térmicos diseñados de manera específica permiten reducir de forma significativa su contenido volumétrico o incluso disolverla, traduciéndose en mejoras medibles en elongación, tenacidad a la fractura y resistencia última a la tracción. Paralelamente, los avances en el análisis microestructural automatizado han comenzado a incorporar métodos de aprendizaje profundo. Entre ellos, las redes neuronales convolucionales han sido aplicadas con éxito para la segmentación de fases δ en micrografías ópticas (Wang et al., 2022), mientras que otros estudios evidencian la capacidad de modelos supervisados basados en CNN para cuantificar microestructuras multifásicas en imágenes BSE con una reproducibilidad significativamente mejorada.

El análisis manual mediante inspección óptica convencional constituye un proceso lento, con una fuerte dependencia de la experiencia del operador y, por ende, sujeto a una alta variabilidad inter-observador. Además, presenta serias limitaciones de escalabilidad cuando se requiere evaluar grandes volúmenes de muestras metalográficas, lo que compromete tanto la reproducibilidad de los resultados como la generación de bases de datos confiables. Para superar estas deficiencias, se propone la implementación de una arquitectura de segmentación semántica basada en aprendizaje supervisado, empleando redes convolucionales tipo U-Net, reconocidas por su capacidad para preservar la información contextual y espacial de la imagen. Esta metodología permite no solo identificar con alta precisión la fase Laves en micrografías ópticas, sino también cuantificar su fracción volumétrica, morfología y distribución, parámetros indispensables para correlacionar la evolución microestructural con las propiedades mecánicas y de degradación de las superaleaciones base níquel (Wang et al., 2022).

Los modelos de aprendizaje supervisado basados en arquitecturas profundas, en particular U-Net, ofrecen capacidades robustas de segmentación semántica que permiten preservar tanto la información espacial como la contextual de la microestructura. Esto posibilita la generación automatizada de datos cuantitativos reproducibles, fortaleciendo la correlación entre la evolución microestructural y la respuesta mecánica. La integración de modelos de aprendizaje automático en Inteligencia Artificial Para La Identificación Y Cuantificación De Fases En Inconel 718 Mediante Imágenes Metalográficas

este contexto permite optimizar los procesos de inspección, mejorar la eficiencia de los materiales y establecer sistemas inteligentes que garanticen el rendimiento y durabilidad de piezas críticas fabricadas mediante manufactura aditiva

2 Materiales y métodos

Muestras y preparación

Las muestras de Inconel 718 fueron fabricadas mediante el proceso de LMD. Posteriormente, se realizaron cortes transversales en la dirección de construcción y las secciones fueron montadas en baquelita para garantizar estabilidad durante el pulido esto debido a las dimensiones de la muestra. La preparación metalográfica incluyó lijado progresivo y pulido, seguido de ataque electroquímico con ácido oxálico al 10 % en volumen, con el propósito de revelar la microestructura. Las micrografías ópticas se adquirieron utilizando un microscopio Olympus GX51, con aumentos de 50× y 100×. En total se generó un conjunto de 150 imágenes, que constituyó la base de datos inicial destinada al entrenamiento y validación del modelo de segmentación.

Extracción de máscara de referencia

Para establecer las etiquetas de referencia, se generaron máscaras a partir de anotaciones manuales realizadas sobre las micrografías. Estas anotaciones fueron almacenadas en formato JPG y posteriormente procesadas de manera semiautomática. La estrategia consistió en extraer el canal rojo de las imágenes, aplicando un umbral ($R > 128$, $G < 80$, $B < 80$) con el fin de resaltar las áreas marcadas por el experto. Este procedimiento permitió convertir las anotaciones en máscaras binarias (0 = fondo, 1 = fase Laves), garantizando compatibilidad con un esquema de segmentación supervisada.

Arquitectura de la IA

El modelo implementado corresponde a UNetMini, una versión compacta de la arquitectura U-Net optimizada para tareas de segmentación con conjuntos de datos reducidos. La topología se compone de bloques CBR (*Convolution–Batch Normalization–ReLU*), con dos etapas de codificación que emplean convoluciones con 64 y 128 filtros, respectivamente, seguidas de operaciones de *max pooling* 2×2. La fase de decodificación integra *upsampling* bilineal y convoluciones simétricas hasta la capa de salida. El clasificador final consiste en una activación sigmoideal de un solo canal, que permite generar mapas de probabilidad por píxel. La segmentación binaria se obtiene aplicando un umbral de 0.5 para definir la máscara final.

Entrenamiento y validación

El entrenamiento del modelo se llevó a cabo en la plataforma Google Colab, utilizando GPU para acelerar el cómputo. El flujo de trabajo se desarrolló en lenguaje Python, implementando *PyTorch*. Las imágenes fueron redimensionadas a 256×256 píxeles y empleadas con un tamaño de lote (*batch size*) de 2. El entrenamiento se prolongó por 100 épocas, utilizando el optimizador Adam con tasa de aprendizaje inicial de 1×10^{-3} . La función de pérdida adoptada fue una combinación ponderada de Dice Loss y Binary Cross Entropy (BCE), configurada como *DiceBCELoss*, con el objetivo de equilibrar precisión global y sensibilidad en regiones minoritarias.

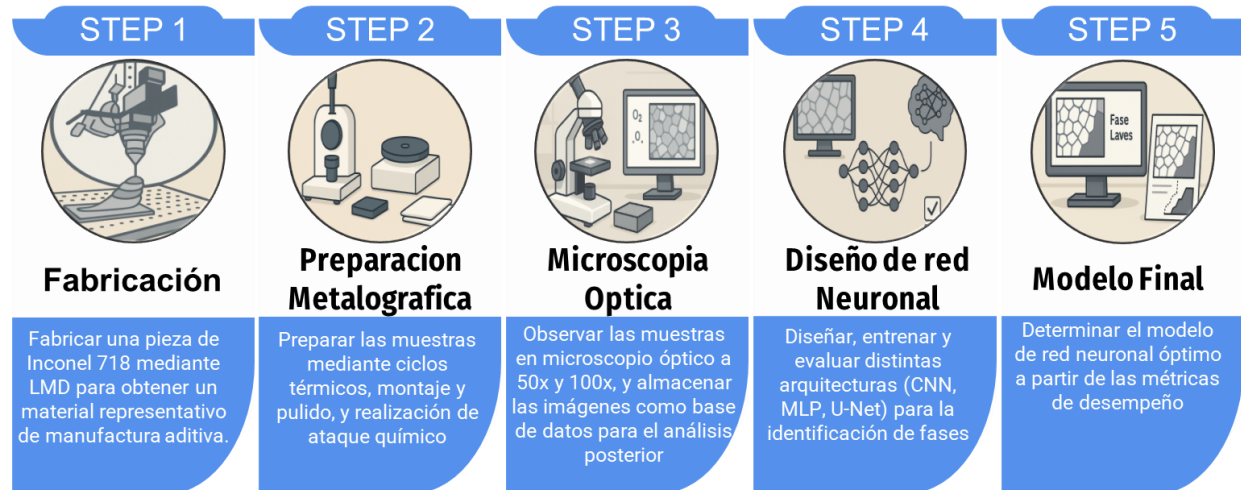


Figura 4 Metodología utilizada para la cuantificación de fase laves

3. Resultados

Fabricación

La pieza de Inconel 718 fue obtenida mediante el proceso de LMD, utilizando parámetros de operación que garantizaron una deposición estable y continua del material (Figura 5). El componente resultante presentó una geometría homogénea y un acabado superficial uniforme, condiciones necesarias para su preparación metalográfica en este estudio. La integridad dimensional y la ausencia de defectos macroscópicos facilitaron la obtención de cortes transversales adecuados, los cuales fueron empleados en el análisis microestructural y en la generación del conjunto de imágenes destinado al entrenamiento del modelo de segmentación.

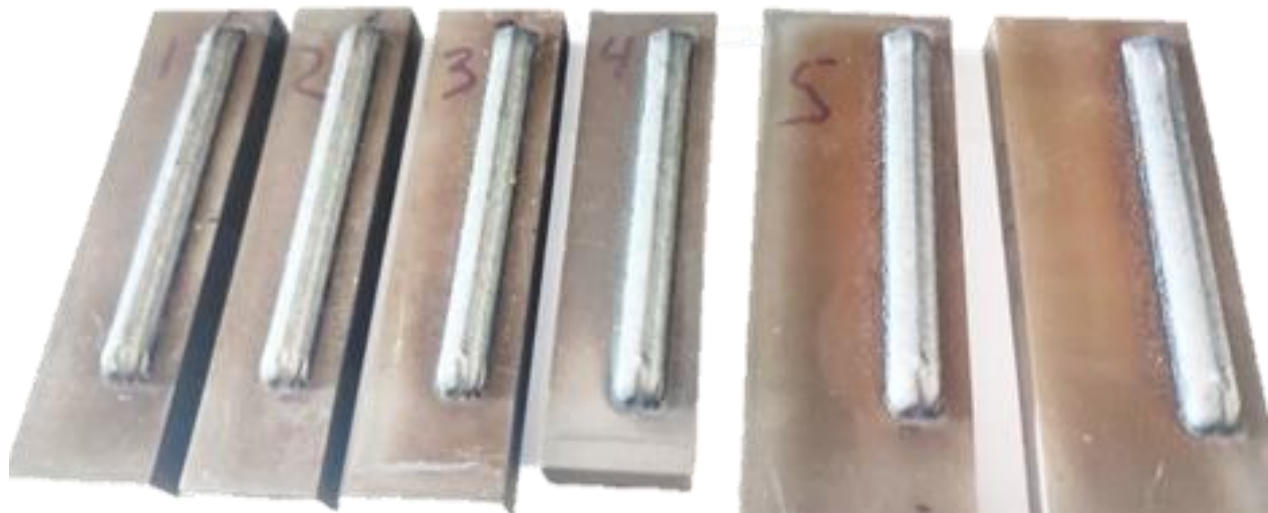


Figura 5 Fabricación de pieza LMD.

Preparación metalográfica

Las secciones extraídas mediante corte fueron sometidas a ciclos térmicos controlados en horno tubular con atmosfera de aire con el propósito de reproducir condiciones comparables a las que experimenta el material en servicio (Figura 6). Este procedimiento favoreció la precipitación de fases secundarias, entre las cuales la fase Laves adquirió especial relevancia por su marcada influencia en las propiedades mecánicas de la aleación. El tratamiento aplicado permitió evaluar la estabilidad térmica del Inconel 718 y evidenciar su susceptibilidad a la formación de compuestos intermetálicos en regiones interdendríticas, proporcionando así un marco experimental idóneo para el análisis de la respuesta microestructural frente a sollicitaciones térmicas.



Figura 6 Horno tubular

Microscopía óptica

La caracterización óptica realizada a 50× y 100× permitió registrar un conjunto de micrografías de alta calidad, conformando una base de datos confiable para el análisis posterior mediante segmentación supervisada. Las imágenes revelaron contrastes bien definidos entre la matriz y las fases laves, particularmente en las regiones interdendríticas donde la fase Laves se distingue por su morfología irregular y su contraste característico respecto de la matriz circundante.

Las observaciones confirmaron la presencia de estructuras alineadas con la dirección de solidificación, así como zonas localizadas de enriquecimiento intermetálico que evidencian la heterogeneidad propia del proceso de LMD (Figura 7). La nitidez y resolución de las micrografías aseguraron condiciones idóneas para la anotación manual de regiones de interés y su posterior uso en el entrenamiento y validación de los modelos de segmentación automática.

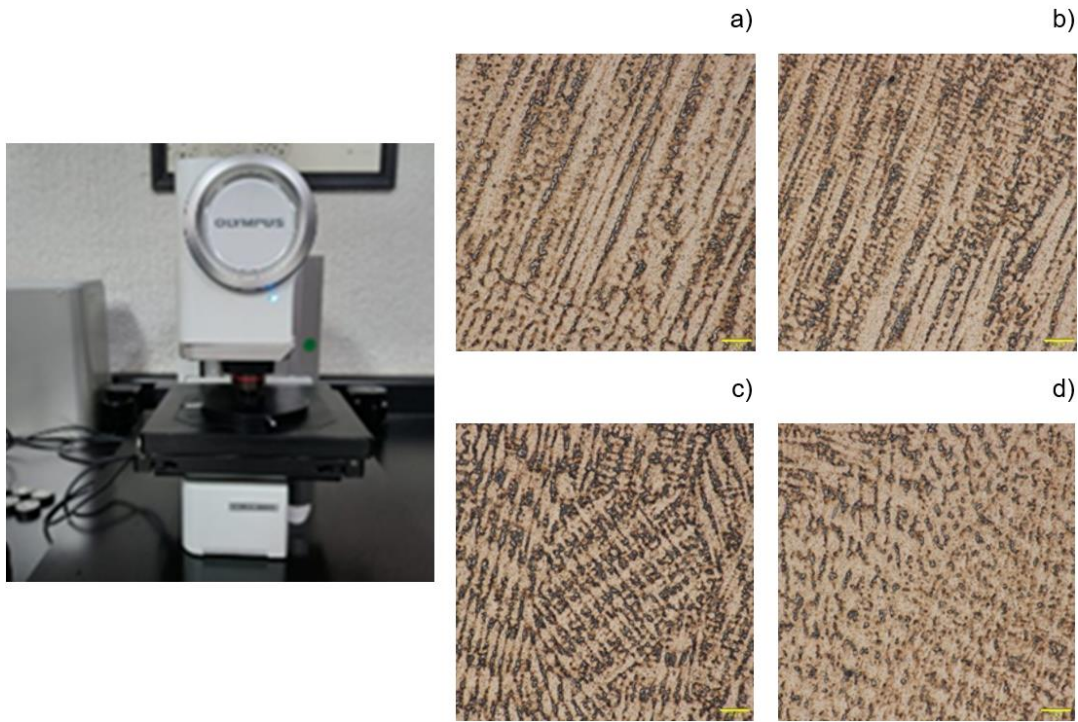


Figura 7 Microscopio óptico Olympus y metalografías

Procesamiento de imágenes y redes neuronales

La Figura 8 presenta la línea base de procesamiento clásico aplicada a micrografías ópticas de Inconel 718. La secuencia incluyó las etapas de conversión a escala de grises, ecualización de histograma, filtrado *top-hat*, suavizado, umbralización mediante el método de Otsu, operaciones morfológicas por apertura y

detección de contornos. Este flujo permitió realzar el contraste, atenuar componentes de alta frecuencia y segmentar regiones candidatas asociadas con la fase Laves.

En el panel superior izquierdo se reportaron magnitudes de área correspondientes a los contornos filtrados, junto con el área total de la imagen y el porcentaje relativo calculado. Estos valores ofrecieron una cuantificación directa de referencia, complementada con la evidencia visual de cada etapa de procesamiento. Los filtros identificaron preliminarmente zonas interdendríticas compatibles con la fase Laves; sin embargo, el resultado mostró alta sensibilidad al contraste local, reflejos y parámetros de segmentación (tamaño del elemento estructurante, umbrales), lo que derivó en la fragmentación de máscaras y la aparición de falsos positivos y negativos en regiones de bajo contraste. A pesar de mostrar resultados óptimos, no eran aceptables por lo cual se procedió a hacer uso de redes neuronales.

Con el fin de superar dichas limitaciones, se implementó la arquitectura UNetMini, entrenada con una función de pérdida compuesta *Binary Cross Entropy* + *Dice Loss*. El modelo alcanzó convergencia con una pérdida de validación de 0.2244. Las predicciones resultantes se representaron como máscaras binarias superpuestas en color rojo sobre las micrografías originales, lo que facilitó una interpretación cualitativa inmediata: continuidad de las regiones segmentadas a Inteligencia Artificial Para La Identificación Y Cuantificación De Fases En Inconel 718 Mediante Imágenes Metalográficas

lo largo de las interdendritas, reducción del ruido respecto a la línea base clásica y definición más nítida de bordes en gradientes suaves.

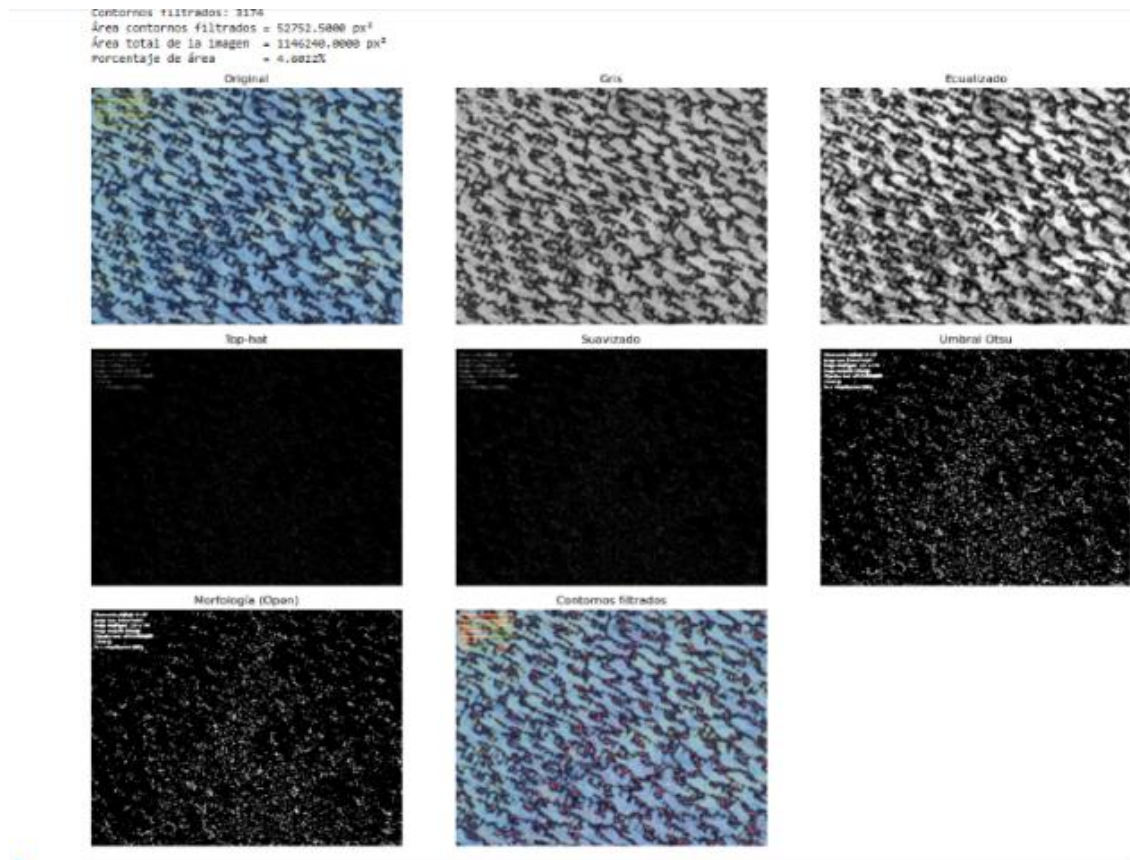


Figura 8 Metodología utilizada para la cuantificación de fases mediante uso de filtros

En paralelo, las curvas de desempeño (Dice, IOU, F2 y AUPRC), junto con collages generados por época, documentaron la mejora progresiva del modelo durante el entrenamiento. Estos resultados evidenciaron una mayor exactitud y robustez frente a variaciones en iluminación y textura, confirmando la superioridad del enfoque basado en aprendizaje profundo sobre los métodos clásicos de procesamiento de imágenes (Wang et al., 2022; Mazzucato et al., 2021).

Entrenamiento y desempeño del modelo

El modelo UNetMini, una variante ligera de la arquitectura U-Net diseñada para tareas de segmentación binaria, fue entrenado empleando un conjunto de micrografías ópticas redimensionadas a 256×256 píxeles y normalizadas en intensidad. Las máscaras de referencia se generaron a partir de anotaciones manuales en color rojo, posteriormente convertidas a formato binario para su uso en el entrenamiento supervisado.

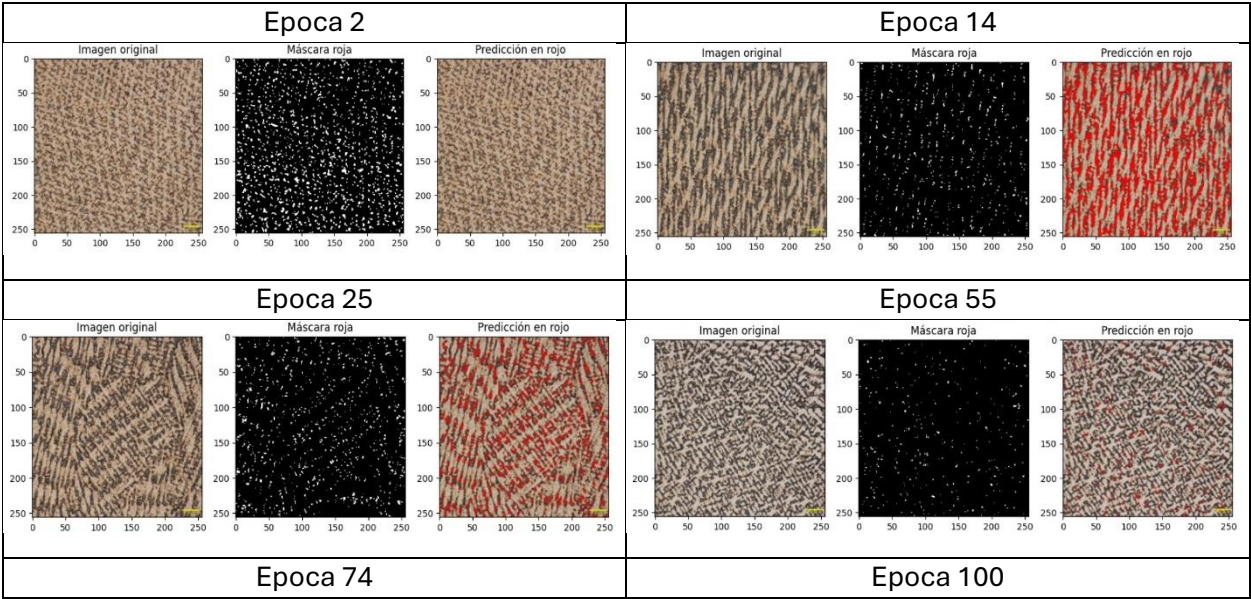
El entrenamiento se desarrolló durante 100 épocas, con un tamaño de lote de 2, utilizando el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje inicial de 1×10^{-3} . La función de pérdida Inteligencia Artificial Para La Identificación Y Cuantificación De Fases En Inconel 718 Mediante Imágenes Metalográficas

correspondió a una combinación balanceada de Dice Loss y Binary Cross-Entropy (BCE) (0.5/0.5). El cómputo se ejecutó en GPU (CUDA), recurriéndose a CPU únicamente en caso de indisponibilidad. Los hiperparámetros se sintetizan en la Tabla 1.

El modelo alcanzó una convergencia estable, registrando una pérdida mínima de validación de 0.2244 en el mejor *checkpoint*. La evolución del entrenamiento se documentó mediante la generación periódica de predicciones superpuestas a las micrografías originales, lo que permitió una evaluación cualitativa en paralelo con las métricas cuantitativas. En la Figura 9 se presentan ejemplos de predicciones en distintas épocas de entrenamiento. Se aprecia que, en las etapas iniciales (épocas 2, 14 y 25), las máscaras presentan sobresegmentación y ruido considerable. A medida que avanzó el entrenamiento (épocas 55 y 74), las predicciones mostraron mayor coherencia espacial y reducción de falsos positivos. Finalmente, en la época 100, el modelo alcanzó una segmentación más estable, con continuidad a lo largo de las interdendritas y una delimitación más precisa de las fases secundarias.

Tabla 1. Hiperparámetros empleados en el entrenamiento del modelo UNetMini

Parámetro	Valor
Tamaño de imagen de entrada	256 × 256 píxeles
Número de épocas	100
Tamaño de lote (<i>batch size</i>)	2
Optimizador	Adam
Tasa de aprendizaje inicial	1×10^{-3}
Función de pérdida	Dice Loss + BCE
Ponderación de pérdidas	0.5 (Dice) / 0.5 (BCE)
Dispositivo de cómputo	GPU (CUDA)



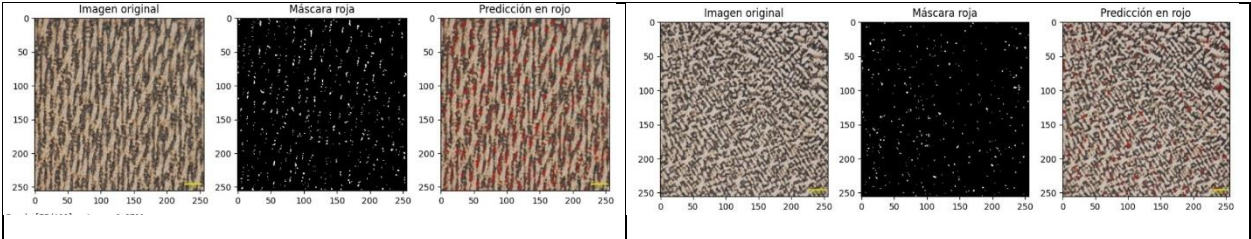


Figura 9 Ejemplos representativos de predicciones generadas por UNetMini en distintas épocas de entrenamiento (2, 14, 25, 55, 74 y 100). Cada conjunto muestra la micrografía original, la máscara de referencia en rojo y la predicción superpuesta.

Adicionalmente, la cuantificación de fases detectadas se realizó a partir de las máscaras resultantes. En la Error! Reference source not found. se ilustra un ejemplo con la medición del área total, área ocupada por las fases, porcentaje relativo, número de partículas segmentadas y tamaño promedio, lo que demuestra la capacidad del modelo para generar información cuantitativa complementaria de valor para el análisis microestructural.

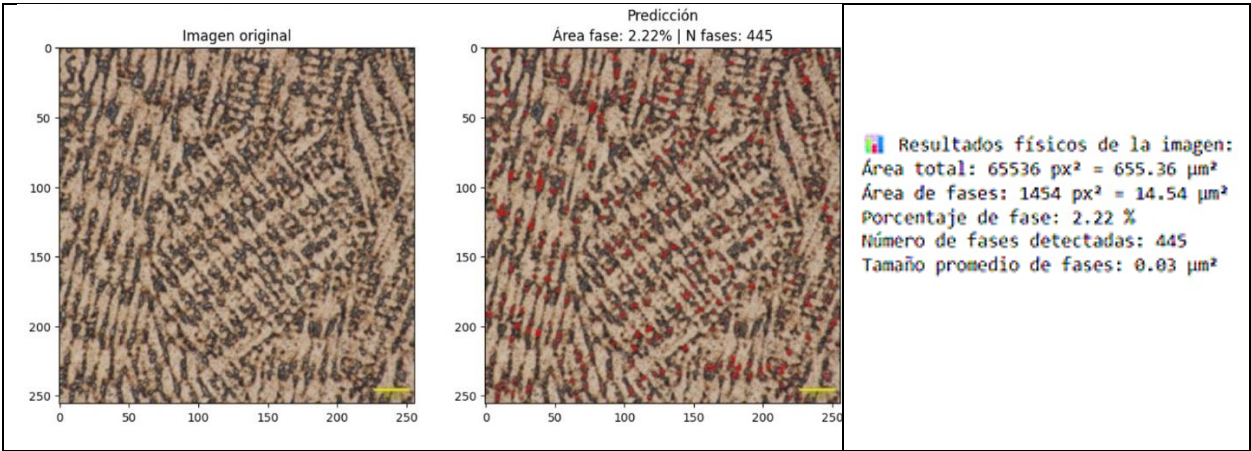


Figura 10 Ejemplo de cuantificación automática de la fase Laves a partir de la predicción del modelo. Se reportan área relativa, número de fases y tamaño promedio.

Resultados cuantitativos de la segmentación

El desempeño del modelo UNetMini fue cuantificado mediante métricas estándar de segmentación binaria: Dice coefficient, Intersection over Union (IoU), F2-score y Área bajo la curva de Precisión–Cobertura (AUPRC). Estas métricas se calcularon a lo largo de las 100 épocas de entrenamiento utilizando las salidas probabilísticas del modelo (umbral 0.5), permitiendo analizar la evolución del aprendizaje y la estabilidad de la arquitectura.

La Tabla 2 resume los valores obtenidos en las épocas más representativas. Se observa un progreso constante en la capacidad de segmentación, con un incremento sostenido de las métricas y una reducción progresiva de la pérdida de validación hasta alcanzar valores cercanos a 0.75 en Dice y 0.80 en AUPRC.

Tabla 2. Métricas de desempeño del modelo UNetMini en distintas etapas del entrenamiento

Época	Pérdida (Loss)	Dice	IoU	F2	AUPRC
-------	----------------	------	-----	----	-------

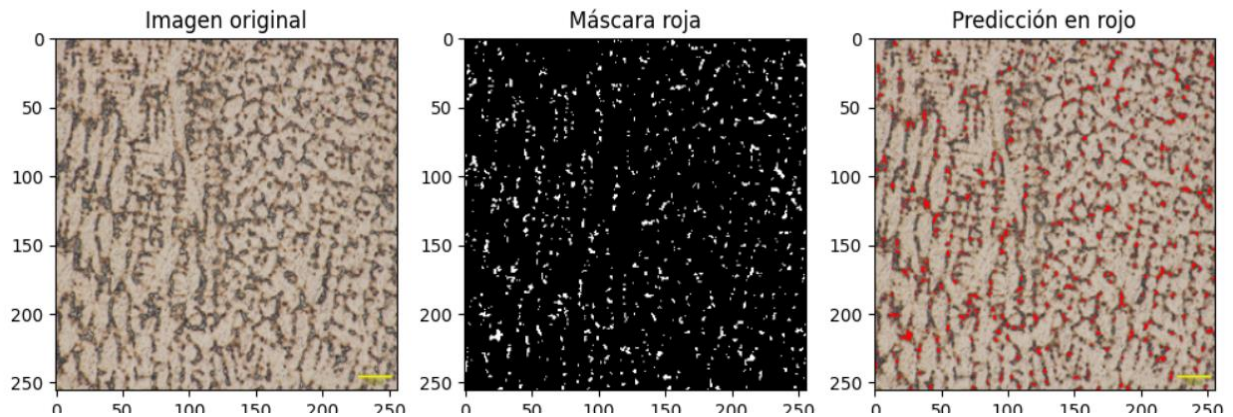


Figura 8 Ejemplo de predicción generada por UNetMini: (a) micrografía original, (b) máscara de referencia en rojo y (c) predicción superpuesta en rojo sobre la microestructura.

2	0.7027	0.31	0.19	0.35	0.42
14	0.4665	0.48	0.32	0.52	0.55
25	0.3907	0.56	0.39	0.60	0.61
38	0.3161	0.62	0.45	0.65	0.68
55	0.2836	0.67	0.50	0.70	0.72
74	0.2707	0.70	0.53	0.73	0.75
100	0.2251	0.75	0.58	0.77	0.80

La evolución de estas métricas se representa en la Error! Reference source not found., donde se observa una tendencia monótona de mejora en todas las métricas, con convergencia estable en torno a la época 100. Estos resultados validan la robustez de la arquitectura frente a variaciones locales de iluminación y textura, y demuestran su capacidad para preservar la continuidad de las regiones interdendríticas asociadas a la fase Laves.

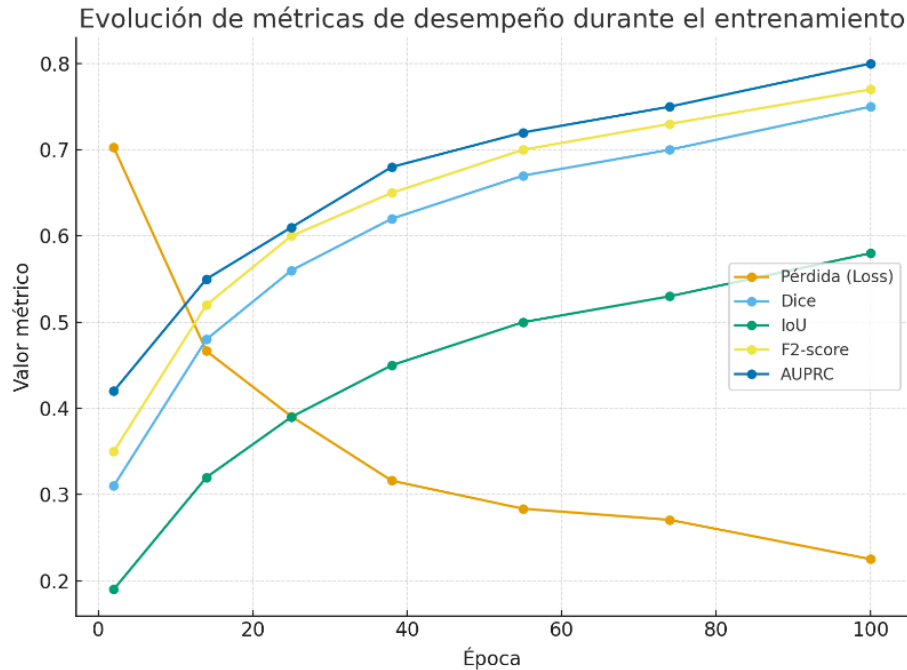


Figura 9 Evolución de las métricas de desempeño (Dice, IoU, F2 y AUPRC) y pérdida de validación durante el entrenamiento de UNetMini.

La figura 9 resume de manera gráfica la evolución del entrenamiento, mostrando la disminución de la pérdida y el incremento de las métricas de segmentación. Los resultados evidencian la robustez de UNetMini frente a variaciones locales de contraste e iluminación en las micrografías, así como su capacidad para preservar la morfología interdendrítica de las regiones enriquecidas en fase Laves.

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló y evaluó un sistema de inteligencia artificial para la detección y cuantificación de la fase Laves en micrografías ópticas de Inconel 718, integrando técnicas clásicas de procesamiento digital de imágenes con arquitecturas convolucionales tipo UNetMini. Los resultados confirmaron la estabilidad del entrenamiento, alcanzando una pérdida mínima de 0.2244, y evidenciaron la consistencia de las predicciones al superponer las regiones segmentadas en color rojo sobre las micrografías, lo que facilitó la interpretación cualitativa del microanálisis.

El enfoque propuesto demostró superar las limitaciones inherentes a los métodos convencionales de inspección manual o filtrado digital, aportando mayor reproducibilidad, escalabilidad y reducción del sesgo asociado al operador. La arquitectura UNetMini mostró capacidad para preservar la morfología y la distribución espacial de la fase Laves, aunque se identificaron limitaciones en áreas con bajo contraste o afectadas por artefactos metalográficos.

Los resultados obtenidos establecen una base metodológica sólida para la automatización del análisis microestructural en superaleaciones base níquel, y abren la posibilidad de integrar

estrategias complementarias tales como aumento de datos, ensamblado de modelos y validación cruzada, con el objetivo de mejorar la capacidad de generalización y robustez del sistema.

Más allá del caso particular de Inconel 718, la estrategia presentada es transferible a la detección de otras fases críticas y a diferentes sistemas de aleaciones procesadas mediante manufactura aditiva. En este sentido, constituye un aporte relevante al desarrollo de metrología digital e inteligencia artificial en el marco de la Industria 4.0, con impacto directo en la confiabilidad, trazabilidad y optimización de componentes aeroespaciales y energéticos.

Agradecimientos: Nuestro agradecimiento al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por proporcionarnos el espacio y herramientas necesarias para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Referencias

- Farias, J., Silva, R., & Torres, M. (2024). Microstructural characterization of Inconel 718 fabricated by laser metal deposition. *Journal of Materials Science*, 59(4), 2456–2470. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-01756-1>
- MDPI. (2020). Phase fraction analysis of Inconel 718 in additive manufacturing. *Materials*, 13(18), 4123. <https://doi.org/10.3390/ma13184123>
- Schirra, M., Pollock, T., & David, S. (1991). Laves phase formation and mechanical properties in nickel-based superalloys. *Metallurgical Transactions A*, 22(12), 3043–3055. <https://doi.org/10.1007/BF02646329>
- Wang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2022). Automated segmentation of microstructures using U-Net in superalloys. *Computational Materials Science*, 200, 110767. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110767>
- Mazzucato, F., Forni, D., Valente, A., & Cadoni, E. (2021). Laser metal deposition of Inconel 718 alloy and as-built mechanical properties compared to casting. *Materials*, 14(2), 437. <https://doi.org/10.3390/ma14020437>

La Mecatrónica Y Su Educación En El Contexto De Las Industrias 4.0 Y 5.0

Eusebio Jiménez López¹, Aldo Augusto López Martínez², Baldomero Lucero Velázquez³, Luis Andrés García Velásquez⁴, Alex Corral Verdugo⁵ y Jorge Osvaldo Rivera Nieblas⁶

¹ Instituto Tecnológico Superior de Cajeme-Universidad La Salle Noroeste, Carretera Internacional a Nogales Km. 2 s/n, 85024, Sonora, México

² Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125, Querétaro, México

³ Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Carretera Internacional a Nogales Km. 2 s/n, 85024, Sonora, México

⁴ Universidad La Salle Noroeste, Calle Veracruz 1800 Norte, 85019, Sonora, México

⁵ Universidad Tecnológica del Sur de Sonora-ULSA Noroeste, Dr. Norman E. Borlaug Km. 14, 85000, Sonora, México

⁶ Instituto Tecnológico de Hermosillo, Av. Tecnológico 115, 83170, Sonora, México
ejimenezl@msn.com

Resumen. La ingeniería mecatrónica fue la base de la Tercera Revolución Industrial y en la actualidad soporta el desarrollo de las Industrias 4.0 y 5.0. La mecatrónica proporciona la integración hardware/software que es el soporte de diversos dispositivos, máquinas y sistemas de producción que predominan en los tres últimos paradigmas industriales. Con la integración hardware/software, el procesamiento de datos y la conectividad que proporcionan algunas tecnologías emergentes y disruptivas de la Cuarta Revolución Industrial, es posible desarrollar sistemas inteligentes, sistemas ciberfísicos y gemelos digitales. Por su parte, la Educación en Ingeniería Mecatrónica debe modernizarse para que pueda formar a los ingenieros mecatrónicos que le harán frente a los retos y desafíos de las Industrias 4.0 y 5.0. En este artículo se presentan las premisas fundamentales de las tres últimas revoluciones industriales y se analiza la importancia de la ingeniería mecatrónica en las Industrias 4.0 y 5.0. Finalmente, se estudian los paradigmas educativos: Educación en Ingeniería 4.0 y 5.0, los cuales orientan a la educación en ingeniería mecatrónica hacia su actualización.

Palabras Clave: Mecatrónica, Industria 4.0, Educación en Ingeniería, Industria 5.0.

1. Introducción.

Actualmente el mundo industrial está siendo influenciado por tres revoluciones industriales y dos transiciones, lo que trae consigo cambios y disrupciones frecuentes en los centros de trabajo y de producción, así como en algunos contextos no industriales, como por ejemplo la educación. La Industria 4.0 tuvo su inicio en el año 2011 en Alemania (Shlenova *et al.*, 2025), debido a la introducción de diversas tecnologías disruptivas como el internet de las cosas (IoT), la ciberseguridad, el cómputo en la nube, el big data, la inteligencia artificial (AI) y la robótica, entre otras, en los procesos productivos. Por su parte, en el año 2020 dio inicio la Industria 5.0 (Rijwani *et al.*, 2025), cuya visión enmarca la simbiosis hombre-máquina. Es otras palabras, este paradigma industrial promueve la participación activa de los seres humanos en la producción en conjunto con las máquinas inteligentes.

A causa de que, tanto la Industria 4.0 como la Industria 5.0 son paradigmas industriales que no tienen más de 20 años de diferencia, el cambio tecnológico de la Industria 3.0 iniciado en el año

1969 (Leong, 2025), no se ha dado aún en forma completa, por lo que existe un considerable número de máquinas y de sistemas de producción en las empresas de todo el mundo en donde su diseño, fabricación, control y operación dependen de las premisas de la Industria 3.0. Debido a la presencia de las tres revoluciones industriales mencionadas anteriormente, existen dos transiciones: la Industria 3.5 y la Industria 4.5 (Jiménez *et al.*, 2024a), que representan modelos de gestión y desarrollo tecnológico que buscan que diversas máquinas de la Industria 3.0 puedan ser convertidas a máquinas visionadas desde el paradigma de la Industria 4.0. De igual manera, la Industria 4.5 busca transformar máquinas y sistemas de producción de la Industria 4.0 a la Industria 5.0.

Por su parte, la ingeniería mecatrónica, desde su inicio en el año 1969 en Japón (Cintra y Macedo, 2023), ha proporcionado un soporte técnico y de diseño a las tres revoluciones industriales activas y a sus transiciones. Desde el desarrollo de algunos sistemas mecatrónicos avanzados como el disco duro, los robots industriales y diversas máquinas herramientas operadas por Control Numérico por Computadora (CNC), hasta su colaboración con la integración hardware/software en diversas aplicaciones de las Industrias 4.0 y 5.0, la ingeniería mecatrónica se ha transformado en una disciplina muy importante y esencial en las transformaciones industriales de los últimos 50 años.

Las revoluciones industriales activas no solo han provocado cambios en los sistemas de producción, también han impulsado transformaciones profundas en áreas como la medicina, la minería, la agricultura, la energía y la educación, entre otras. Con respecto a la educación los cambios se están suscitando en la introducción de nuevas tecnologías a los salones de clase, en la adopción de algunos métodos pedagógicos activos, en la automatización de los procesos administrativos de los profesores y en el diseño de las competencias, entre otras (Jiménez *et al.*, 2024a). Los conceptos de “educación 4.0” y “educación 5.0” nacieron para ayudar a las universidades a direccionar sus objetivos de cambio hacia los nuevos paradigmas industriales. De hecho, la educación 4.0, que integra tecnologías emergentes y estrategias innovadoras, tiene como objetivo preparar a las nuevas generaciones para un mundo tecnológicamente fluido (Cintra y Macedo, 2023). Por su parte, la educación 5.0 es un enfoque innovador de la educación que integra tecnología avanzada y las últimas metodologías de aprendizaje para crear un entorno o contexto ideal de aprendizaje centrado en el estudiante (Judijanto y Wardhana, 2025). Un área especializada de la educación direccionada hacia la Industria 4.0, es la “educación en ingeniería 4.0”, la cual se orienta a la educación, formación y entrenamiento de los ingenieros que enfrentarán los retos y los desafíos de la Cuarta Revolución Industrial (Jiménez *et al.*, 2024a). De la misma manera, para impulsar el desarrollo de la Industria 5.0 se ha propuesto el término: “educación en ingeniería 5.0”. Esta visión de la ingeniería moderna va más allá del desarrollo tecnológico y sus aplicaciones ya que promueve la ética y el humanismo como conceptos clave en los nuevos ingenieros (Lantada, 2022).

Bajo este contexto, la educación de los ingenieros mecatrónicos debe adaptarse no solo a la influencia de las tres revoluciones industriales y a sus transiciones en términos tecnológicos, sino que debe orientarse hacia las visiones de las educaciones en ingeniería 4.0 y 5.0. En este artículo se presentan las premisas de las tres últimas revoluciones industriales las cuales se encuentran activas y se analiza el papel que juega la mecatrónica en la implementación de las Industrias 4.0 y 5.0. Finalmente, se analiza la educación de ingeniería mecatrónica y su actualización hacia los nuevos paradigmas industriales vigentes.

2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en este trabajo fue tipo exploratoria-cualitativa y se usaron bases de datos científicas tales como Scopus, Springer home y google académico, entre otras, para recolectar la información relevante.

2.1. Aspectos técnicos de las revoluciones industriales activas

El mundo actual está bajo la influencia de tres revoluciones industriales y cada de una de ellas tiene aspectos técnicos específicos que las diferencian (Jiménez *et al.*, 2024a). La Tercera Revolución Industrial inició a finales de la década de 1960 por la presencia de algunas tecnologías disruptivas, como la electrónica, la computadora digital, las Tecnologías de la Comunicación y la Información (TCIs) y el PLC (Programmable Logic Controller), esta última fue una de las tecnologías base de la automatización industrial, entre otras. De hecho, este paradigma industrial se considera como el paso de la tecnología mecánica y electrónica analógica a la electrónica digital (Mohajan, 2021). La influencia de la Industria 3.0 continua hasta el día de hoy, pero como todo paradigma industrial tuvo su auge en las cuatro últimas décadas desde su aparición en el año 1969. Este paradigma industrial impuso algunas consideraciones técnicas a las tecnologías y a los productos bajo las siguientes premisas:

- 1) La producción en serie pasó a la producción flexible.
- 2) Se aceleró la digitalización por computadora.
- 3) La industria inició su proceso de informatización.
- 4) La tecnología mecánica y la electrónica analógica se transformaron a la electrónica digital.
- 5) La automatización se volvió programable.
- 6) La eficiencia energética y la producción esbelta se volvieron imprescindibles.

La Figura 1 muestra algunos ejemplos de las tecnologías y los productos que se basaron y se basan actualmente en las premisas de la Industria 3.0.

Los productos y las tecnologías de la Tercera Revolución Industrial se caracterizan por tener: 1) una automatización convencional, 2) una mediana digitalización, 3) se utilizan para la producción en masa, 4) poseen una baja o nula inteligencia, 5) por lo general se configuran manualmente y 6) no están conectadas a la nube.

Por su parte, la Industria 4.0 se gestó en el año 2000 y fue hasta el año 2011 en que se dio a conocer por primera vez en Alemania. La introducción a los sistemas de producción industrial de tecnologías tales como: el big data, la computación en la nube, la ciberseguridad, el IoT, la AI y la robótica avanzada, entre otras, dieron origen a la Cuarta Revolución Industrial. Este nuevo paradigma industrial impulsó las aplicaciones de la AI orientadas a mejorar por mucho el rendimiento y las capacidades de las máquinas y los sistemas productivos, y transformó en forma masiva la digitalización de las empresas y compañías. Los cambios y las transformaciones que provocó la Industria 4.0 fueron de forma y de fondo y no un simple cambio de tecnologías por otras más avanzadas. De hecho, el ideal de la Industria 4.0 es la concepción y el inicio de las “fábricas inteligentes” (Smart factories), descritas como “una planta de fabricación altamente automatizada de la Industria 4.0 que utiliza tecnologías sofisticadas, como la IA, la computación en la nube, el IoT y la robótica, para optimizar sus operaciones y mejorar su eficiencia, la productividad y la calidad” (Soori, Arezoo y Dastres, 2023, p. 192).

En el ámbito de las aplicaciones de la Industria 4.0, existen 35 tecnologías disruptivas que están interactuando con los sistemas productivos de las empresas, 12 se consideran de importancia y nueve conforman sus pilares los cuales se muestra en la Figura 2. Al igual que la Industria 3.0, la Industria 4.0 se basa en premisas que guían su implementación, las cuales son siguientes:

- 1) La alta digitalización es la esencia de la Industria 4.0.
- 2) La fábrica inteligente es el ideal de la Cuarta Revolución Industrial.

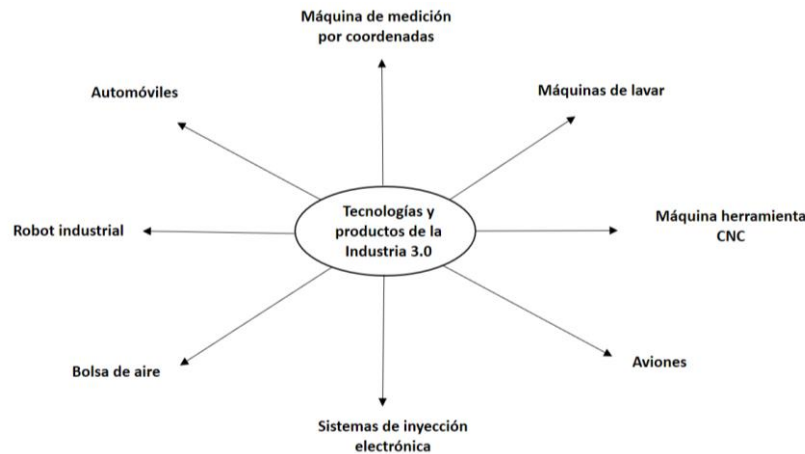


Figura 1. Productos, máquinas y sistemas concebidos bajo las premisas de la Industria 3.0.

- 3) La AI se centra en mejorar las capacidades y el rendimiento de las máquinas y sistemas productivos.
- 4) La Cuarta Revolución Industrial promueve la hiperautomatización.
- 5) La Industria 4.0 promueve la hiperconectividad.
- 6) La visión de los sistemas de producción es hacia la personalización.

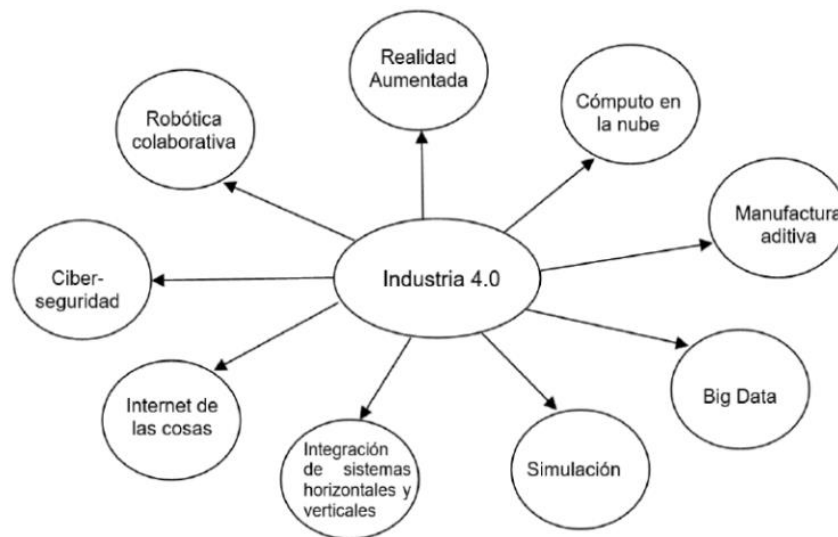
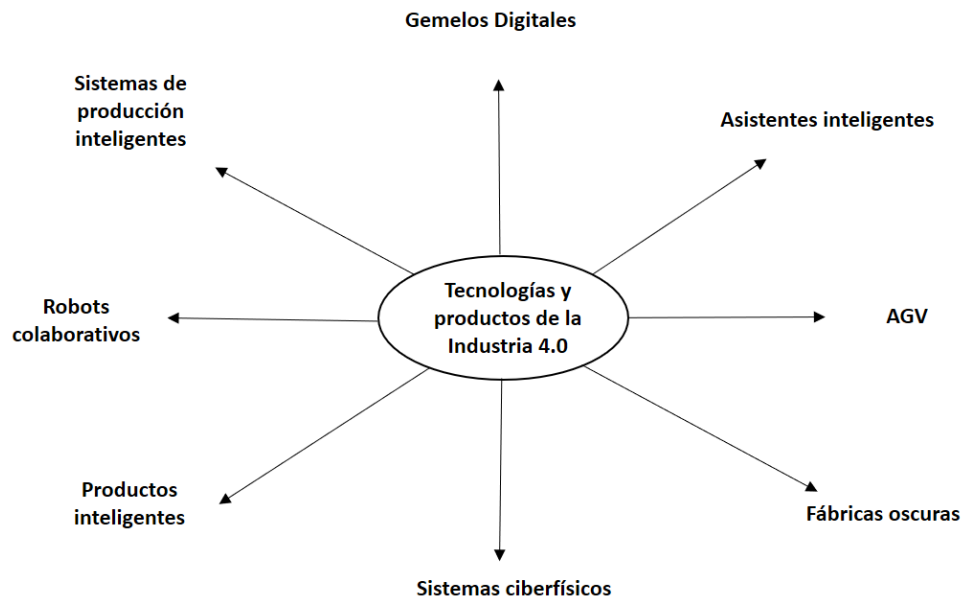


Figura 2. Los nueve pilares de la Industria 4.0 (Hernandez *et al.*, 2019).

La Figura 3 muestra algunos ejemplos de las tecnologías y los productos desarrollados bajo las premisas de la Industria 4.0.

Las máquinas, dispositivos, productos y sistemas concebidos bajo la visión y las premisas de la Industria 4.0, se caracterizan por ser: 1) altamente digitalizadas, 2) conectadas a la nube, 3) la producción es personalizada, 4) son hiperautomatizadas, 5) se autoconfiguran, 6) desarrollan acciones inteligentes, 7) pueden ser sujetas a mantenimiento predictivo, 8) son sustentables, 9) se autooptimizan y 10) se autodiagnostican (Liagkou *et al.*, 2021).

**Figura 3.** Productos, máquinas y sistemas concebidos bajo las premisas de la Industria 4.0.

Por otro lado, debido a que la Industria 4.0 desplaza a los trabajadores de las industrias y da prioridad a las máquinas y a la hiperautomatización, en el año 2020 se inició la Quinta Revolución Industrial (San y Kakani, 2025). Este nuevo paradigma industrial tiene la misión de integrar nuevamente a los trabajadores al centro de la producción bajo esquemas de colaboración con las máquinas, da prioridad a las prácticas sustentables y propone una mejor distribución social de la riqueza. En la Industria 5.0 la AI se ha orientado hacia el ser humano buscando producir una sinergia entre el hombre y la máquina, de manera que ambos sujetos (el humano y el robot), puedan colaborar y mejorar el rendimiento del trabajo. La Industria 5.0 hereda algunas de las tecnologías de la Industria 4.0 y añade nuevos elementos (ver la Figura 4).

La Quinta Revolución Industrial hereda algunas premisas de la Industria 4.0 y propone otras, que están principalmente asociadas con las características humanas, sustentables y sociales. Dichas premisas son las siguientes:

- 1) La cooperación humano-máquina es el centro de la automatización en la Industria 5.0.
- 2) La AI se orienta a la mejora de las capacidades y el rendimiento de los seres humanos integrados a las máquinas y sistemas de producción.

- 3) Las prácticas sustentables son una prioridad en la Industria 5.0.
- 4) La Industria 5.0 promueve la hiperconectividad.
- 5) La visión de los sistemas de producción es hacia la hiperpersonalización.
- 6) Los sistemas de producción deben ser resilientes.

Algunos ejemplos de las tecnologías y los productos de la Industria 5.0 se muestra en la Figura 5.

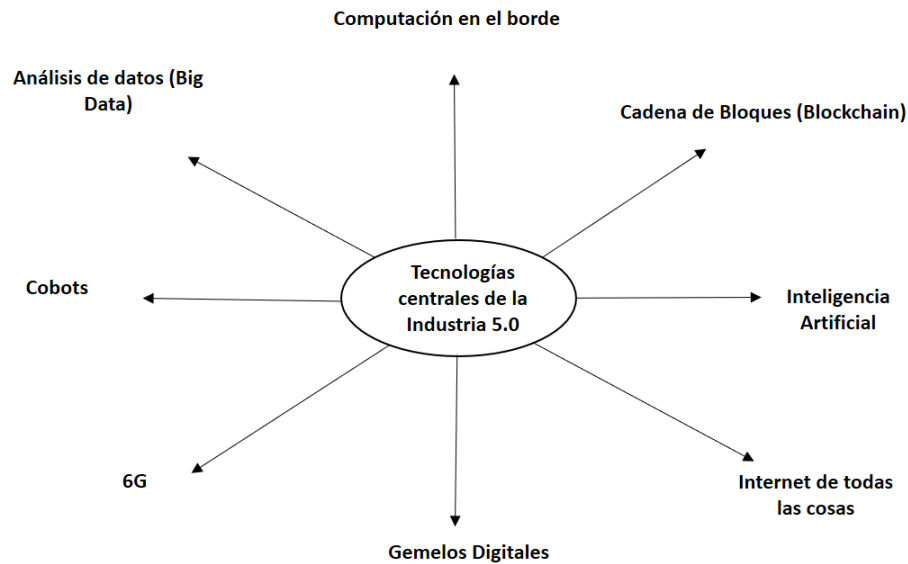


Figura 4. Tecnologías centrales de la Quinta Revolución Industrial (Maddikunta *et al.*, 2022).

Las máquinas, dispositivos, productos y sistemas concebidos bajo la visión y las premisas de la Quinta Revolución Industrial, heredan algunas características y consideraciones técnicas de la Industria 4.0 y añaden otras, esto es: 1) son altamente digitalizadas, 2) se hiperconectan a la nube, 3) la producción es hiperpersonalizada, 4) las máquinas son hiperautomatizadas integrando al ser humano en el centro de la producción, 5) se autoconfiguran, 6) realizan acciones inteligentes, 7) el mantenimiento tiende a ser predictivo, 8) los productos se diseñan y operan bajo prácticas sustentables y 9) las máquinas se autooptimizan.

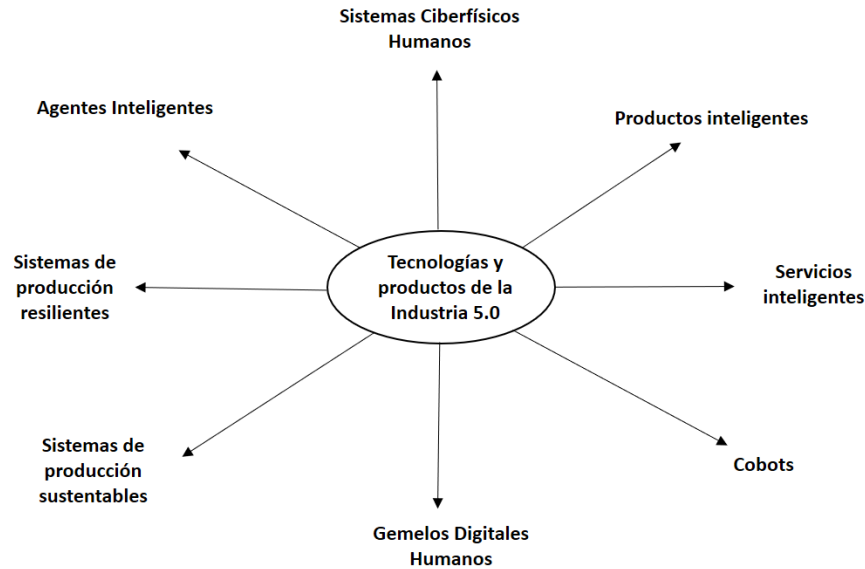


Figura 5. Tecnologías y productos de la Industria 5.0.

2.2 Aspectos técnicos de las transiciones entre revoluciones industriales

El paso o migración de una revolución industrial a otra no es una tarea simple para las empresas, ya que implica invertir en tecnología, capacitación y en infraestructura, entre otros conceptos. Una estrategia que se utiliza para acompañar a las empresas a transformarse de la visión de la Tercera Revolución Industrial a la Industria 4.0 es la “Industria 3.5” (Chien, Hong y Guo, 2017). En términos generales, la Industria 3.5 se puede concebir como una estrategia híbrida entre la Industria 3.0 y la Cuarta Revolución Industrial, que consiste en actualizar el sistema de fabricación existente con el análisis de macro datos y mejorar los procesos para la toma de decisiones de la industria (Chien *et al.*, 2018). Para el reacondicionamiento tecnológico de los sistemas de producción y la maquinaria, se ha utilizado una técnica llamada “Actualización Inteligente” o Smart Retrofitting (Jiménez *et al.*, 2023). Con esta técnica las máquinas, los dispositivos y las líneas de producción concebidos bajo la visión de la Industria 3.0 pueden transformarse en activos de la Industria 4.0.

Este proceso de reconversión exige conocimientos técnicos y tecnologías tales como el IoT, redes, sensórica y computación en la nube, entre otras. El Smart Retrofitting abarca: 1) el retrofitting tradicional y 2) el retrofitting digital. El primero se refiere a la reconversión de la maquinaria con mejoras en sus sistemas y mecanismos, y la segunda hace énfasis en la adaptación de sistemas de sensado a las máquinas, procesamiento de señales, software y conexión a la nube. Con este método es posible reconfigurar los sistemas de producción concebidos bajo la visión de la Tercera Revolución Industrial hacia los objetivos y los propósitos de la Industria 4.0 a un costo menor aprovechando la tecnología adquirida con anterioridad.

Por su parte, la actualización tecnológica de la Cuarta Revolución Industrial a la Industria 5.0 se le conoce como Industria 4.5 o Industria 4.0+ (Xu *et al.*, 2021). Esta transición tiene dos aspectos fundamentales: 1) la parte tecnológica y 2) el cambio de paradigma que implica la restitución del ser humano al centro de la producción sustentable y resiliente. Al respecto, Saniuk *et al.*, (2022)

mencionan que el proceso de transición de la Cuarta Revolución Industrial a la Industria 5.0 debe tomar en cuenta aspectos sociales clave y dirigir la atención en tres áreas de desarrollo: 1) centrado en el ser humano (la simbiosis máquina-hombre), 2) sostenible (uso de las mejores prácticas sostenibles) y 3) resiliente (con capacidad de recuperación ante estímulos externos), centrándose en los principios de la calidad de la vida y del desarrollo sostenible sostenido. Por otro lado, los retos que presenta la transición tecnológica, particularmente la nueva reinserción del ser humano en los sistemas de producción, no son nada sencillos. En este proceso, el redireccionamiento de la AI hacia la mejora de las habilidades y las capacidades del hombre y su integración con las máquinas será un factor clave para lograr la transición.

2.3 La mecatrónica como base de las revoluciones industriales activas y sus transiciones

En el año 1969, justo cuando inició la Tercera Revolución Industrial, nació el concepto de “mecatrónica” en Japón (Cintra y Macedo, 2023). A partir de esa fecha, la mecatrónica ha dado y sigue dando soporte vital a los tres últimos paradigmas industriales y a sus transiciones. Desde el desarrollo de sistemas sofisticados como lo es el disco duro (hard disk) de una computadora en la Industria 3.0 y el diseño de máquinas inteligentes en la Cuarta Revolución Industrial, hasta el diseño de los gemelos digitales humanos en la Industria 4.0, la mecatrónica y su metodología de diseño han proporcionado diversos sistemas, máquinas y dispositivos especializados cuya base de desarrollo es la integración y la sinergia de la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, el control y la computación. La mecatrónica es una disciplina especializada que ha proporcionado la integración “software/hardware” a los distintos paradigmas industriales ya que dicha integración es el soporte de la automatización y del control de diversos aparatos, máquinas, sistemas inteligentes y de las líneas de producción. De esta manera fue posible desarrollar los primeros robots industriales, sistemas mecatrónicos automotrices, productos mecatrónicos inteligentes, máquinas y sistemas CNC y, posteriormente, sistemas ciberfísicos, gemelos digitales, cobots y sistemas ciberfísicos humanos, entre otros productos y sistemas generados en los tres últimos paradigmas industriales.

Por su parte, la mecatrónica es de suma importancia en los procesos de transición de las revoluciones industriales. Muchos proyectos de reconversión tecnológica orientados a la visión de la Industria 4.0 requieren de mejoras mecatrónicas de las máquinas, dispositivos y sistemas productivos.

La instalación de sensores en lugares específicos de las máquinas, el procesamiento de las señales en los microprocesadores y PLCs, la administración de los datos mecatrónicos y la actualización de diversos softwares, son algunas tareas de la ingeniería mecatrónica. De hecho, la instalación de la capa del IoT, la configuración de los distintos ruteadores y la administración de los servicios en la nube, son también actividades que la ingeniería mecatrónica debe desarrollar, sin olvidar que un proyecto de Smart Retrofitting es, en general, mecatrónico. Con respecto a la transición de la Cuarta Revolución Industrial a la Industria 5.0, la mecatrónica juega un papel relevante, ya que la integración de los trabajadores a los centros de producción requiere del diseño de sistemas software/hardware en dónde el ser humano pasa a ser representado por un activo en los sistemas ciberfísicos humanos y en los gemelos digitales humanos. En la Figura 6 se presenta un esquema de la ingeniería mecatrónica y su relación con las revoluciones industriales y sus transiciones.

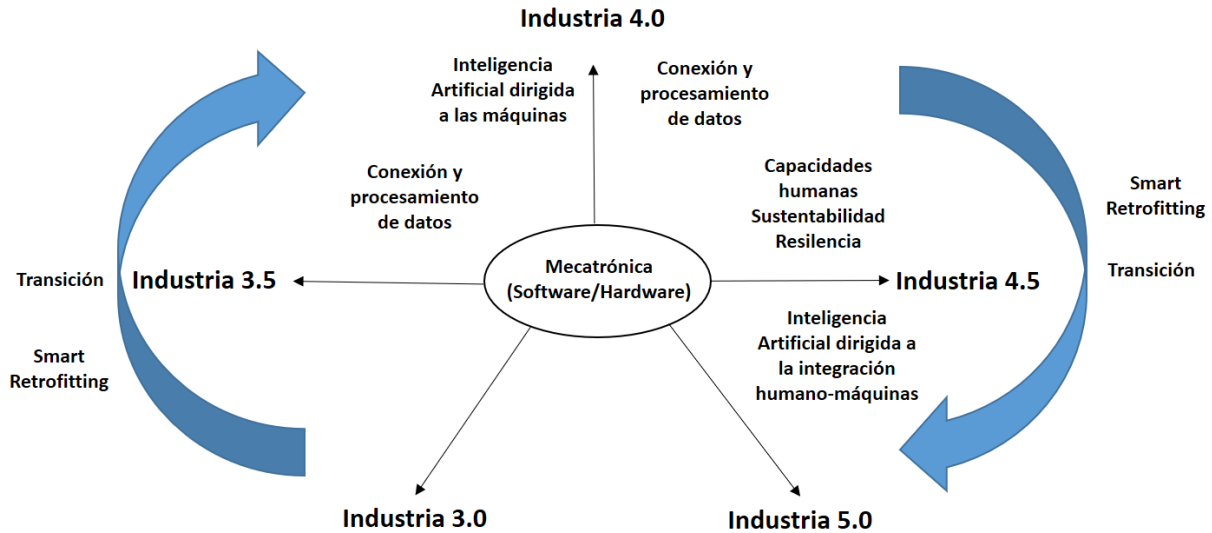


Figura 6. La mecatrónica y sus relaciones con las tres últimas revoluciones industriales y sus transiciones.

La mecatrónica desarrolla la integración software/hardware, que es la base del control y la automatización de diversas máquinas y sistemas productivos, mientras que la Cuarta Revolución Industrial, por medio de diversas tecnologías emergentes y disruptivas, propone y promueve la conectividad y el procesamiento de datos integrando un sistema tecnológico sofisticado de desarrollo para diversas aplicaciones. Esta integración de recursos y tecnologías da como resultado el desarrollo de los sistemas ciberfísicos y los gemelos digitales, así como la construcción de diversas tecnologías de las Industrias 4.0 y 5.0.

2.4 La actual educación de los ingenieros

La educación en ingeniería es fundamental para implementar los proyectos de la Industria 4.0 (Jiménez *et al.*, 2024b), ya que es la responsable de educar y formar a los ingenieros para resolver problemas de este paradigma industrial. Para poder orientar la educación en ingeniería hacia los objetivos de la Industria 4.0 se ha propuesto el término “educación en ingeniería 4.0” (Jiménez *et al.*, 2024a). Este enfoque busca orientar los cambios educativos que deben darse para poder transformar la educación de los ingenieros 3.0 a los ingenieros 4.0. Para lograrlo, la educación en ingeniería toma como referencia principal los pilares de la educación 4.0, los cuales se muestran en la Figura 7.

Las universidades deben motivar la inserción de aquellas tecnologías disruptivas que impulsen y mejoren la educación en ingeniería, como la realidad aumentada, la realidad virtual, la AI, el metaverso y las Tecnologías de la Comunicación y la Información educativas, entre otras. Además, se requiere introducir nuevas pedagogías y/o mejorar las ya existentes para que, en conjunto con las tecnologías disruptivas, potencialicen la educación en ingeniería. La educación basada en competencias, el aula invertida, la gamificación, el STEAM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería Arte y

Matemáticas) y las metodologías activas, son algunas pedagogías y métodos educativos que deben ser incorporados a la educación en ingeniería.

Por otro lado, las universidades deben diseñar nuevos curriculums o planes de estudio acordes con las necesidades que plantean las Industrias 4.0 y 5.0. Cabe mencionar que en el desarrollo y el análisis de los nuevos planes de estudio se debe contemplar que el mundo industrial está inmerso en tres revoluciones industriales y dos transiciones, y que la actualización de la educación debe ser planeada y alineada con los ejes de las tres revoluciones industriales activas. Por su parte, la infraestructura universitaria debe mejorarse para poder brindar las condiciones óptimas para que los ingenieros 4.0 puedan formarse, esto incluye la mejora de los laboratorios, la actualización de las redes y la inserción de nuevas tecnologías educativas. La Figura 8 muestra un concentrado sobre algunas de las tecnologías disruptivas, la infraestructura, las TCI's educativas y los métodos educativos que deben ser considerados en la educación en ingeniería 4.0.

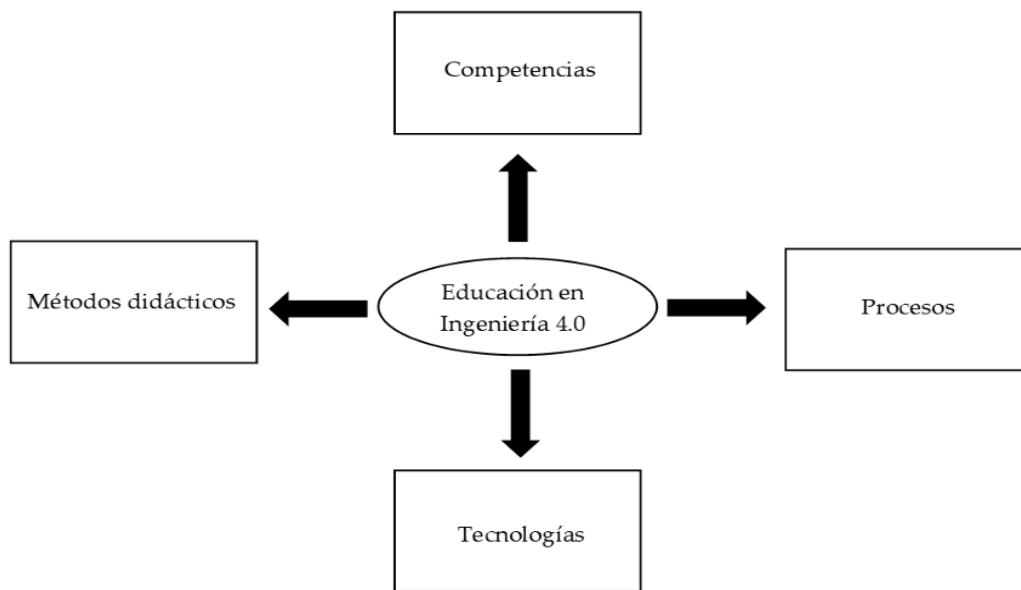


Figura 7. Pilares de la educación en ingeniería 4.0 (Adaptada de Ioniță *et al.*, 2023).

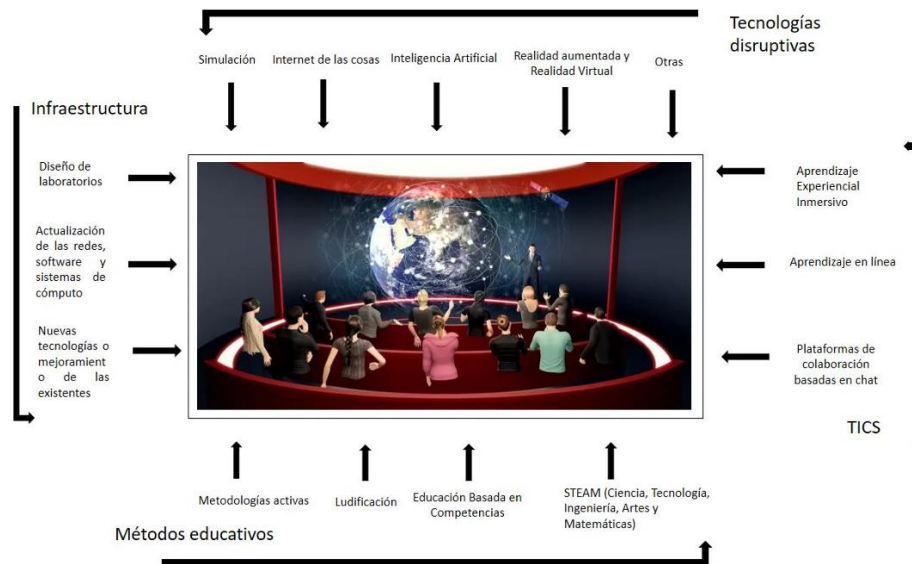


Figura 8. Elementos tecnológicos, educativos y de infraestructura de la educación en ingeniería 4.0 (Tomada de Jiménez *et al.*, 2025).

Para hacerles frente a los retos y desafíos de las Industrias 4.0 y 5.0, se requiere el diseño de nuevas competencias y el desarrollo de habilidades blandas y técnicas. Una de las tareas fundamentales que debe realizar la educación en ingeniería 4.0 es el diseño y el desarrollo de las competencias para el ingeniero 4.0. Esta tarea debe tomar en cuenta las experiencias de aquellas empresas e industrias que ya hayan transitado por esquemas operativos de la Industria 4.0.

En un trabajo desarrollado por Sakurada *et al.*, (2021), se desarrolló un catálogo relacionado con 100 nuevos perfiles laborales que demandan las empresas con experiencia en la Industria 4.0. El desarrollo de este catálogo se diseñó en función de las competencias técnicas y blandas, el tipo y el nivel del perfil, así como la frecuencia de la demanda. El catálogo se desarrolló estudiando los siguientes sectores tecnológicos: 1) manufactura aditiva, 2) cobots, 3) mecatrónica y automatización de máquinas, 4) analítica de datos, 5) ciberseguridad y 6) interface hombre-máquina. La Tabla 1 muestra un extracto del catálogo de los nuevos perfiles profesionales propuestos por Sakurada *et al.*, (2021).

Tabla 11. Extracto de los nuevos perfiles profesionales.

Sectores analizados	Perfil del trabajo	Número de perfiles
Manufactura Aditiva	Técnico de impresoras 3D, Ingeniero de modelado, Experto en modelos 3D, Ingeniero en biomicrofabricación, Experto en ingeniería modular, Ingeniero de construcción y fabricación	17

	digital y Especialista en gestión de relaciones con los clientes, entre otros.	
Cobots	Experto en robótica inteligente, Técnico de cobots, Director del proyecto I4.0, Experto en cobots y Desarrollador de cobots industriales, entre otros.	11
Analítica de datos	Analista de datos, Ingeniero de Inteligencia Artificial, Ingeniero de análisis de datos de procesos industriales, Arquitecto de gemelos digitales, Especialista en economía circular, Arquitecto de Industria 4.0 y Gestor de servicios en la nube, entre otros.	28
Ciberseguridad	Arquitecto de ciberseguridad, Análisis del panorama de amenazas, Especialista en vigilancia de la seguridad y Experto en Blockchain, entre otros.	16
Mecatrónica y automatización de máquinas	Arquitecto de Sistemas Ciberfísicos, Desarrollador de sensores inteligentes, Programador de PLCs, Diseñador de fábricas inteligentes, Experto en programación y planificación, Experto en evaluación del funcionamiento de fábricas e Ingeniero en Internet de las Cosas, entre otros.	15
Interface Hombre-Máquina (HMI)	Operador 4.0, Operador más inteligente, Desarrollador de realidad virtual y aumentada,	13

	Ingeniero de software de realidad ampliada y Diseñador de sistemas virtuales de fábrica, entre otros.	
--	---	--

El diseño de las competencias específicas puede realizarse tomando en cuenta el sector industrial local, la experiencia de otras universidades y las necesidades de aquellas empresas e industrias que ya hayan transitado por la Industria 4.0.

Por otro lado, para que la educación en ingeniería 4.0 pueda apoyar las labores docentes, los sistemas educativos deben aprovechar las tecnologías disruptivas para sistematizar y automatizar las tareas de los profesores, tales como la revisión y la calificación de las tareas, así como la administración de las clases y los documentos, entre otras.

Otro concepto que se ha asociado con la educación en ingeniería moderna, es el de “educación en ingeniería 5.0” (Singh y Singh, 2024). En este paradigma educativo se rescatan los modelos de la educación ya establecidos y validados de la educación en ingeniería 4.0 y se incorporan y adoptan aspectos innovadores, como el aprendizaje centrado en el alumno y se aprovecha que la AI ha sido redireccionada hacia la mejora de las competencias y las habilidades de los seres humanos para introducir casi de manera obligatoria este campo de la computación en la educación de los ingenieros modernos. La educación en ingeniería 5.0 busca modificar los planes de estudio para agregar temas que permitan desarrollar competencias y habilidades tales como: el análisis y la resolución de situaciones y problemas complejos, el desarrollo del pensamiento crítico, el manejo de la información y de la Inteligencia Artificial, la colaboración académica en todos los niveles y la inserción de nuevos o mejorados métodos de la enseñanza y aprendizaje (p.e. las metodologías activas), entre otros (Ciolacu *et al.*, 2024). La educación en ingeniería 5.0 promueve el estudio de las prácticas sustentables, la conexión simbiótica de las máquinas y los humanos, impulsa el uso del metaverso para diversas aplicaciones educativas, busca fomentar la resiliencia y educa a los ingenieros para que tengan conciencia social.

2.5 Educación en ingeniería mecatrónica

La educación en ingeniería en mecatrónica es una rama de la educación en ingeniería cuya misión es la formación y el entrenamiento de los ingenieros cuyo propósito principal es desarrollar y administrar sistemas tecnológicos que impliquen el uso integrado de la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, la ingeniería de control y la ingeniería de la computación. La educación en ingeniería mecatrónica nace y se desarrolla durante la Tercera Revolución Industrial. Para lograr que los ingenieros mecatrónicos se orienten a las visiones de las Industrias 4.0 y 5.0, es necesario que la educación de los ingenieros mecatrónicos se asocie y apegue a las bases de la educación en ingeniería 4.0; es decir, debe tomar como pilares a las competencias, los métodos didácticos, las tecnologías, la modernización de los planes de estudio y de la infraestructura académica y la automatización de las tareas de administración de los profesores.

La educación en ingeniería mecatrónica debe también considerar las necesidades y las premisas de la Industria 5.0, por consiguiente, la educación y el entrenamiento de los ingenieros debe integrar aspectos como la sinergia humano-máquina y la sustentabilidad. La educación en ingeniería mecatrónica debe considerar dos aspectos importantes: el primero es que debe integrar a sus planes de estudio a la AI y dirigirla a la mejora de la maquinaria (Industria 4.0) y a potencializar las relaciones y la simbiosis entre los humanos y las máquinas (Industria 5.0) y, en segundo lugar, debe proporcionar los conocimientos que hagan posible la integración hardware/software, el procesamiento de datos y la conectividad (integración de la mecatrónica con las tecnologías de la Industria 4.0). Además, la educación en ingeniería mecatrónica no solo debe educar a los ingenieros mecatrónicos para integrar a los seres humanos con las máquinas, sino que debe también aplicar las prácticas sustentables en el diseño, el desarrollo, la fabricación y la operación de las máquinas, diseñar sistemas ciberfísicos resilientes y concientizar a los educandos de tomar en cuenta aspectos sociales en sus proyectos (integración de la mecatrónica con la Industria 5.0).

Si bien la educación de la ingeniería mecatrónica debe orientarse hacia las necesidades de las Industrias 4.0 y 5.0, no se debe olvidar que gran parte de la infraestructura mundial industrial sigue la visión y las premisas de la Industria 3.0. Por lo tanto, el ingeniero mecatrónico deben seguir dominando las habilidades y las competencias más importantes de la Industria 3.0. Además, las transiciones industriales representadas por las Industrias 3.5 y 4.5 requieren de los conocimientos de la ingeniería mecatrónica tradicional y de las tecnologías disruptivas de las Industrias 4.0 y 5.0. De la misma manera, la actualización inteligente o Smart Retrofitting requiere sin lugar a dudas de los conocimientos y las habilidades de los ingenieros mecatrónicos.

Por otro lado, la educación en ingeniería mecatrónica, debe diseñar las nuevas competencias técnicas de los ingenieros para que puedan enfrentar los retos y los desafíos de los nuevos paradigmas industriales, sin olvidar que la Industria 3.0 todavía está presente. Las competencias pueden diseñarse tomando en cuenta los perfiles profesionales de aquellas empresas que ya transitaban por la visión de la Industria 4.0. En la Tabla 1 se observa que algunos sectores tecnológicos analizados para desarrollar el catálogo de los 100 perfiles profesionales están relacionados directamente e indirectamente con el dominio de la mecatrónica. De forma directa el sector tecnológico denominado “mecatrónica y automatización de máquinas” tiene asociados los perfiles profesionales tales como: “arquitecto de sistemas ciberfísicos”, “diseñador de fábricas inteligentes” e “ingeniero de IoT”, entre otras. Por su parte, los sectores tecnológicos indirectos con la mecatrónica son: cobots e interfaces hombre-máquina (ver la Tabla 1). Al tomar en cuenta las referencias de la Tabla 1, es decir, los perfiles profesionales requeridos por las empresas con experiencia en la Industria 4.0, las necesidades industriales locales y los planes de estudio, es posible diseñar las competencias técnicas y las habilidades blandas que requieren los alumnos para formarse en las visiones de las Industrias 4.0 y 5.0. En la Figura 9 se muestra un esquema general de la educación en ingeniería mecatrónica y sus relaciones con las tres revoluciones industriales activas.

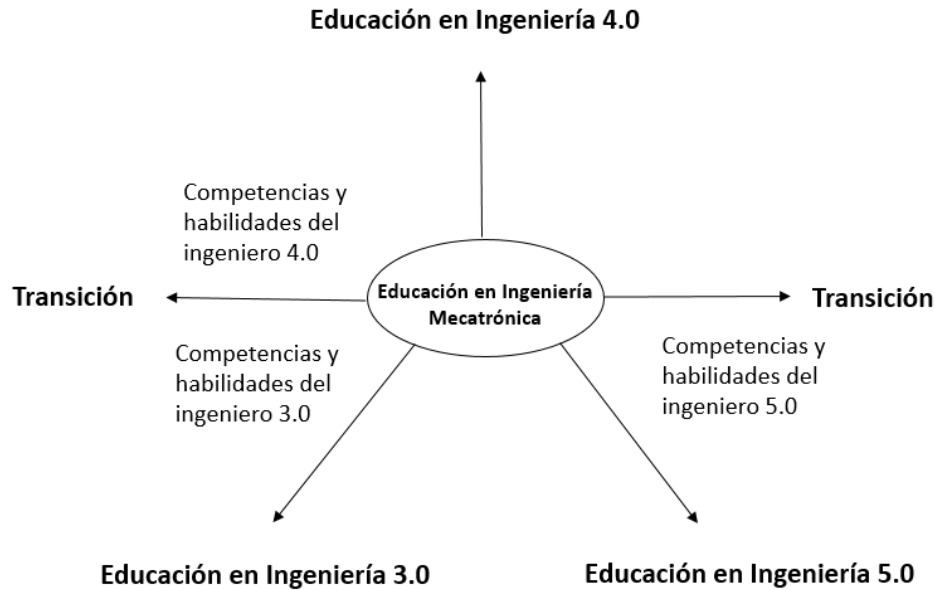


Figura 9. La educación en ingeniería mecatrónica bajo la influencia de las tres revoluciones industriales activas.

3. Resultados

En este estudio se encontró que los mundos industriales y educativos están sometido a la influencia de tres revoluciones industriales activas y dos transiciones, y que cada revolución industrial tiene un conjunto de premisas que determinan el campo de acción tecnológico y sus aplicaciones. De la misma manera, cada paradigma industrial activo tiene asociado su respectivo paradigma educativo. Se determinó que la ingeniería mecatrónica ha sido y es la base de las tres últimas revoluciones industriales y que comparte la integración hardware/software con la conectividad y el procesamiento de datos de las tecnologías emergentes y disruptivas de la Cuarta Revolución Industrial para desarrollar productos tales como máquinas inteligentes, sistemas ciberfísicos y gemelos digitales.

Se encontró que la educación en ingeniería moderna se ha alineado con los dos últimos paradigmas industriales generando los conceptos de educación en ingeniería 4.0 y educación en ingeniería 5.0. La educación en ingeniería 4.0 tiene cuatro pilares fundamentales: las competencias, los métodos pedagógicos, las tecnologías y la automatización de las labores docentes, mientras que la educación en ingeniería 5.0 rescata modelos educativos exitosos y probados de la Industria 4.0 y los complementa con el desarrollo de competencias que incluyen prácticas sustentables, resiliencia y la inclusión de la automatización inteligente en la simbiosis hombre-máquina.

Por su parte, la educación en ingeniería mecatrónica se debe alinear con los conceptos de educación en ingeniería 4.0 y 5.0. Se encontró que era necesario que las universidades mejoraran los laboratorios, actualizaran sus planes de estudio, diseñaran competencias, asociaran nuevos métodos pedagógicos, introdujeran tecnologías disruptivas y automatizaran la administración docente, para poder formar a los ingenieros hacia los objetivos de los dos últimos paradigmas industriales. Además, para el caso del diseño de competencias se encontró que había un catálogo de 100 perfiles profesionales, obtenido de las necesidades de las empresas ya maduras en la Industria 4.0. Por consiguiente, este catálogo, en conjunto con las necesidades empresariales

locales y con el diseño de los planes de estudio de la carrera de ingeniería mecatrónica, podría ser útil para el diseño de competencias técnicas y para el desarrollo de habilidades tanto técnicas como blandas.

3. Discusión

La dinámica industrial en todo el orbe está sujeta a la influencia de tres revoluciones industriales activas y dos transiciones, lo que implica la existencia de múltiples tecnologías en los mercados y en las líneas de producción, cuyo diseño y control están gobernados por las premisas de cada paradigma industrial. La educación en ingeniería moderna se enfrenta al reto de formar a los ingenieros en cuyo campo laboral están interactuando productos, máquinas, dispositivos y sistemas de producción de las tres revoluciones industriales lo que complica fijar un camino que oriente a las universidades a crear las condiciones necesarias y suficientes para la formación y el entrenamiento de los nuevos profesionales. Aunque las educaciones en ingeniería 4.0 y 5.0 surgen como respuesta a las demandas de la Cuarta y Quinta Revolución Industrial, en la práctica se sigue formado a los ingenieros con las competencias de la Tercera Revolución Industrial.

La mecatrónica y su educación se deben alinear tanto a los tres paradigmas industriales activos, como a los correspondientes paradigmas educativos. En el caso de la Industria 4.0 la mecatrónica comparte la integración hardware/software que representan la base de diversos sistemas, máquinas y sistemas de producción, con la conectividad y el procesamiento de la información, para crear máquinas inteligentes y sistemas que integran activos físicos y virtuales como los sistemas ciberfísicos, que representan las tecnologías base de la Cuarta Revolución Industrial. Al integrar la combinación hardware/software, la conectividad y el procesamiento de la Industria 4.0, las habilidades humanas, las prácticas sustentables y la conciencia social, es posible desarrollar tecnologías de la Industria 5.0 como los cobots, los sistemas ciberfísicos humanos y los gemelos digitales humanos, además es posible desarrollar sistemas de producción sustentables y resilientes. Por lo tanto, el papel que está jugando la mecatrónica en los dos últimos paradigmas industriales es esencial y relevante.

Por su parte, la educación en ingeniería mecatrónica requiere de modernizaciones urgentes, ya que en el mundo todavía muchos de los planes de estudio se centran en las premisas de la Industria 3.0. Esas modernizaciones deben ser guiadas por los paradigmas educativos existentes como las educaciones en ingeniería 4.0 y 5.0., por los pilares de la Educación en Ingeniería 4.0, por el diseño de las competencias y por el impulso y el desarrollo de las habilidades técnicas necesarias y las habilidades blandas. El diseño de las competencias en ingeniería mecatrónica deberá tomar en cuenta las experiencias de las empresas que han transitado por la Industria 4.0 y de algunas que están migrando a la Industria 5.0, las necesidades industriales locales y los contenidos de los planes de estudio actualizados y vigentes para generar los conocimientos, las aplicaciones y las habilidades blandas que se necesitan para enfrentar los retos y desafíos que imponen la existencia actual de las tres revoluciones activas y sus transiciones.

En la educación en ingeniería mecatrónica en México siguen predominando diversos temas asociados con la Industria 3.0, mientras que diversas empresas todavía tienen el problema de no saber cuáles son las funciones de un ingeniero mecatrónico. Algunas escuelas y universidades privadas mexicanas han estado implementado desde hace unos años modelos educativos de la

Industria 4.0 con resultados interesantes (Camacho *et al.*, 2025), mientras que en las universidades públicas la educación en ingeniería asociada con Industria 4.0 apenas se está considerando en los planes de estudio. Con respecto a la introducción de la Industria 4.0 en México, las empresas transnacionales y algunas grandes empresas mexicanas son quienes han implementado proyectos de la Industria 4.0 a gran escala. Por su parte, la gran mayoría de las pequeñas empresas que representan más del 90% del tejido industrial en México, no tienen proyectos de la Cuarta Revolución Industrial.

En cuanto a la introducción y el manejo de algunas tecnologías emergentes y disruptivas en la educación en ingeniería en México, la realidad aumentada, las Tecnologías de la Información y Comunicación, la realidad virtual, la AI y la manufactura aditiva (impresión 3D), han sido aplicadas para el diseño y el desarrollo de proyectos educativos. Además, la AI ha tomado un papel central en los aprendizajes de la ingeniería ya que se han desarrollado diversas herramientas de búsqueda avanzada como lo son el ChatGPT y DeepSeek, entre otras. Sin embargo, cuando se utilizan estas herramientas como si fuera una Wikipedia avanzada, los resultados no son tan prometedores para los alumnos. Para lograr un resultado de mayor potencial de las herramientas de búsqueda avanzada con la AI, se requiere considerar a estas herramientas como un socio o como un colaborador en las investigaciones realizadas.

4. Conclusiones

En esta investigación se describieron las premisas de las tres últimas revoluciones industriales y se analizaron los dos paradigmas educativos actuales de la educación en ingeniería moderna. Además, se resaltó la importancia de la mecatrónica y su educación en la Cuarta y Quinta Revolución Industrial. Las conclusiones derivadas de esta investigación se resumen en los puntos siguientes:

- 1) La ingeniería mecatrónica es la base de las tres últimas revoluciones industriales y sus transiciones. De la mecatrónica dependen diversos sistemas que requieren la integración hardware/software y que están presentes en las máquinas, dispositivos y sistemas de producción de las Industrias 3.0, 4.0 y 5.0.
- 2) La educación en ingeniería mecatrónica está todavía centrada en las premisas y objetivos de la Industria 3.0. Se requiere seguir los lineamientos y las visiones de las educaciones en ingeniería 4.0 y 5.0 para alinear la educación de los ingenieros mecatrónicos hacia las visiones y los objetivos de las Industrias 4.0 y 5.0.
- 3) La educación en ingeniería mecatrónica debe introducir aquellas tecnologías emergentes y disruptivas de la Cuarta Revolución Industrial asociadas con la educación a los procesos y procedimientos de la enseñanza y el aprendizaje, así como a la administración de las tareas escolares.
- 4) La introducción de nuevos métodos y enfoques pedagógicos en la educación de los ingenieros mecatrónicos es esencial para alinear la formación de los ingenieros a los retos y desafíos de las industrias 4.0 y 5.0.
- 5) El diseño de las competencias que demandan los dos últimos paradigmas industriales es una tarea crucial de la educación en ingeniería mecatrónica. Para lograrlo, es necesario que las universidades tomen en cuenta las experiencias de las empresas que ya han transitado por la Industria 4.0, las necesidades locales de las empresas y el diseño de los planes de estudio de la carrera de ingeniería. Las competencias específicas y las habilidades blandas

de los ingenieros mecatrónicos son esenciales en aquellas empresas que van a migrar a la Industria 4.0 o en aquellas que ya operan proyectos consolidados de las Industrias 4.0 y 5.0.

- 6) Es de suma importancia que las empresas e industrias mexicanas transiten con más rapidez hacia la Industria 4.0 y que las universidades tomen a la educación en ingeniería 4.0 como la base para mejorar los sistemas educativos y orientarlos hacia las demandas de la Cuarta Revolución Industrial.

La ingeniería mecatrónica soporta gran parte del desarrollo tecnológico existente y será la base de algunas de las tecnologías más avanzadas, como los humanoides y los cyborgs, en las próximas décadas.

Referencias

- Camacho, C., Salas, S., Valle, A. P., Caratozzolo, P., y Chans, G. M. (2025). Toward a continuous learning educational model: insights from the experience of a Mexican private university. In *Frontiers in Education*, 10, 1485034. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1485034>
- Chien, C.F., Wang, H.K. y Fu, W. (2018). Industry 3.5 Framework of an Advanced Intelligent Manufacturing System: Case Studies from Semiconductor Intelligent Manufacturing. *Management Review*, 37, 105-121.
- Chien, C. F., Hong, T. Y. y Guo, H. Z. (2017). A conceptual framework for “Industry 3.5” to empower intelligent manufacturing and case studies. *Procedia Manufacturing*, 11, 2009-2017.
- Cintra, A.C. y Macedo, C. (2023). Mechatronics: A Study on Its Scientific Constitution and Association with Innovative Products. *Appl. Syst. Innov.*, 6, 72. <https://doi.org/10.3390/asi6040072>.
- Ciolacu, M. I., Marghescu, C., Mihailescu, B. y Svasta, P. (2024). Does Industry 5.0 Need an Engineering Education 5.0? Exploring Potentials and Challenges in the Age of Generative AI. In 2024 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) IEEE, 1-10.
- Hernandez, G.M., Habib, L., Garcia, F.A. y Montemayor, F. (2019). Industry 4.0 and Engineering Education: An Analysis of Nine Technological Pillars Inclusion in Higher Educational Curriculum. In *Best Practices in Manufacturing Processes* (1st ed.); Springer, 525–543.
- Ioniță, M., Mihailescu, B., Rachbauera, T., Hansen, C., Gheorghe, C. y Svasta, P. (2023). Fostering Engineering Education 4.0 Paradigm Facing the Pandemic and VUCA World. *Procedia Comput. Sci.* 217, 177–186.
- Jiménez, E., Beltrán, Y., Núñez, E., Alonso, R., López, O. y Gaytán, L.Z. (2025). La importancia de la Educación en Ingeniería 4.0 en la Cuarta Revolución Industrial, *LATAM: Revista latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 6 (2), 443-465.
- Jiménez, E., Limón, P.A., Ambrosio, A., Ochoa, F.J., Delfín, J.J. y Martínez, V.M. (2024a). Mechanics 4.0 and Mechanical Engineering Education, *Machines*, 2024, 12, 320. <https://doi.org/10.3390/machines12050320>
- Jiménez, E., Martínez, V.M., López, A.A., Gaytán, L.Z., Beltrán, Y., y Vázquez, E.E. (2024b). Certain Considerations on Mechanical Engineering Education 4.0. In *International conference on WorldS4*. Singapore: Springer Nature Singapore, 515-525.
- Jiménez, E., Luna, G., Lucero, B., Ochoa, F.J., Muñoz, F., Delfin, J.J. y Cuenca, F. (2023). General Guidance for the Realization of Smart Retrofitting in Legacy Systems for Industry 4.0. *Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0/5.0*, 132-137.
- Judijanto, L., y Wardhana, M. G. (2025). Education 5.0: Collaboration and Creativity in Improving Students' digital Intelligence. *International Journal of Teaching and Learning*, 3(4), 369-382.

- Lantada, A. D. (2022). Engineering education 5.0: Strategies for a successful transformative project-based learning. Insights into global engineering education after the birth of Industry, Intechopen, 5, 19. DOI: 10.5772/intechopen.102844
- Leong, W. Y. (2025). Leading the Industry Revolution 5.0 transformation: a technology roadmap for Industry Revolution 5.0. Industry 5.0: Design, Standards, Techniques and Applications for Manufacturing, C.3. 27. https://doi.org/10.1049/PBME026E_ch3.
- Liagkou, V., Stylios, C., Pappa, L. y Petunin, A. (2021). Challenges and Opportunities in Industry 4.0 for Mechatronics, Artificial Intelligence and Cybernetics, *Electronics*, 10, 2001. <https://doi.org/10.3390/electronics10162001>
- Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., y Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of industrial information integration*, 26, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
- Mohajan, H. (2021). Third industrial revolution brings global development. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 7 (4), 239-251.
- Peláez, I.C., Velarde, D., y Glasserman, L.D. (2024) The impact of large language models on higher education: exploring the connection between AI and Education 4.0. *Front. Educ.* 9:1392091. Doi: 10.3389/feduc.2024.1392091
- Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R., Abhishek, K., Iyer, G., Vara, H., y Gupta, M. (2025). Industry 5.0: A review of emerging trends and transformative technologies in the next industrial revolution. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, 19(2), 667-679.
- Sakurada, L., Gerald, C.A.S., Fernandes, F.P., Pontes, J. y Leitão, P. (2020). Analysis of New Job Profiles for the Factory of the Future. In Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, Proceedings of the SOHOMA 2020, Studies in Computational Intelligence, Paris, France, 1–2 October 2020, 1st ed.; Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, Volume 952, 262–273.
- Saniuk, S., Grabowska, S., y Straka, M. (2022). Identification of social and economic expectations: contextual reasons for the transformation process of Industry 4.0 into the Industry 5.0 concept. *Sustainability*, 14(3): 1391.
- San, C.T. y Kakani, V. (2025). Smart Precision Weeding in Agriculture Using 5IR Technologies. *Electronics*, 14, 2517. <https://doi.org/10.3390/electronics14132517>
- Shlenova, M., Yuryeva, K., Heletka, M., Kravchenko, Y., y Kravchenko, V. (2025). Distance learning in Ukrainian higher education as an aspect of the industrial revolution 4.0. *Multidisciplinary Reviews*, 8(4), 2025102-2025102.
- Singh, K. D., y Singh, P. D. (2024). QoS-enhanced load balancing strategies for metaverse-infused VR/AR in engineering education 5.0. *Computer Applications in Engineering Education*, 32(3), e22722. <https://doi.org/10.1002/cae.22722>
- Soori, M., Arezoo, B., y Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 192-204.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel, B. y Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *J. Manuf. Syst.* 61, 530–535

Mejora En La Implementación Del Mantenimiento Autónomo Con Aplicativo 4.0

Rolando Gutiérrez López¹, Rocío Edith Magaña Iglesias², Edith Montalbán Loyola³

¹Universidad Tecnológica de Querétaro, Pie de la Cuesta 2501, 76148 Querétaro, México
rolando.gutierrez@uteq.edu.mx

Resumen. Este artículo reporta y difunde una experiencia de aplicación que implicó un proceso de transformación digital a partir de registros de ejecución de mantenimiento autónomo y sus posibilidades para la gestión de datos y la toma de decisiones orientadas a la eficiencia y la productividad. En el proceso de la migración de datos desde una plataforma ineficiente, se reconocieron otros aspectos relevantes para lograr la eficiencia y efectividad del uso de un aplicativo 4.0, lo cual determinó un método interventivo y una ruta que partió de un análisis situacional que se orientó a establecer las condiciones propicias para la ejecución eficiente y eficaz del mantenimiento autónomo, de tal manera que se establecieran bases operativas y organizacionales suficientes para la operación misma del aplicativo. Los resultados obtenidos refieren reducción de tiempos de ejecución, así como mejores condiciones para el cumplimiento por parte de los operadores, con la posibilidad de generar datos con pertinencia y oportunidad para la gestión del mantenimiento, entre otros análisis sobre la base del TPM. A través de esta experiencia de aplicación, se ratifica que la transformación digital es un proceso de alcances mayores a la migración de datos en razón de las operaciones, métodos reconfigurados y necesidades de atención a las dinámicas organizacionales prevalecientes.

Palabras Clave: Industria 4.0, Transformación digital, Aplicativo 4.0, Mantenimiento Autónomo.

1. Introducción

La integración de tecnologías digitales en los procesos industriales es hoy una realidad, asociada a los paradigmas de trabajo tales la *Agilización*; en vías de incluirse en las dinámicas globales que hoy “mueven al mundo y los mercados” con perspectivas que han superado los márgenes de la eficiencia operativa o la optimización de procesos. Se dice de a “agilización” como *la capacidad de equilibrar la flexibilidad y estabilidad, convirtiéndose en una ventaja competitiva, así como de generar y enfocar interacciones positivas entre equipos, áreas, sistemas, proveedores y clientes* (Giraldo, 2024).

Hablar hoy entonces de Industria 4.0, es contemplar un entramado complejo de conceptos e innovaciones. Un ejemplo de ello es la estrecha relación entre la digitalización o la automatización con otros aspectos como la conectividad y el internet de las cosas, así como la flexibilidad de las propias tecnologías y los sistemas y su correlación con otras disciplinas emergentes como la Ciencia de datos y la Inteligencia Artificial.

El concepto de transformación digital se ha sumado a la serie de disciplinas emergentes en el marco de la Industria 4.0, reenfocando así mismo, intereses en el ámbito de la academia y de las organizaciones.

De acuerdo con Delgado (2024), la transformación Digital se ha integrado a las dinámicas organizacionales y los nuevos modelos de negocio, demandando entornos de hiperconectividad y una aproximación a diferentes variables, como las vías de adopción y los impactos esperados.

Por su parte, Trujillo-Valdiviezo, et. al. (2020) refiere la transformación digital como un fenómeno que experimentó una “aceleración inesperada” como resultado de la pandemia de COVID-19 en el que especialmente los fenómenos en las cadenas de valor cuestionaron los modelos prevalecientes y demandaron procesos más ágiles e interconectados digitalmente.

Algunos de los impactos de la transformación digital, según estos mismos autores, se reconocen en la mayor demanda que combina estratégicamente competencias de solución de problemas técnicos con competencias cognitivas de índole más genérica. De la misma manera, reconocen las brechas para la digitalización aun en empresas que no presentan grandes limitaciones en recursos de inversión, debido a la complejidad que supone la resistencia cultural al cambio y más aún, cuando traban en paralelo con la reconfiguración con otros paradigmas emergentes, asociados a los cambios en el entorno de los negocios, las nuevas tecnologías y plataformas de comunicación.

Las experiencias y retos de la implementación de Industria 4.0 no sólo dan cuenta de la aplicación de distintas nuevas disciplinas tecnológicas, sino también de la necesidad de volver la mirada y reconfigurar la ejecución de tareas tácticas y operativas, igual que la toma de decisiones estratégicas.

Lo anterior conlleva, sí el reconocimiento de los alcances en productividad y calidad a partir de tecnologías digitales y de automatización, pero también el reconocimiento de las implicaciones; entre ellas, la atención al factor humano y otros factores de orden organizacional, como la capacitación, los esquemas de liderazgo.

Tal es el caso que se presenta y difunde a continuación, partiendo de un proyecto de mejora en una empresa del sector aeroespacial y la consabida alta exigencia de desempeño y calidad en sus procesos y productos; así mismo, en la disponibilidad y eficiencia operativa de sus equipos.

El proyecto de Mejora en cuestión, se inscribe en la orientación hacia el TPM (Total Productive Maintenance) y se enfoca en el Mantenimiento Autónomo, como una tarea clave a la que se han designado determinantes en el desempeño y el cumplimiento operativo, a efectos de mejora de indicadores para la disponibilidad y la eficiencia de la maquinaria y equipos.

De acuerdo con Ferrer-Vera y Reyes-López (2022), las empresas con procesos que tienden a un grado cada vez mayor de integración tecnológica, asumen mayores retos en la decisión de modelos de mantenimiento que aseguren confiabilidad. En este sentido, el Mantenimiento Autónomo es una decisión “cuya fortaleza radica en el conocimiento que tienen el operador, tanto de su máquina, como del proceso que realiza para la transformación productiva”, de tal manera que las tareas cotidianas de limpieza, ajuste y lubricación antes de los arranques de máquina, constituyen rutinas que pueden incidir en los indicadores de producción.

Este proyecto de mejora define como punto de partida la digitalización y gestión de datos, derivados de los registros a cargo de los mismos operadores durante la ejecución del Mantenimiento Autónomo, con ayuda de un aplicativo, y de ahí, el análisis y la toma de decisiones respecto a la intervención para programar y/o ejecutar Mantenimientos Preventivos y Correctivos.

La empresa del sector aeroespacial a la que se refiere este artículo es una empresa trasnacional que se dedica a la producción de componentes para los motores de aviones; así mismo se aluden altos niveles de exigencia en calidad y productividad, tanto en sus áreas productivas, como en sus áreas de soporte, entre ellas la de Mantenimiento.

Las dinámicas y demandas del sector han impulsado en la empresa una serie de proyectos de mejora continua, entre ellos, la mejora de los indicadores de eficiencia de máquinas vitales para la calidad y la productividad.

En razón de ello, la gerencia de una de las áreas de producción con tareas de maquinados de alta precisión, planteó al área de mantenimiento un proyecto de optimización de los indicadores de eficiencia de máquinas de 90% a 95%; lo cual, implicó la revisión de condiciones y factores que pudieran incidir en el alcance de este objetivo.

Este proyecto de mejora define como punto de partida la digitalización y gestión de datos, derivados de los registros a cargo de los mismos operadores durante la ejecución del Mantenimiento Autónomo, con ayuda de un aplicativo, y de ahí, el análisis y la toma de decisiones respecto a la intervención para programar y/o ejecutar Mantenimientos Preventivos y Correctivos.

Asimismo, en el marco de las políticas y filosofías de mejora de la misma organización, se reenfocaron los fundamentos del TPM y se confirmó la relación causal respecto al cumplimiento y efectividad de las acciones del Mantenimiento Autónomo (AM), como base de toma decisiones e intervención con acciones de Mantenimiento Preventivo (MP) y Mantenimiento Correctivo (MC).

Asimismo, tomando en cuenta que la disminución de intervenciones de MP y MC permitirá mayor disponibilidad de máquina y por ende mayor eficiencia.

En este sentido, se recurrió a la revisión de datos registrados por los operadores durante la ejecución del Mantenimiento Autónomo y, entre los hallazgos más relevantes se reconoció: Un indicador importante de incumplimiento de registros diarios (75%).

Respecto a estos resultados se realizó una aproximación a la situación de “incumplimiento”, lo cual refirió una serie de áreas de oportunidad tales como:

- a) Falta de estandarización de tareas y operaciones en la ejecución del AM; en la que se reconocieron tiempos y rutas de acciones variables, destinando hasta más de 1 hora para ejecución de las tareas.
- b) Falta de recursos eficaces y eficientes que agilicen los procesos de registro y la gestión de datos; para realizar el AM y realizar el análisis de datos a cargo del Área de Mantenimiento.

Los operadores cuentan con procesadores ubicados en un lugar fijo, dentro de su territorio de trabajo, en los cuales deben capturar los datos, al tiempo que ejecutan las operaciones. Las dificultades reportadas al respecto indican:

- Recurrencia en la falta de conectividad y velocidad en el procesamiento de datos, desde el encendido de la computadora.
- Demandas de atención, memorización y enfoque en la simultaneidad de las acciones y los registros en la lista de verificación que presenta la computadora, interferidas por las condiciones de trabajo de las computadoras.

Por otra parte, la concentración de datos de cada máquina y su recuperación para el análisis y toma de decisiones, para las asignaciones a las áreas técnicas, representa tiempos de más de 11 horas de trabajo en la semana.

Se mencionan así una serie de situaciones relevantes y presentes más allá de lo que representan los registros fuera de tiempo o registros incompletos, respecto a las listas de verificación durante la ejecución del Mantenimiento Autónomo. Con esta perspectiva, se define la necesidad de desarrollar una aplicativo, integrado a un dispositivo periférico portátil con el operador como usuario inicial que:

- a) Facilite el registro de operaciones por parte del operador durante la ejecución del AM, así como la gestión de datos por parte del Área de Mantenimiento.
- b) Se integre al Método de trabajo del AM para su ejecución y generación de información en tiempo y forma oportunos.
- c) Supere las condiciones de los procesadores fijos y con poca velocidad de procesamiento
- d) Se adecúe a condiciones de conectividad, red y flujo de datos, de acuerdo con las normas establecidas para la planta y los usuarios.

Actualmente la cantidad de máquinas que responden a la demanda de productividad del área, hace suponer la necesidad de una serie de validaciones previas para:

- Consolidar el método del AM
- Desarrollar el aplicativo con los insumos de información del método validado
- Adquirir el dispositivo acorde con las expectativas planteadas
- Incidir en los procesos de capacitación y reentrenamiento pertinentes

En este sentido es que se determinó un proceso de “pilotaje” aplicado a un solo tipo de máquina vital, aunque de manera tangencial y en respuesta a las necesidades inmediatas, se atendieron los requerimientos de consolidación de método del AM para los equipos de toda una línea de producción. Se establece entonces un proyecto con elementos genéricos y estandarizados, respecto al método del AM y con elementos específicos enfocados al pilotaje en una sola máquina, tratándose del aplicativo a desarrollar.

Respecto al método del AM se contempla una reducción de tiempos en la ejecución de las tareas y operaciones (40%), y una serie de fundamentos con alcance a los contenidos de capacitación y reentrenamientos que incidan en el cumplimiento y desempeño de los operadores (90%) y en última instancia, en la mejor forma de gestionar datos para la toma de decisiones para la disminución de intervenciones por MP y MC, favoreciendo así la disponibilidad de máquinas hasta un 95%.

2. Metodología

La metodología de desarrollo de este proyecto se define a partir de una ruta de trabajo interventiva en razón de una perspectiva de mejora de indicadores de disponibilidad y efectividad de equipos calificados como activos críticos. Desde la filosofía del TPM se estableció un programa de actividades con alcance en la integración de un aplicativo 4.0 para uso del operador encargado del registro y la generación de datos derivados de la ejecución del mantenimiento autónomo. Esta ruta de trabajo y método de intervención, estableció las siguientes fases, manteniendo la perspectiva del cumplimiento, la eficiencia y la contribución a la disponibilidad y efectividad general del equipo denominados como críticos o vitales:

Análisis situacional: De acuerdo con la propia metodología del TPM, a partir del reconocimiento de activos críticos se define un proceso de análisis que permita identificar elementos clave para configurar las estrategias; desde un enfoque sistemático y de corresponsabilidad. Para ello se realizó un análisis situacional integrando métodos observación directa y de revisión documental. En ese sentido se llevaron a cabo tareas de identificación de las máquinas con apoyo de los manuales del fabricante y con la identificación de factores de interacción con el operador durante la ejecución del AM. **Estudio de trabajo del AM:** Esta tarea implica análisis de operaciones y tiempos para determinar la eficiencia operativa en la ejecución del mantenimiento autónomo, a fin de identificar las áreas de oportunidad y posibilidades de reducir tiempos con un método de AM reconfigurado. **Datos para el desarrollo del aplicativo:** La ratificación o reconfiguración del Método del AM incluye la visión sistémica del AM, así como las operaciones e instrucciones que constituyen el elemento clave del proceso de digitalización para el registro, generación de datos y gestión de datos.

Elaboración del manual digital de uso del aplicativo: Como parte de la intervención, se considera conveniente la configuración de un manual de uso del aplicativo, a partir del cual se realizará un pilotaje para verificación y control, tanto del aplicativo como del método de ejecución del mantenimiento autónomo, con propósitos de establecer bases de seguimiento y mejora.

3. Desarrollo

3.1 Identificación de máquina y factores de interacción durante la ejecución del AM

La línea de producción de maquinados conformada por un conjunto de máquinas vitales donde se reconoce la necesidad de mejorar indicadores de disponibilidad, refleja dinámicas de ejecución de AM diversas, en las que fue necesario reconocer aquellos factores de interacción persona-máquina para tomar en cuenta en la reconfiguración del método; tanto para la reducción de tiempos, como para su correcta ejecución.

Con base en la consulta de los manuales de máquina y la verificación en piso, se reconocieron: a) Territorio de máquina b) Componentes c) Periféricos, así como su relación con las operaciones establecidas en el proceso del AM, de acuerdo con el check list vigente. En esta actividad tipo *Gemba*, se identificaron diferentes áreas de oportunidad; en primera instancia, en el marco de 33 actividades declaradas en el check list, y que se pueden observar en la figura 1, veintidós inspecciones y once operaciones son realizadas en un tiempo promedio de 50.6 minutos.

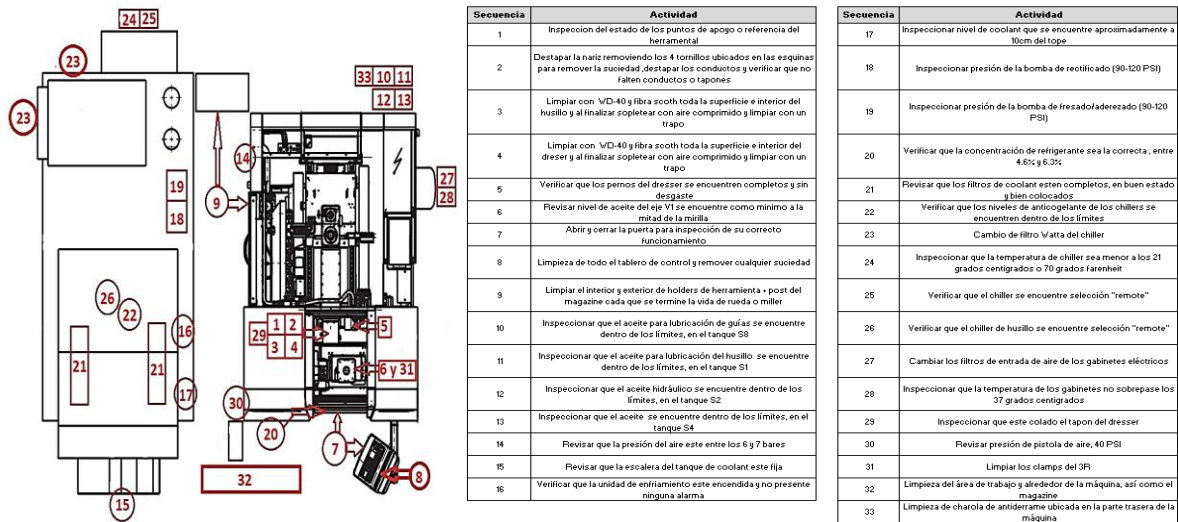


Figura 1. Estación de trabajo del centro de maquinado y la secuencia de las actividades del AM que realiza el operador (check list).

Asimismo, a través de un check list como se muestra en la tabla 1, se identificaron aspectos como: falta de tiempo, falta de herramientas necesarias para la operación del AM, dificultades de ubicación de parte en la maquinaria, desconocimiento de la secuencia de las actividades, entre otras.

Tabla 1. Lista de verificación que permitió identificar aspectos de mejora de las actividades del AM en el centro de maquinado.

Máquina:	Margel		
Fecha:	11 de junio de 2024		
Operador:	Rolando Gutiérrez		
Criterio	Sí	No	Comentarios
1. El operador comprende lo que debe hacer en cada actividad	X		OK
2. El operador conoce la ubicación de cada parte de la máquina que se señala en el AM		X	Se le dificulta saber la ubicación porque no tiene ninguna ayuda visual que le indique la ubicación
3. El operador sabe cómo hacer cada actividad del AM	X		OK
4. El operador sabe cuándo hacer cada actividad del AM	X		OK
5. El operador sigue el procedimiento marcado en la lista de verificación		X	Debido a que cada paso se realiza en diferentes ubicaciones sin seguir un orden, realiza otra secuencia que no le haga

			ir a diferentes lados de la máquina paso a paso.
6. El operador posee las herramientas para realizar el AM		X	Solo tiene un reflectómetro para las 12 máquinas y se comparte con otras áreas.
7. Hay condiciones que provocan que tarde más tiempo el AM	X		OK

El seguimiento en piso de las operaciones del AM ratificó áreas de oportunidad que se identificaron bajo criterios de tiempo, capacitación del operador en operaciones las actividades productivas y de inspección, así como las condiciones para el registro en el periférico con el que hasta entonces contaban. Por lo tanto, se desarrolló un sistema digitalizado denominado AM con aplicativo 4.0 a través del análisis realizado en vías de la reconfiguración con la finalidad de optimizar tiempos, movimientos y cumplimiento para el mantenimiento autónomo utilizando un dispositivo digital.

3.2 Estudio del trabajo del AM y propuesta de método reconfigurado

Luego de determinar el número de muestras totales para hacer el estudio del trabajo del proceso como se indica en la tabla 2, fue posible contar con un elemento más para conocer la situación y hacer el análisis que permitiera identificar mejoras.

Según Trujillo (2024) menciona una serie de situaciones relevantes y presentes más allá de lo que representan los registros fuera de tiempo o registros incompletos, respecto a las listas de verificación durante la ejecución del Mantenimiento Autónomo.

Tabla 2. Estudio de tiempos del AM en el centro de maquinados

Máquina vital 1 Margel						Minutos	M1	M2	M3	TE
Minutos	M1	M2	M3	TE		22	0.50	0.33	0.42	0.42
						23	1.50	1.65	1.17	1.44
1	1.30	0.61	0.50	0.80		24	0.30	0.35	0.45	0.37
2	5.00	6.00	3.83	4.94		25	0.75	0.50	0.60	0.62
3	2.00	1.00	1.40	1.47		26	0.25	1.00	0.92	0.72
4	3.00	0.50	0.60	1.37		27	2.00	1.92	2.10	2.01
5	3.00	1.00	1.20	1.73		28	0.40	0.50	0.53	0.48
6	0.75	0.43	0.50	0.56		29	0.50	0.50	0.45	0.48
7	1.00	0.63	1.00	0.88		30	0.83	0.90	0.80	0.84
8	0.50	0.54	0.48	0.51		31	3.00	0.90	0.97	1.62
9	20.00	19.00	19.50	19.50		32	15.00	15.00	15.00	15.00
10	0.50	0.54	0.48	0.51		33	1.08	0.67	0.75	0.83
21	0.50	0.43	0.53	0.49		Total (minutos)	75.18	63.92	59.45	67.55

Así mismo se partió de una perspectiva de: a) Ejecución de actividades organizadas y con sentido lógico en los desplazamientos del operador b) Reducción de tiempos eliminando operaciones que son parte de otros estándares de acción como 5's y operaciones que pudieran más bien corresponder a programaciones de Mantenimiento Preventivo. c) Cumplimiento en la ejecución y registro sin que el operador requiera herramientas o conocimientos técnicos especializados, sin mayor inversión de tiempo antes del arranque de turno y con la posibilidad de la frecuencia necesaria para mantener la máquina en óptimas condiciones.

3.3 Contenidos y propuesta de interacción para el desarrollo del aplicativo 4.0

La evolución de la Industria 4.0 ha generado una diversidad de aplicaciones posibles de implementar, de acuerdo con múltiples necesidades respecto a procesos, sectores o fases y nivel de maduración de las organizaciones.

Para el caso del proyecto de mejora de indicadores de disponibilidad de máquinas vitales, partiendo de la ejecución del AM, se optó por un aplicativo de *gestión de tareas* con propósitos de registro y recopilación de datos de manera eficiente.

El área de desarrollo correspondiente, se hizo cargo gestionar el dispositivo con una serie de características acotadas por políticas de la organización y posibilidades de uso por parte de los operadores y territorio de máquina.

Se optó por una tableta que se “moviera” con el operador en mano durante la ruta de actividades y operaciones del AM, como dispositivo periférico a un procesador central.



Figura 2 Computadora Tablet, marca HP, que se utilizó para llevar a cabo las actividades del AM.

Con el equipo electrónico se logra que el operador realice, registre y se identifiquen situaciones anormales *en tiempo real* con la finalidad de que el personal del área de Mantenimiento actúe de manera inmediata evitando los tiempos de paros y la acción de un mantenimiento correctivo (por cuestiones de confidencialidad, no se omite la demostración de la imagen real.

El diseño de la interfaz digital y contenido de datos estableció la constante interacción entre las áreas de Mejora Continua, Mantenimiento, Producción y Automatización.

El propósito del aplicativo se definió como una extensión del operador no sólo para el registro de datos, sino para guiarlo en la ruta de operaciones, además de definirse como una interfaz de comunicación entre los operadores y el área técnica de mantenimiento.

A partir de la comunicación en tiempos reales, el aplicativo permitirá el seguimiento y control del cumplimiento del proceso, la consulta de operaciones no conformes y la toma de decisiones oportunas para la solución.

Respecto a estas consideraciones, se capturaron los datos del método reconfigurado del AM, de manera previa al pilotaje, incluyendo instrucciones, plano de máquina, estándar del AM, parámetros, frecuencias, roles de gestión de datos, turnos, registros, acciones no conformes y opciones de consulta.

Todo lo cual, da cuenta de la complejidad de inicio para el desarrollo e incorporación de un aplicativo 4.0, en el que los propósitos de eficacia y eficiencia son cruciales.

3.4 Manual de uso

La incorporación del aplicativo previno el desarrollo de un *manual de uso* con el que convergieron tanto las instrucciones para la implementación del aplicativo, como las del método del AM para su ejecución y cumplimiento.

La estrategia de diseño del manual se basó en la integración de imágenes sobre la interfaz, con señalamientos en los aspectos relevantes para el registro y la gestión de datos.

APLICATIVO PARA AM NIVEL 1: OPERADOR

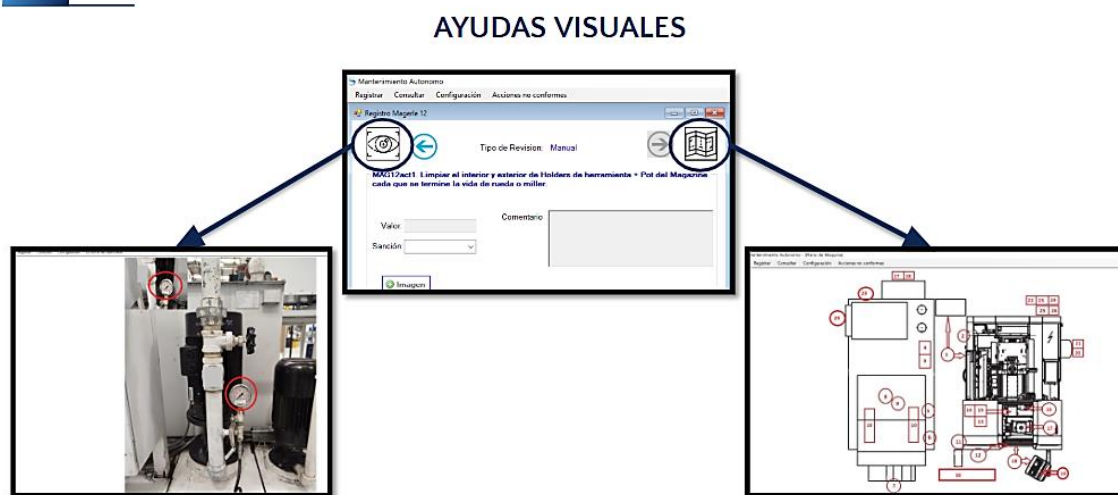


Figura 3. Implementación del Mantenimiento Apicativo a través de la computadora Tablet (Interfaz).

La digitalización de las actividades para llevar a cabo el AM contribuye en la eficiencia de los procesos productivos.

Luego de las gestiones pertinentes con participación de las gerencias de las áreas mencionadas, se entregó la Tablet al operador designado para el pilotaje como se observa en la figura 4, con una capacitación previa sobre el AM y el método reconfigurado como parte del proyecto de mejora.



Figura 4. Evidencia de la prueba piloto a pie de máquina con el dispositivo electrónico (Tablet)

Después de la capacitación a pie de máquina se procede a la revisión de la información en tiempo real para la toma de decisiones. Acción que se llevó a cabo con el personal de la operación y personal del área de Mantenimiento.

La duración del pilotaje fue de 3 días, durante los primeros y segundos turnos. Cabe señalar que el pilotaje en sí mismo resultó ser un reentrenamiento respecto a la ejecución del AM y un entrenamiento para integrar el uso del aplicativo con los propósitos de guía de operaciones, registro de datos y cumplimiento.

4. Resultados y su análisis

El proyecto de mejora que se reportó anteriormente fue parte de una serie de proyectos con alcances acotados para contribuir con un objetivo mayor que planteaba indicadores de: 95% de disponibilidad máquinas y 90% de cumplimiento del AM, como base de reducción del número de intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo.

El planteamiento particular de este caso, partió del reconocimiento de la relación tiempos de ejecución del AM, condiciones de registro y cumplimiento para reportar datos y proceder a la toma de decisiones efectiva para la disponibilidad.

La declaración de enfocar una reducción de 40% en el tiempo de ejecución del AM marcó la pauta de un *gemba*, para documentar el proceso como un paso necesario con propósitos de fundamentar el análisis y la propuesta de un método configurado que representó:

- a) La reorganización del orden de las actividades, eliminar operaciones e identificar áreas de oportunidad en procesos de inducción, capacitación y reentrenamiento de los operadores. El reordenamiento de actividades se basó en su reubicación en la secuencia de pasos en el Método del AM con un número de orden asignado de acuerdo con plano de máquina y los desplazamientos del operador para disminuir tiempos y movimientos.
- b) La eliminación de actividades en las que se identificaron principalmente 2 de ellas que representaban en conjunto, un tiempo promedio de 35 minutos y que se reconocieron como actividades propias de otro estándar (5 ´s); no precisamente propias del AM por requerir intervención técnica especializada para integrar a planes de mantenimiento preventivo.

En la tabla 3, se puede observar la comparación del tiempo anterior vs tiempo actual con la intervención de un sistema digitalizado, logrando reducir hasta un 65.7% respecto a los tiempos de ejecución del método anterior, alcanzando tiempos promedio de 42.41 minutos, distribuidos en turnos y jornadas, según los parámetros para verificación y las otras actividades propias del AM como limpieza, ajuste y lubricación, con frecuencias y recurrencias sistemáticas, respecto a turnos y días de trabajo.

Tabla 3. Comparación del tiempo AM anterior vs actual utilizando el dispositivo electrónico (Tablet)

CONCEPTO	MINUTOS	PORCENTAJE
TOTAL, AM ANTERIOR	64.55	100
TOTAL, AM MEJORADO	22.14	34.3
REDUCCIÓN DE TIEMPO	42.41	65.7

La reducción de tiempos en el método del AM se fundamentó en buena medida en la documentación del proceso y las herramientas técnicas que permitieron no sólo el análisis y generación de propuestas de mejora. En adelante, quedan como bases de seguimiento, control, verificación y nuevos ciclos de mejora.

La documentación y los datos sustentados, resultaron el insumo básico para el diseño y la configuración de la interfaz del aplicativo, a partir del cual se realizó la captura de contenidos para los cuales se seguirían rutas de registro y gestión de datos, que posteriormente serían verificados a través del pilotaje del aplicativo; como alcance acotado para una posterior medición del impacto del proyecto.

La realimentación del operador fue positiva, lo cual afirmó la posibilidad del siguiente paso para confirmar la optimización de tiempos en la ejecución del AM en cada uno de los turnos, definiendo

3 muestras y gestionando los datos en el mismo aplicativo que precisamente refiere los datos de tiempos promedio, automáticamente.

En este sentido se estiman las bases para un siguiente planteamiento de proyecto de mejora con el antes, el después y el “durante” del aplicativo, así como para la deliberación y posteriores decisiones respecto a lo que implica la incorporación de dispositivos 4.0, con el análisis e involucramiento de los diferentes niveles de la organización, integrando además las políticas y filosofías de trabajo.

5. Conclusiones

Este proyecto tuvo como origen la necesidad de mejorar indicadores respecto al cumplimiento efectivo de las actividades de mantenimiento autónomo (AM). La efectividad del AM fue un propósito que implicó recapitular los aspectos básicos del proceso, el recorrido de los operadores, las instrucciones de intervención y registro de datos y verificación; todo o cual definió la implementación de una serie de cambios que incluyeron, precisamente un proceso de transformación digital, tanto al integrar un nuevo dispositivo de registro, como al reconfigurar las dinámicas operativas y de gestión de datos.

Al terminar el proyecto se puede observar que la metodología que se siguió fue la correcta debido a que se cumple el objetivo planteado. Se recomienda replicar el estudio del método en las demás máquinas de la empresa, empezando con las máquinas vitales, después las importantes y al final las secundarias, esto con el fin de que las máquinas vitales puedan tener una mejor ejecución de AM. A lo anterior cabe agregar que solo replicando en todas las máquinas se puede hacer una medición sobre los porcentajes de cumplimiento y disponibilidad porque estos fueron calculados refiriéndose a la planta en general.

Para lo anterior, una ventaja es que ya se realizó el pilotaje, por lo tanto, se conoce la forma de trabajar el proyecto y, por lo tanto, favorece a una más rápida ejecución de actividades. Se puede decir que se transforma una debilidad en una fortaleza.

El uso de herramientas de la industria 4.0 como lo fue el procesamiento de los datos en tiempo real coadyuvo a que las actividades del AM se realizaran con una mayor eficiencia, garantizando que la información registrada en el dispositivo portátil (Tablet) por el operador se hiciera en tiempo y forma, bajo esta premisa, ante alguna falla o situación el área de Mantenimiento inmediatamente procederá a la intervención para corregir el problema, para no incidir negativamente en la disponibilidad de maquinaria y equipos, evitando igualmente registros negativos en la producción.

Los nuevos procedimientos para digitalización de datos derivados de la ejecución del AM, implicaron en la trayectoria de la planeación y la implementación una serie de situaciones tales como la sensibilización y reentrenamientos a los operadores y líderes, debido incluso a la necesidad de observar y eficientar los tiempos y movimientos, así como la generación de instrucciones; no sólo para la operación sino para la configuración del aplicativo.

Los indicadores de eficiencia, efectividad y disponibilidad establecidos por las áreas de mejora y los niveles tácticos y estratégicos, definen horizontes no sólo de cumplimiento, sino de próximos análisis y verificaciones de las diferentes variables implicadas en la integración de los nuevos paradigmas y disciplinas emergentes que conlleva la transformación digital, en el marco de la Industria 4.0.

En conclusión, lo que se presenta en este proyecto se debe de tomar por parte de la empresa como un punto de partida para la expansión de una reforma en el procedimiento del AM en todas las máquinas de la planta y conseguir estar en un mayor nivel de competitividad al dejar de ser un problema grave el de las fallas de las máquinas como un importante pilar de TPM.

Referencias

Delgado-Fernández, T. (2020) *Taxonomía de la transformación digital*. RNPS 2487 Vol. 1. No. 1 enero-abril 2020. (pp. 04-23)

Ferrer-Vega, H. y Reyes-López, O. (2022) Mantenimiento autónomo, factores de éxito exploración inicial.

Giraldo, S. (2024) La evolución de la excelencia: de la eficiencia a la agilidad. [Conferencia] Simposio Empresarial Internacional. Universidad Tecnológica de Querétaro.

Trujillo, S. (2024) Mejora en la implementación del mantenimiento autónomo en máquina Magerle 12. [Memoria de estadía y prácticas profesionales] TSU en Procesos Industriales. Universidad Tecnológica de Querétaro.

Trujillo-Valdiviezo, G., Rodríguez-Alegre, L.; Mejía-Ayala, D., López-Padilla, R. *Transformación digital en América Latina, una revisión sistemática*. Revista Venezolana de Gerencia: RVG, ISSN-e 2477-9423, ISSN 1315-9984, Vol. 27, N°. 100, 2022, (pp. 1519-1536)

Microfabricación Y Empaquetamiento De Sensores Para Bajas Presiones Bajo La Tecnología De Obleas Soi

Carlos Augusto Lopez-Lazcano¹, Víctor Samuel Balderrama Vázquez¹, Jesús Alcantar Peña¹, Juan Ponce-Hernández¹, Jorge Alberto Soto Cajiga¹, Cesar Hernandez-Enriquez¹, José Humberto Cabellos Ávalos¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
Inv.asoc23clopez@cidesi.edu.mx

Resumen. El mercado de sensores de presión en México está en claro crecimiento, impulsado por varios sectores como la automotriz, industrial, médico, infraestructura inteligente y energía. Mas concretamente para dispositivo médicos se ha venido incrementando en los últimos 5 años, por lo que México tiene una oportunidad muy grande de unirse a este mercado global. En este trabajo se muestra el proceso de microfabricación por fotolitografía llevado a cabo dentro del cuarto limpio de CIDESI, donde, al final se muestra el resultado del dispositivo final ya pegado a PCB, soldado y empaquetado, listo para pasar a la última etapa que sería la caracterización electromecánica del sensor, fase que aún no se lleva a cabo y se presentará en trabajos futuros. La microfabricación de este tipo de sensores se realizó a partir de obleas con la configuración SOI (Silicon On Insulator). Mostrando paso a paso cada uno de los procesos de fotolitografía, así como cada uno de los elementos usados para su empaquetado.

Palabras Clave: Sensores de presión, Microfabricación, Semiconductores.

1. Introducción

Dentro de los aspectos más relevantes en la microfabricación de sensores de baja y media presión es el diseño del diafragma, incluyendo tanto la forma como el grosor, así como la ubicación de los piezoresistores y el material del que están hechos. La medición de presión es un pilar fundamental en múltiples campos de la ingeniería, la ciencia y la vida cotidiana. Desde el monitoreo de neumáticos en automóviles, el control de procesos industriales y médicos, hasta la exploración aeroespacial, los sensores de presión se han consolidado como elementos esenciales para garantizar seguridad, eficiencia y confiabilidad en aplicaciones críticas. Con el avance de la micro y nanoelectrónica, el desarrollo de sensores ha experimentado una transformación radical, migrando de dispositivos mecánicos tradicionales hacia sensores miniaturizados, inteligentes y altamente integrables, fabricados mediante técnicas avanzadas de microfabricación (Han et al, 2023).

La microfabricación de sensores de presión se refiere al conjunto de procesos inspirados en la industria de semiconductores, que permiten diseñar y producir dispositivos a microescala sobre sustratos de silicio u otros materiales. El objetivo es obtener transductores capaces de convertir variaciones de presión en señales eléctricas precisas y estables. En particular, la incorporación de tecnologías MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ha permitido fabricar sensores con

diafragmas micrométricos, puentes de galgas piezoresistivas o capacitivas, así como estructuras integradas con circuitos de acondicionamiento de señal, logrando productos más compactos, sensibles y de bajo costo (Song, P et al, 2020).

Uno de los principales impulsores de esta evolución es la creciente demanda de sensores de presión en aplicaciones emergentes. Por ejemplo, en la industria automotriz moderna, los sensores basados en MEMS monitorean presión de aceite, combustión, frenos y neumáticos, contribuyendo a cumplir normas ambientales y de seguridad. En el sector biomédico, los catéteres y dispositivos implantables integran micro-sensores que permiten medir presión intracraneal, arterial o intraocular en tiempo real, facilitando diagnósticos menos invasivos. Incluso en dispositivos de consumo masivo como teléfonos inteligentes y relojes inteligentes, los sensores barométricos ya permiten calcular altitud o detectar caídas súbitas del usuario (Song, P et al, 2020; Fang, X., et al, 2025).

La microfabricación ofrece ventajas técnicas significativas frente a tecnologías tradicionales: alta repetitividad, escalabilidad industrial, integración con electrónica CMOS, reducción de consumo energético, y capacidad de producir miles de unidades en una sola oblea de silicio. Los procesos más utilizados incluyen litografía fotónica, deposición química y física de películas delgadas, grabado húmedo y seco, dopado iónico y técnicas de unión de obleas (Fang, X., et al, 2025; Javed et al, 2019). Estos métodos posibilitan diseñar diafragmas de silicio de apenas unos micrómetros de grosor, cavidades herméticamente selladas o electrodos con geometrías manométricas, optimizando la sensibilidad y rango operativo del sensor (Suter et al, 2013; Ansari et al, 2013).

En años recientes también han surgido variantes basadas en efectos ópticos, resonadores micro-mecánicos, materiales piezoeléctricos, grafeno y nanomateriales bidimensionales, lo que expande las posibilidades de detección hacia escalas más sensibles y multifuncionales (Mohamad et al, 2018; Tran, 2018).

También debe considerarse si requieren algún tipo de implantación para obtener mejores propiedades piezoresistivas. Se debe prestar especial atención a los pasos de microfabricación que deben seguirse mediante fotolitografía para lograr una mayor eficiencia y velocidad en su fabricación. Siguiendo estos elementos, actualmente se utilizan diafragmas cuadrados y piezoresistores de polisilicio para obtener la máxima sensibilidad en sensores de presión (Fang, X., et al, 2025).

2. Microfabricación

En este trabajo, se simuló primero tres diseños de sensor variando el tamaño del diafragma. Se seleccionó para la microfabricación el que presentó la mejor salida de voltaje en relación con la presión a la que se sometió. Se utilizaron obleas de SOI como sustrato y se colocaron piezoresistores de polisilicio implantados con boro a cada lado del diafragma. Estos piezoresistores se unieron mediante líneas metálicas de oro, formando una estructura de puente de Wheatstone (ver Fig. 1).

La microfabricación se llevó a cabo en una sala limpia de clase 1000 mediante fotolitografía. Los sensores se cablearon con hilo de oro y se empaquetaron y sellaron con resina y pegamento de grado médico para garantizar su impermeabilidad, la figura 2, muestra la estructura final y capas del sensor

de presión. Por lo tanto, este tipo de sensores se puede utilizar en aplicaciones que requieren rangos de presión de bajos a medios.

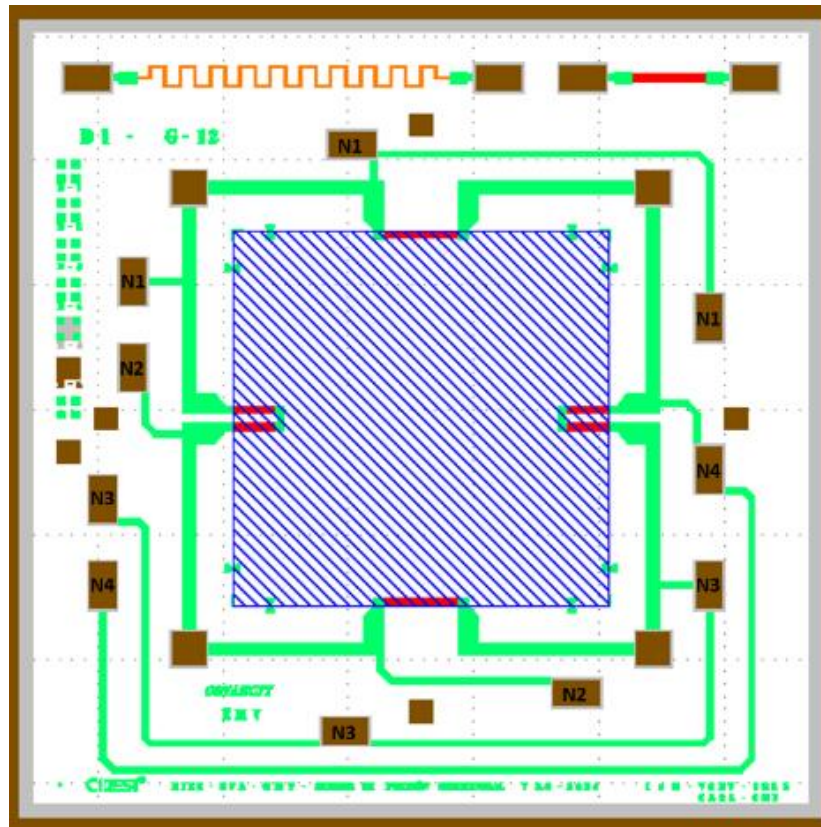


Figura. 1. Diseño de sensor de presión.

A continuación, se describen paso a paso los pasos de microfabricación llevados a cabo dentro del cuarto limpio de CIDESI:

1. Creación de piezoresistor de polisilicio sobre oblea SOI:

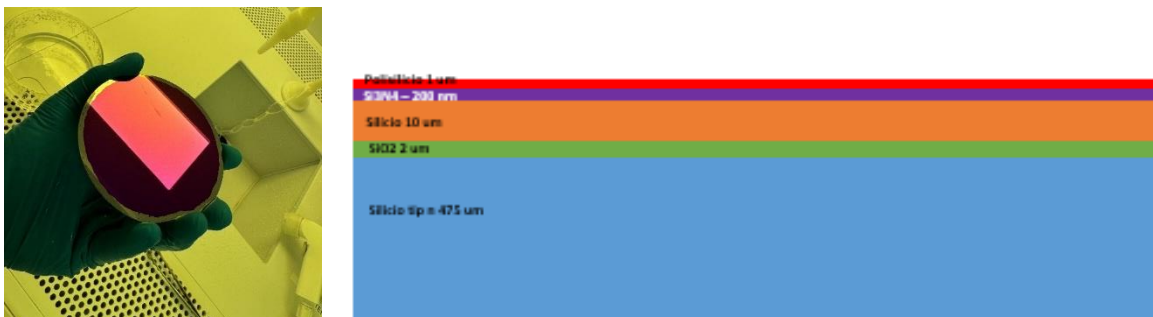


Figura. 2 Creación por grabado húmedo de piezoresistores

2. Depósito de metales (Cr-Au) y definición de líneas metálicas por medio de evaporación:

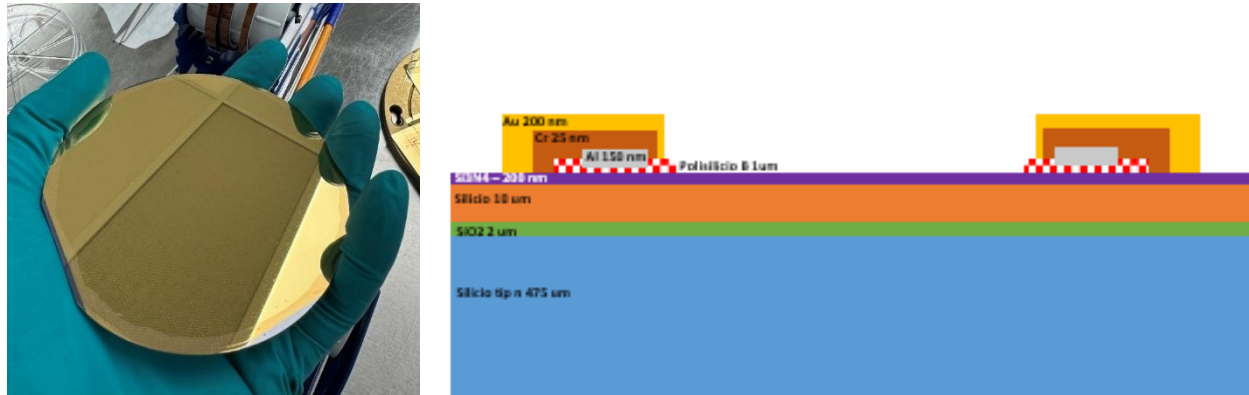


Figura. 3: Oblea y capas de Cr-Au sobre piezoresistores usados como líneas metálicas.

- Depósito de material aislante que funcione como capa protectora, en nuestro caso usamos 500 nm de Si₃N₄ sobre todo el dispositivo, exceptuando los pads de conexión para llevar a cabo la protección del mismo.

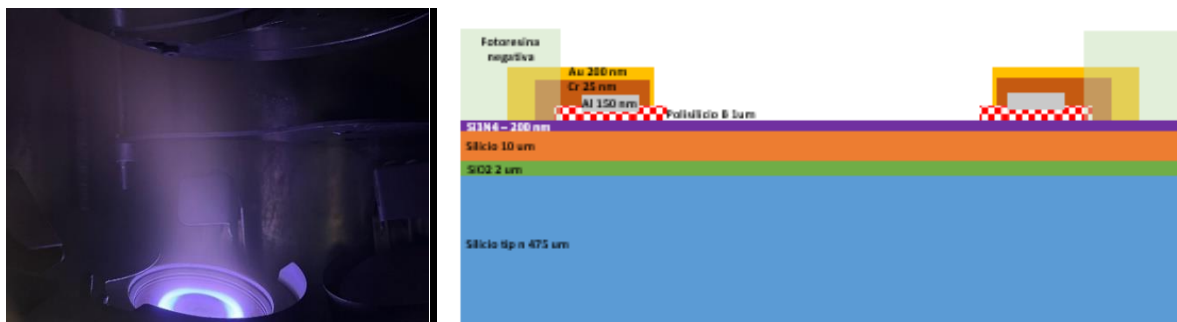


Figura. 4: Plasma generado por el material depositado y estructura de la protección sobre el dispositivo.

- Creación del diafragma en la parte inferior de la oblea por medio de ataque en seco utilizando la técnica de DRIE, donde un plasma en vacío ataca solo las partes marcadas en el proceso de litografía anterior para llevar a cabo la creación del diafragma cuadrado que servirá para recibirla presión y pasarle el efecto a los piezoresistores en las esquinas del mismo.

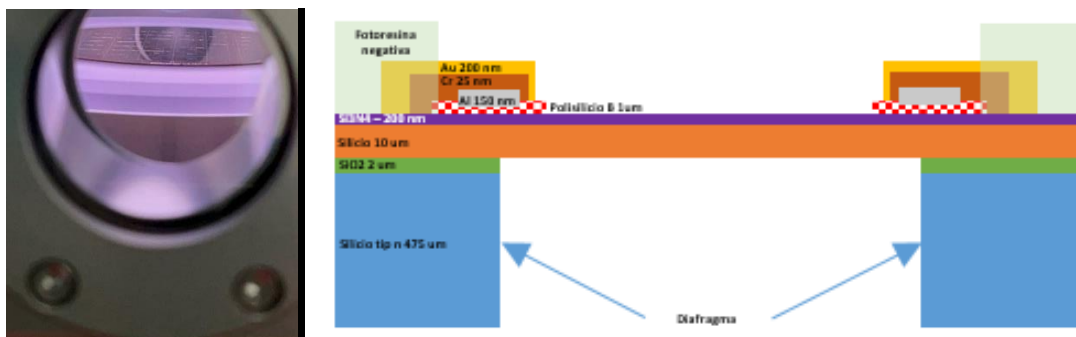


Figura. 5: Ataque en seco por medio de plasma para creación del diafragma en la parte inferior de la oblea SOI

5. Pegado del chip a la PCB y finalmente micro-soldado de sus pads eléctricos a las misma con hilo de oro

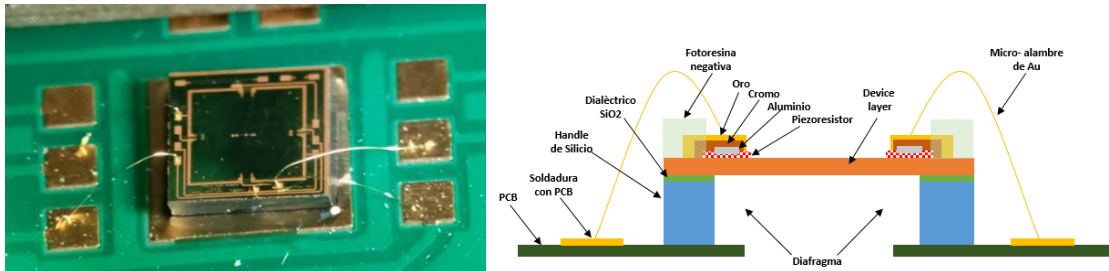


Figura. 6: Pegado y micro-soldado del chip a la PCB.

3. Resultados

Se logró obtener un sensor de presión que presenta las siguientes características:

- A partir de la tecnología SOI y dentro de cuarto limpio
- Con piezoresistores de polisilicio
- Líneas metálicas y pads de Cr-Au
- Protección del medio ambiente con una capa de Si₃N₄
- Diafragma creado por medio de ataque en seco (DRIE)
- Pegado y soldado a PCB para lograr obtener sus señales electromecánicas

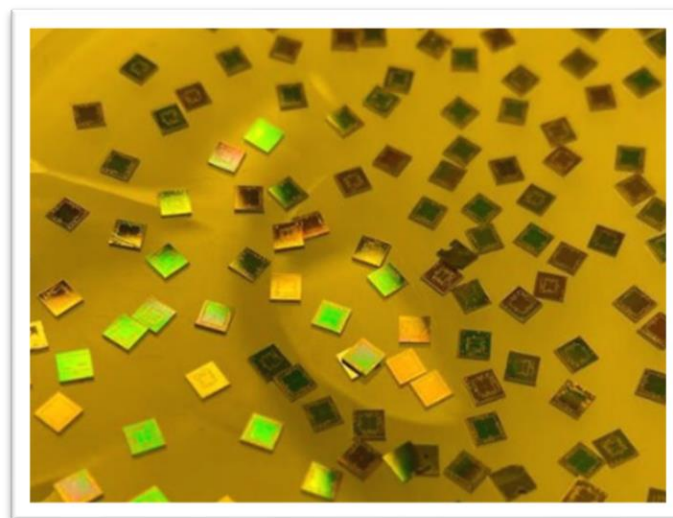


Figura. 7 Chips de sensores de presión cortados

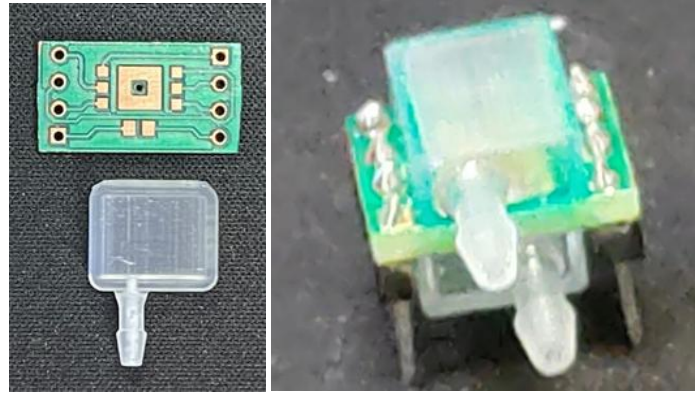


Figura. 8: Chips y carcasa para empaquetado de chips y chip ya empaquetado listo para pruebas electromecánicas.

4. Conclusiones

El proceso de microfabricación llevado a cabo en este trabajo del sensor de presión, ha demostrado ser exitoso al integrar técnicas de litografía, deposición de capas delgadas y grabado micrométrico que permitieron obtener un diafragma sensible, estable y reproducible. La selección de materiales adecuados y el diseño optimizado del material usado como piezoresistivo garantizan un dispositivo con alta resolución y capacidad para detectar bajas presiones dentro del rango establecido en la etapa de diseño (100-100cm/H₂O). Asimismo, la integración de estructuras MEMS en obleas SOI, asegura un tamaño compacto, bajo consumo energético y compatibilidad con sistemas electrónicos de acondicionamiento de señal, lo que lo hace viable para aplicaciones biomédicas.

Como se señaló en el resumen, el hecho de que el prototipo se encuentre en la etapa previa a pruebas representa un hito importante, ya que permitirá validar experimentalmente las simulaciones y modelos teóricos empleados durante su concepción. Dichas pruebas constituirán la base para ajustar parámetros de sensibilidad, linealidad, histéresis y estabilidad térmica, así como para evaluar el desempeño del empaquetado y la respuesta del sensor bajo condiciones reales de operación.

En este avance no solo se abre la posibilidad de disponer de un sensor de presión confiable para bajas presiones fabricado en México, sino que también sienta las bases para futuras iteraciones donde se puedan integrar mejoras como sistemas de auto-calibración, comunicación inalámbrica o materiales alternativos que incrementen la robustez del dispositivo. De este modo, el desarrollo culmina en una plataforma tecnológica sólida y escalable, lista para ser validada y optimizada, con un alto potencial de transferencia a aplicaciones reales y de impacto en distintos sectores estratégicos.

Trabajo futuro

Como trabajo a futuro, el siguiente paso en el desarrollo del sensor de presión recientemente microfabricado será su caracterización experimental bajo diferentes condiciones de operación. Este proceso incluirá la evaluación de parámetros críticos como sensibilidad, rango dinámico, histéresis,

linealidad y estabilidad térmica, con el objetivo de validar los modelos de simulación empleados durante su diseño. Asimismo, será necesario analizar el desempeño del empaquetado y la respuesta del dispositivo frente a bajas presiones, asegurando su confiabilidad en entornos reales de aplicación. Los resultados de esta caracterización no solo permitirán optimizar el diseño actual mediante ajustes en geometría y materiales, sino que también abrirán la posibilidad de integrar mejoras futuras, como circuitos de acondicionamiento integrados, calibración automática y comunicación inalámbrica, consolidando al sensor como una plataforma versátil y escalable para aplicaciones biomédicas, industriales y ambientales.

Agradecimientos

Agradecemos a Secihti por otorgar el número de beca Posdoctoral #554885 para Carlos Augusto López Lazcano. Agradecimientos a CIDESI y al Posgrado de PICYT. Agradecimientos a la Gerencia de Microtecnologías y Semiconductores de la Dirección de Semiconductores y Electrónica. Agradecimiento al personal de Microtecnologías por el soporte en el Laboratorio de cuarto limpio. Agradecimiento de Víctor Samuel Balderrama Vázquez a la Secihti dentro del marco de Investigadores por México, bajo el Proyecto No. 2, en cual se desarrolla este trabajo. Proyecto apoyado por la “Secihti” en el año 2025. Proyecto MADTEC-2025-M-96.

Referencias

- Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L. & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, Vol. 9:156.
- Song, P., et al (2020). Recent Progress of Miniature MEMS Pressure Sensors. PMC (NCBI). PMC
- Fang, X., et al. (2025). Pressure Sensors Based on the Third-generation Semiconductor Materials (e.g. SiC single crystals). ScienceDirect. ScienceDirect
- Javed, Y., Mansoor, M., & Irtiza Ali Shah (2019). A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications. *Sensor Review*, ResearchGate
- Suter, J. D., Hohimer, C. J., Fricke, J. M., Christ, J., Kim, H., & Evans, A. T. (2013) Principles of Meniscus-Based MEMS Gas or Liquid Pressure Sensors. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, volumen 22, no. 3, 2013: pp. 670-677.
- Ansari, M. Z. Cho, C. Choi, W. Lee, M. Lee, S. and Kim, J. (2013) Improving sensitivity of piezoresistive micro cantilever biosensors using stress concentration region designs. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 50, p. 505501.
- Malhaire, C. and Barbier, D. (2003). Design of a polysilicon-on-insulator pressure sensor with original polysilicon layout for harsh environment, *Thin Solid Films*, vol. 427, no. 1–2, 362–366.
- Kumar, S. S. and Pant, B. D. (2015) “Polysilicon thin film piezoresistive pressure micro sensor: design, fabrication and characterization,” *Microsyst. Technol.*, vol. 21, no. 9. 1949– 1958.
- Nag, M. Singh, J. Kumar, A. P. Alvi, A. and Singh, K. (2019). “Sensitivity enhancement and temperature compatibility of graphene piezoresistive MEMS pressure sensor,” *Microsyst. Technol.*, 1–6.
- Mohamad, M. Soin, N. and Ibrahim, F. (2018). “Design optimization of high sensitivity MEMS piezoresistive intracranial pressure sensor using Taguchi approach,” *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 6, 2637–2652.
- Tran, A. Zhang, X. and Zhu, B. (2018). “Mechanical Structural Design of a Piezoresistive Pressure Sensor for Low-Pressure Measurement: A Computational Analysis by Increases in the Sensor Sensitivity,” *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2023.

Modelado Y Simulación De Interacción Fluido-Estructura De Una Celda Microfluídica Para Un Sensor Piezoresistivo Con Aplicaciones En Detección De Pesticidas

Gerardo Montoya Medina¹, David Andrés Fernández Benavides¹, Saúl Piedra González²

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² SECIHTI Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
g.montoya@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. Las plataformas de biodetección que emplean microcantilévers presentan retos significativos relacionados con la interacción compleja entre fluidos, transporte de especies y fenómenos de interacción fluido-estructura, los cuales limitan la sensibilidad de detección. La comprensión y el control de estos fenómenos resultan esenciales para optimizar el desempeño de dichos sistemas. Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo computacional que integra simulación multifísica para analizar la interacción fluido-estructura en la microcelda del biosensor multiespectral KANAN.PESTI. La metodología considera la simulación acoplada del flujo en la celda microfluídica y del microcantilever, incorporando el efecto de la presión hidrodinámica sobre el comportamiento mecánica del microcantilever. En futuras investigaciones se acoplará también el transporte de especies en la microcelda. La finalidad es proporcionar una herramienta de simulación que facilite el diseño y la optimización de nuevas plataformas de biodetección, contribuyendo al desarrollo de sistemas más eficientes en etapas tempranas de desarrollo.

Palabras Clave: Multifísica, Microcantilévers, Biosensor.

1. Introducción

El trabajo de Bejarano González et al. (2007) destaca que el uso intensivo de pesticidas en México genera impactos adversos tanto para el medio ambiente como para la salud pública, debido a la alta dependencia en la agricultura, muchos de los cuales están prohibidos en otros países. Aunque existen regulaciones ambientales, su efectividad se ve limitada por la falta de mecanismos de validación científica independiente y la escasez de métodos eficientes para la detección de estos contaminantes.

Detectar pesticidas representa un desafío técnico, dado que son moléculas pequeñas que escapan a los métodos convencionales de detección. Las plataformas de biodetección basadas en microcantilévers se presentan como una alternativa prometedora; sin embargo, su desarrollo enfrenta limitaciones al exponer el microcantiléver al reactivo en medio acuoso. La falta de análisis detallado de esta etapa puede derivar en fallas de detección no evidentes, ya que no se comprende con precisión el transporte de especies, la interacción fluido-estructura, la captura de las moléculas objetivo ni el tiempo de permanencia de estas en el transductor. En ese sentido, la simulación

Modelado Y Simulación De Interacción Fluido-Estructura De Una Celda Microfluídica Para Un Sensor Piezoresistivo Con Aplicaciones En Detección De Pesticidas

multifísica se posiciona como una herramienta clave para entender y optimizar estos sistemas de biodetección desde las etapas iniciales de diseño, reduciendo tiempos y recursos asociados al desarrollo de prototipos físicos.

En este estudio, se implementa un modelo de interacción fluido-estructura de doble vía del biosensor KANAN.PESTI mostrado en la Figura 1 a), con el propósito de caracterizar de manera precisa el flujo de fluidos en la celda microfluídica (Figura 1 b) y el comportamiento de los microcantilévers (Figura 1 c) bajo diferentes condiciones de operación.

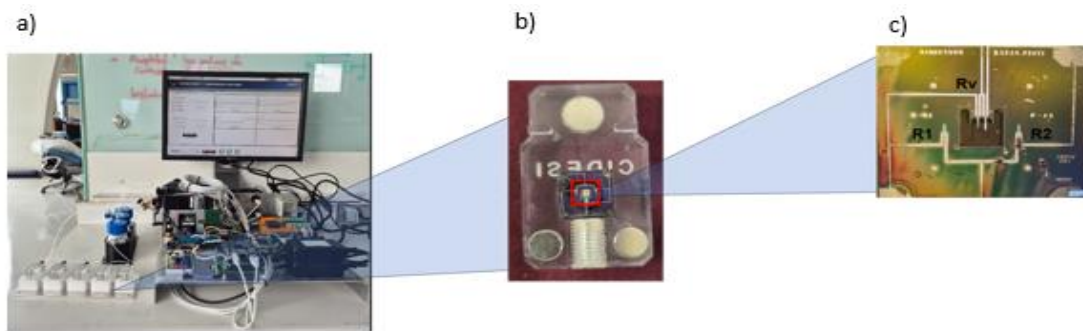


Figura 1 a) Plataforma del biosensor multispectral, Figura 1 b) Celda microfluídica, Figura 1 c) Microchip basado en microcantilévers.

2. Estado del arte.

Se realizó una revisión bibliográfica detallada con el fin de consolidar el conocimiento actual relacionado con la interacción fluido-estructura (FSI) en sistemas a escala microfluídica. En primera instancia, el trabajo de Saxena et al. (2024) explora el concepto de un mecanismo de detección de presión de microfluidos a través de un microcanal, integrado con diferentes estructuras de microcantilévers. El diseño incluye cuatro tipos de física (malla móvil, mecánica de sólidos, flujo laminar e interacción fluido-estructura) para optimizar la presión dentro del microcanal. Por otra parte, Alrashaed et al. (2024) emplearon análisis de elementos finitos para simular la deflexión de un microcantiléver base silicio recubierto con polimetacrilato de metilo en respuesta a diferentes vapores de alcohol volátiles (VAV), como metanol, etanol e isopropanol. Se utilizó un marco de simulación multifísica para analizar la respuesta dependiente del tiempo de un microcantiléver a diferentes concentraciones de vapores que incorporan interacción fluido-estructura. Este modelo integró los aspectos del flujo laminar, mecánica de sólidos y el transporte de especies diluidas. En el trabajo de Chen et al. (2014) se presenta un sensor de flujo basado en cantiléver está diseñado en función de la presión diferencial. Se utilizan análisis numéricos y simulación para investigar las características FSI (interacción fluido-estructura) del sensor de flujo de presión diferencial. Particularmente, los autores analizan el mecanismo de funcionamiento del sensor de flujo en función de los resultados del sistema acoplado de interacción fluido-estructura. La simulación computacional se realiza mediante el software comercial ANSYS. A partir de los resultados obtenidos, los autores optimizan la forma y el tamaño del sensor de flujo.

3. Modelo físico y matemático

Modelo de interacción fluido-estructura

En esta etapa se planteó el esquema conceptual para describir el acoplamiento entre el flujo en el interior de la celda microfluídica y la respuesta mecánica del microcantiléver utilizado como transductor.

La metodología de la implementación del modelo fue la siguiente:

- Definición de las ecuaciones gobernantes: ecuaciones de Navier-Stokes en régimen laminar y de ecuaciones de Navier-Cauchy (Ferreira et al., 2024).
- Establecimiento de las condiciones de frontera y criterios de acoplamiento entre el dominio de fluido y el sólido, describiendo cómo las fuerzas hidrodinámicas inducen deformaciones en los microcantilévers y cómo estas, pueden a su vez, influir localmente en el flujo.
- Selección de la estrategia de acoplamiento (implícito o explícito; unidireccional o bidireccional) en función de las características geométricas y operativas del sistema a estudiar.
- Ejecución y análisis de resultados del flujo y comportamiento mecánico de los microcantilévers.

Diseño y definición del sistema a simular

Posterior a la identificación de las interacciones físicas relevantes, se procedió al diseño del sistema que sería simulado. En esta fase se desarrollaron las siguientes actividades:

- Identificación de los componentes principales del sistema: geometría de la celda microfluídica, dimensiones de los microcantilévers, propiedades del fluido de trabajo y condiciones de operación (caudales, temperatura, presiones).
- Selección de variables clave para el análisis: distribución de presión y velocidad, deformación máxima de los cantilévers, esfuerzo equivalente de Von Mises y parámetros de interés para el diseño.
- Elaboración del modelo geométrico y mallado del dominio computacional utilizando software especializado (ANSYS Fluent y Transient Structural).
- Asignación de propiedades físicas de materiales (densidad, viscosidad, módulo de elasticidad) y diseño de las mallas de simulación asegurando resolución suficiente en regiones críticas.

El propósito de esta fase fue construir un modelo computacional robusto que permitiera emular de forma realista el comportamiento del sistema, generando resultados confiables para análisis posteriores.

Solución numérica

Para iniciar con el modelado se implementó la parte de interacción fluido-estructura para simular el efecto del flujo sobre el comportamiento mecánico de los microcantilévers. Para esto se utilizó el

Modelado Y Simulación De Interacción Fluido-Estructura De Una Celda Microfluídica Para Un Sensor Piezoresistivo Con Aplicaciones En Detección De Pesticidas

software ANSYS acoplando los módulos de análisis estructural y de flujo de fluidos de forma dinámica (Figura 2). Para el análisis del flujo de fluidos se utilizó una malla tetraédrica que puede deformarse a lo largo del tiempo, mientras que para discretizar los microcantilévers, se generó una malla hexaédrica.

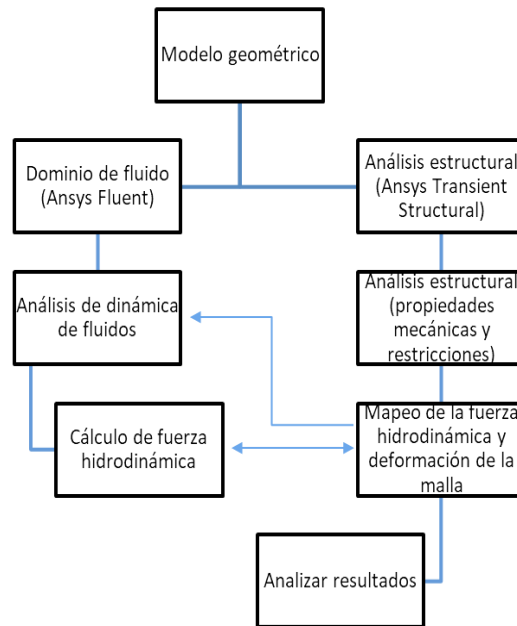


Figura 2. Sistema acoplado para la simulación de interacción fluido-estructura de la celda microfluídica del biosensor multispectral KANAN.PESTI.

Para el microcantiléver de PET, la base se fijó restringiendo todos los grados de libertad para simular un anclaje rígido, mientras que la superficie libre interactuó con el fluido. En la Tabla 1, se muestran las propiedades mecánicas del material de los microcantilévers.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del microcantiléver.

Material	Polietileno tereftalato (PET)
Módulo de Young	2898 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3887
Resistencia máxima a la tracción	57.45 MPa
Límite elástico a la tracción	52.44 MPa

Adicionalmente, en la Tabla 2 se enlistan los parámetros utilizados para la simulación del flujo. En el dominio de flujo, la entrada se definió con velocidad uniforme de 0.012 m/s en dirección X, la salida Modelado Y Simulación De Interacción Fluido-Estructura De Una Celda Microfluídica Para Un Sensor Piezoresistivo Con Aplicaciones En Detección De Pesticidas

con presión atmosférica, y las paredes del canal se consideraron no deslizantes. Estas condiciones aseguran una representación física realista y la estabilidad de la simulación acoplada fluido-estructura.

Tabla 2. Parámetros simulación de flujo.

Modelo	Viscoso (Laminar)
Fluido	Agua
Densidad	9.982e-7 kg/mm ³
Velocidad de entrada	0.012 m/s (eje x)
Fujo másico	9.4e-6 kg/s

4. Resultados

En la Figura 3 a) se muestra el modelo CAD de la celda microfluídica, mientras que en el interior se localizan dos microcantilévers que funcionan como transductores del sistema. Mientras que en la Figura 3 b) se señala la entrada y la salida (flecha roja) del fluido, además se muestran los resultados de las líneas de corriente en un instante de tiempo del flujo dentro de la celda microfluídica del biosensor KANAN-PESTI. Se observa cómo el flujo en la celda es desviado por la presencia de los microcantilévers, lo que conlleva a zonas de alta y baja presión en las caras inferior y superior de los microcantilévers.

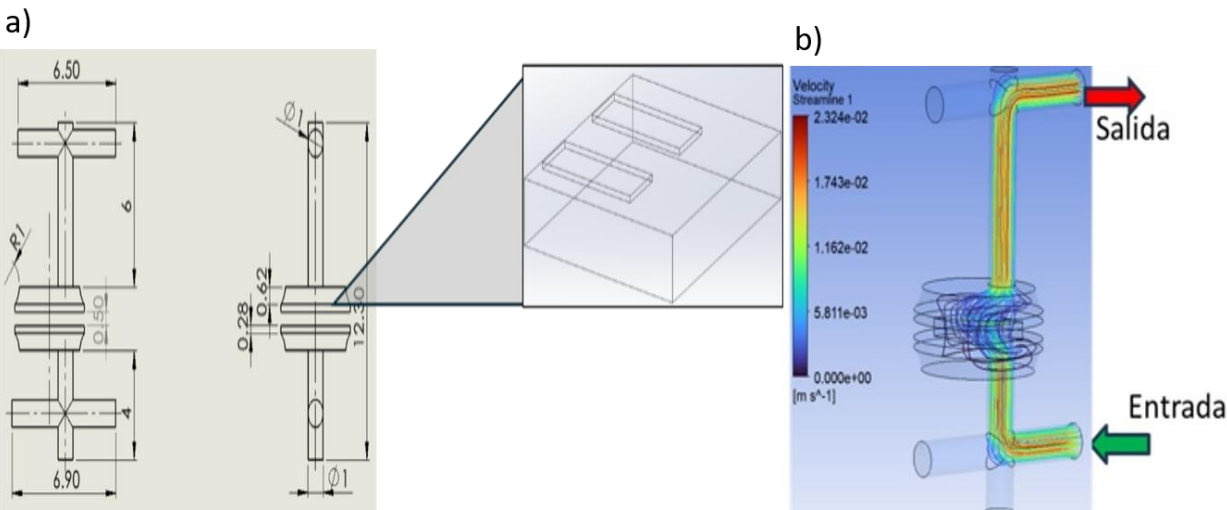


Figura 3 a) Modelo CAD de la celda microfluídica. Figura 3 b) Líneas de corriente del flujo dentro de la celda microfluídica.

La distribución de presiones obtenidas dentro de la celda microfluídica se muestra en la Figura 4 a) y b) para la cara superior y la inferior de los cantilvers, respectivamente. Se observa que la distribución de presiones no es uniforme en los microcantilvers y que la distancia entre ellos juega un papel relevante en la formación de zonas de baja y alta presión, lo que generará una fuerza hidrodinámica no uniforme sobre ellos. La fuerza hidrodinámica genera la deflexión de los microcantilvers, la cual debe minimizarse para no perturbar la detección de los analitos durante el funcionamiento del biosensor.

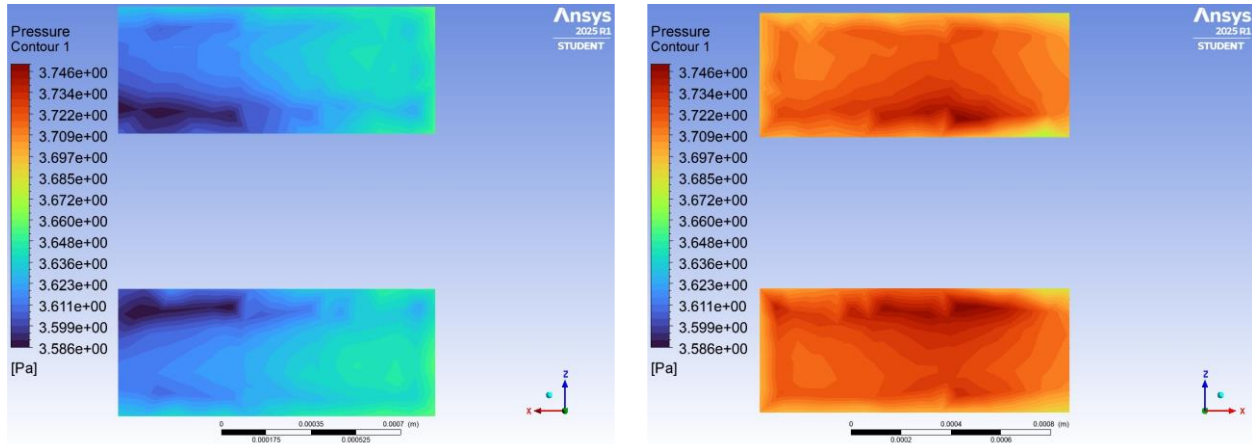


Figura 4 a) Vista superior de los microcantilévers. Figura 4 b) Vista inferior de los microcantilévers. (campo de presiones en los microcantilévers)

En la Figura 5 se muestra el resultado de la deformación total de los microcantilvers debido a la fuerza hidrodinámica producida por el flujo. La vista isométrica (Figura 5 a) y la vista lateral (Figura 5 b) muestran que la máxima deformación obtenida fue de 3.26 nm. Finalmente, en la Figura 5 c) se presenta el resultado del campo de esfuerzos equivalentes de Von Mises en los microcantilvers. Es importante señalar que la implementación de estas simulaciones representa un avance relevante de este proyecto, ya que uno de los fenómenos que se quieren modelar es justamente la interacción fluido-estructura dentro de la microcelda.

5. Conclusiones

A partir del avance alcanzado en este trabajo, se concluye que la revisión del estado del arte permitió identificar una limitada atención en la literatura hacia el del flujo y comportamiento mecánico en plataformas de biodetección basadas en microcantilvers, particularmente desde un enfoque multifísico. Este hallazgo resalta la pertinencia e innovación de la investigación realizada, al aportar una contribución concreta en el desarrollo de herramientas de simulación aplicadas al diseño y optimización de biosensores.

Se ha logrado formular y definir un modelo de interacción fluido-estructura que describe el acoplamiento entre el flujo en la celda microfluídica y la respuesta mecánica del microcantiléver. Las simulaciones iniciales, realizadas mediante el acoplamiento entre ANSYS Fluent y el módulo de

análisis estructural transitorio, permitieron caracterizar la deformación inducida por el flujo sobre el sensor, obteniendo resultados preliminares coherentes con el comportamiento esperado.

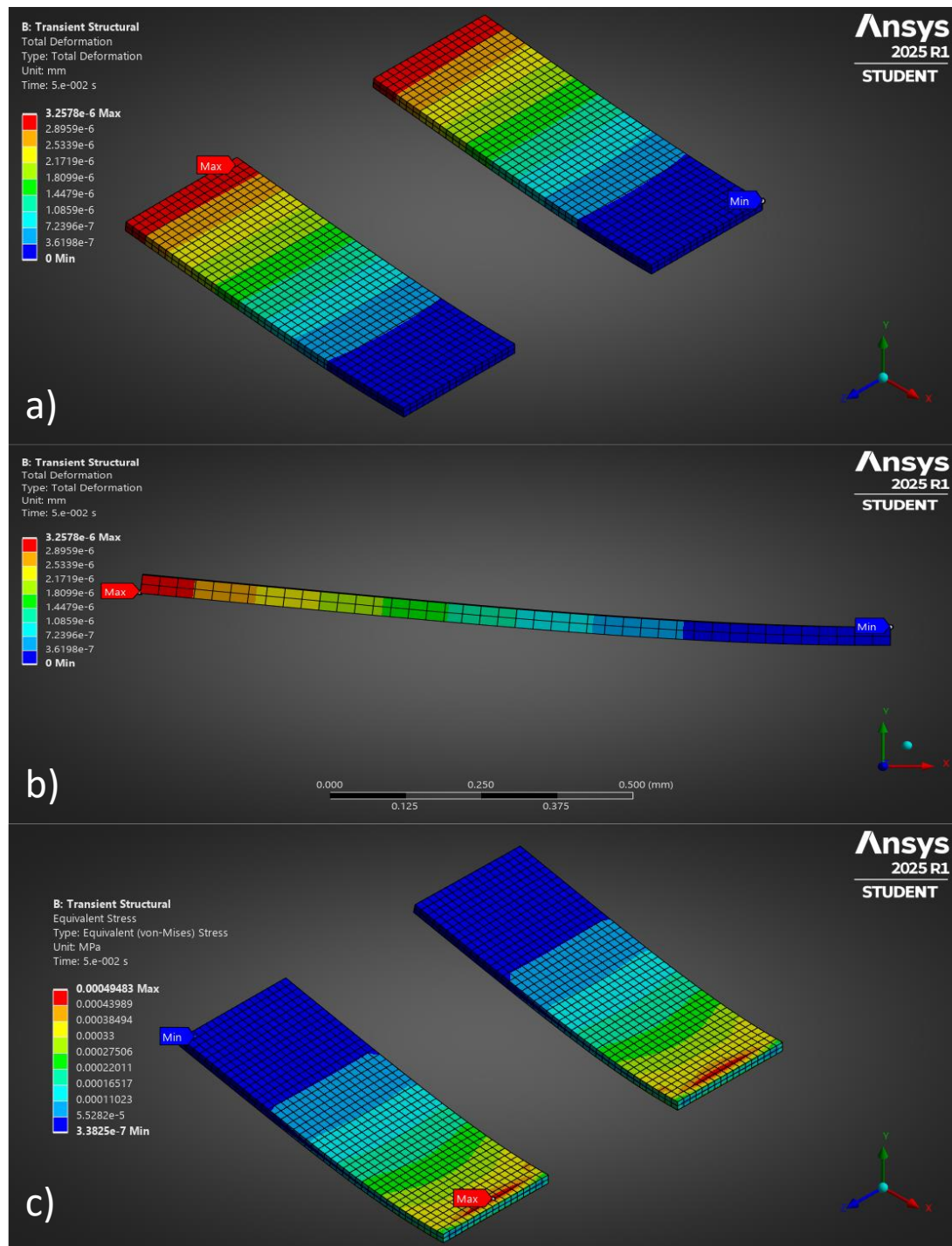


Figura 5 a) Distribución de la deformación en los microcantilévers. b) Vista lateral del cantiláver. c) Distribución de los esfuerzos en el cantiláver.

En las siguientes etapas de este trabajo se buscará integrar un modelo de transporte de especies, lo que posibilitará analizar los perfiles de concentración y distribución de analitos en el interior de la celda microfluídica bajo diferentes condiciones de operación. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos mediante simulación con datos experimentales generados en la plataforma KANAN.PESTI, con el propósito de validar la herramienta desarrollada y evaluar su precisión, estableciendo así una base sólida para su aplicación en el diseño de nuevas plataformas de biodetección.

Referencias

- Bejarano González, F., Aguilera Márquez, D., David Álvarez, J., Eliakym, S., Meraz, A., Aguilar, O. A., De Jesús, P., Bastidas, B., De Los, V., Beltrán, A., Héctor, C., Bernardino Hernández, U., Betancourt, M., Carlos, L., Calderón Vázquez, L., Castillo, J., María, C., Carmen, D., Olmos, C., ... Pa, R. A. (2007). Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. www.pmrMexico.org.mx
- Saxena, A., Kumar, M., & Singh, K. (2024). Comparative examine of fluid pressure within microchannel through integrated cantilevers for microfluidic applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.101>
- Alrashed, H., Obeid, A., Albrithen, H., Muthuramamoorthy, M., Rahman, S., Al-Gawati, M. A., & Alodhayb, A. N. (2024). Modeling the mechanical response of microelectromechanical system (MEMS)-based sensors to volatile alcohol vapors: A finite element analysis. *AIP Advances*, 14(3). <https://doi.org/10.1063/5.0195105>
- Chen, P., Zhao, Y., Tian, B., & Li, Y. (2014). Design and fluid-structure interaction analysis of a micromachined cantilever-based differential pressure flow sensor. *Micro and Nano Letters*, 9(10), 650–654. <https://doi.org/10.1049/mnl.2014.0245>
- Ferreira, M., Carvalho, V., Ribeiro, J., Lima, R. A., Teixeira, S., & Pinho, D. (2024). Advances in Microfluidic Systems and Numerical Modeling in Biomedical Applications: A Review. In *Micromachines* (Vol. 15, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/mi15070873>

Desarrollo De Estrategias Para La Fabricación De Recubrimientos Por Deposición De Energía (DED) Dirigida. Análisis Del Proceso De Fabricación Y Retos Tecnológicos

Luis Miguel Ballesteros Ospina^{1,2}, Arturo Gómez-Ortega¹, Christian Félix-Martínez¹, Juan Sebastián Rudas Florez², Juan Manuel Gonzalez-Carmona^{1*}

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

² Grupo de Investigación en Innovación y Energías GIEN, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, 050034.

juan.gonzalez@cidesi.edu.mx

Resumen. La Industria 4.0 impulsa la adopción de tecnologías avanzadas para optimizar la eficiencia, sostenibilidad y en procesos productivos. La manufactura aditiva (AM) se ha consolidado como uno de los pilares en la Industria 4.0 por su capacidad de ofrecer flexibilidad y personalización de productos de alto valor agregado. Sectores como el aeronáutico, automotriz y aeroespacial han encontrado en la manufactura aditiva una herramienta para el desarrollo de piezas que mejoren las estrategias de fabricación actuales. Entre las diferentes familias de AM, la Deposición de Energía Dirigida (DED) ha adquirido relevancia por su versatilidad y creciente implementación industrial. Esta destaca por integrar sistemas robóticos avanzados con un láser de alta potencia que, alimentado con un material de aporte, permite la fabricación de recubrimientos, reparación de piezas de gran tamaño y la extensión de la vida útil de componentes. No obstante, este proceso presenta retos técnicos, tecnológicos y científicos relacionados con la materia prima, el control de variables de proceso y la calidad final de los recubrimientos. El siguiente estudio busca ofrecer una revisión general del DED, discutiendo ventajas, limitaciones, parámetros críticos y perspectivas futuras de esta tecnología aditiva.

Palabras Clave: Deposición de Energía Dirigida (DED), Parámetros de Fabricación, Calidad del Recubrimiento.

1. Introducción

La manufactura aditiva (AM) y la robótica avanzada son dos de los pilares tecnológicos de la industria 4.0, esta cuenta con ventajas industriales que han permitido su implementación en años recientes. La fabricación aditiva es el proceso de adicionar material (Guo y Leu 2013) capa-por-capita hasta generar el objeto diseñado (Cai y Zhou 2022). La manufactura aditiva cuenta con siete familias representativa, una de ellas es la Deposición de Energía Dirigida (DED). Esta tecnología combina elementos de la robótica avanzada con un sistema láser de alta energía el cual es utilizado para fundir una superficie y un material de aporte (polvo/alambre) para fabricar superficies (Svetlizky et al. 2021), como se observa en la Figura 1.

Desarrollo De Estrategias Para La Fabricación De Recubrimientos Por Deposición De Energía (DED) Dirigida. Análisis Del Proceso De Fabricación Y Retos Tecnológicos

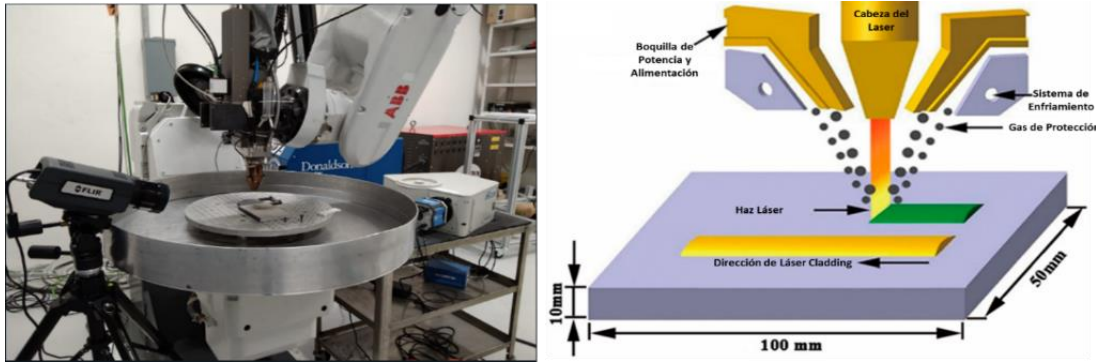


Figura 1. Esquema de deposición de energía Dirigida por Láser Cladding, modificado de (Ju et al. 2018).

Por su versatilidad, es una tecnología muy apetecida en la industria para la fabricación de recubrimientos y reparación de componentes de gran tamaño especialmente en el sector minero, aeroespacial y automotriz. A pesar de las ventajas que aportan estas nuevas tecnologías, esta es muy dependiente de factores como el tipo de equipo, materias primas y condiciones del proceso aditivo que las hacen difíciles de normalizar para su uso en procesos industriales. La Tabla 1 muestra un compendio de trabajos que reportan las ventajas y desventajas del DED para establecer la calidad de los recubrimientos metálicos (Félix-Martínez et al. 2021; Singh et al. 2014). Como se puede observar, en la literatura se encuentran muchas aproximaciones en la técnica DED, con particular énfasis en la adecuada selección de parámetros de proceso para obtener recubrimientos de calidad para la industria.

Tabla 1. Pros y contras del proceso DED

Materiales	Ventajas	Desventajas	Referencia
Metales	Fabricar piezas complejas	Calidad uniforme entre capas	(Gokhale y Kala 2022)
316L	Buena unión metalúrgica	Grietas por esfuerzo térmicos	(Oh et al. 2019)
316L	Mas veloz que otras técnicas	Alta porosidad, baja eficiencia	(Lin et al. 2020)
Ti, Inconel, 316L, Al	Reparación de componentes de gran tamaño	Limitación a escala industrial por parámetros de fabricación	(Farias, dos Santos, y Oliveira 2024)
Inconel, 316L	Reparar elementos desgastados	Sobre deposición por mala elección de variables proceso	(Touzé et al. 2025)
Ti	Fabricar depósitos con materiales heterogéneos	Requieren un maquinado posterior luego del proceso	(Ahn 2021)

El siguiente estudio se enfocó en el desarrollo de una estrategia para la fabricación de recubrimientos metálicos por DED. Se describe la tecnología de manufactura aditiva, análisis de parámetros de fabricación, evaluación de calidad de los recubrimientos y finalmente una discusión de los retos tecnológicos en años venideros para esta tecnología.

2. Metodología

La metodología del este trabajo se resume en la Figura 2. Se ahondará sobre el proceso DED, las aplicaciones de la tecnología y se discutirán pros y contras que acarrea esta tecnología, con especial énfasis en los criterios de selección del proceso aditivo, que serán divididos en tres secciones como se muestra en la Figura 2.

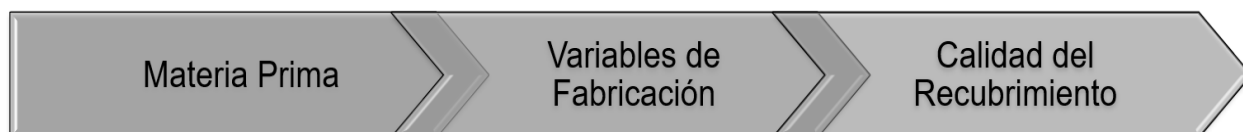


Figura 2. Selección de criterios de proceso del DED

2.1. Selección de material

Se define como las características fisicoquímicas del sustrato y del material de aporte). El sustrato elegido fue un acero AISI M2, característico por su uso como acero rápido en herramientas de corte. Aunque tiene una buena resistencia al desgaste, este posee una baja resistencia a la corrosión. Por otro lado, el material de aporte empelado fue polvo de acero inoxidable 17-4PH, con tamaños de partícula entre 30-60 μ m. Este material ha sido empleado en sectores navales y aeroespaciales por su buena resistencia a la corrosión, lo que permitirá con el proceso DED apropiar al sustrato de propiedades que por si solo no posee. La Tabla 2 muestra la composición química del sustrato y del material de aporte respectivamente.

Tabla 2. Composición química del sustrato y del material de aporte para el proceso DED.

Composición Química (% Peso)	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo
Acero M2	Balance	0.85	0.30	4.15	5.0	2.0
Acero 17-4PH	Balance	0 – 0.07	0 - 1.0	0 - 1.0	15.0-17.50	-

Análisis del proceso de fabricación mediante la modificación de parámetros del proceso DED.

Son el conjunto de parámetros que en conjunto darán como resultado el recubrimiento final. Estos deben ser cuidadosamente seleccionados para tener un recubrimiento de calidad y están en función de variables de fabricación como se muestra en la Figura 3.

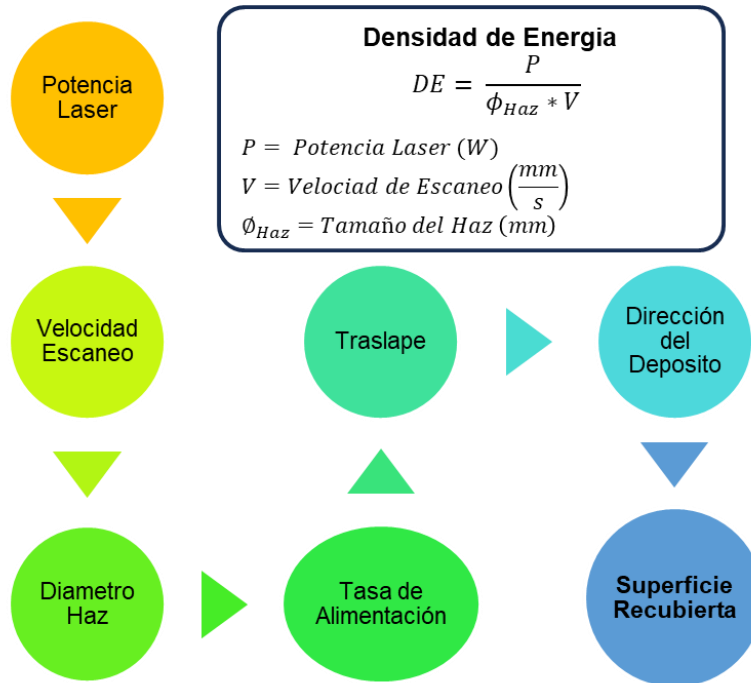


Figura 3. Variables de fabricación del proceso DED

El proceso de Laser Cladding (LC) fue realizado en una celda robótica (CIDESI, México) la cual lo compone un brazo robótico ABB IRB6620-120, una fuente láser Trumpf TruDisk 6002 de longitud de onda 1030 nm de 4000W de potencia máxima y una boquilla con cabezal de deposición láser coaxial de tres puertos Trumpf BEO. Los parámetros de fabricación iniciales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 3. Parámetros de fabricación de recubrimientos metálicos.

Tipo de Onda	Potencia	Velocidad	Diámetro del Haz	Tasa de Alimentación
Continua	1000 W	5 mm/s	2.86 mm	9 g/min

El efecto de la potencia y la velocidad fue evaluado mediante un segundo plan experimental, fijando variables del proceso como el tipo de onda, la tasa de alimentación y el diámetro del haz, como lo muestra la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de fabricación de recubrimientos metálicos

Potencia (W)	Velocidad (mm/s)
--------------	------------------

1200	5
1400	7
1400	5
1400	7

Calidad de los depósitos

Estos se encuentran relacionados con la geometría del recubrimiento (%dilución y %porosidad), estos se describen en la Ecuaciones 1 y Ecuación 2.

$$\% Dilucion = \frac{Area_{Profundidad}}{Area_{Altura} + Area_{Profundidad}} * 100 \quad (1).$$

Este relaciona el área de penetración del material de aporte con el área de penetración y de material recubierto sobre el sustrato. Por otro lado, el porcentaje de porosidad se describe en la Ecuación 2.

$$\% Porosidad = \frac{\sum Area_{Poros}}{Area_{Altura} + A_{Profundidad}} * 100 \quad (2).$$

Esta ecuación toma la razón de la relación de la sumatoria de los poros de la sección transversal del recubrimiento con la sumatoria del área de penetración y aporte de material de aporte del recubrimiento.

Para obtener la sección transversal de los recubrimientos, se empleó una cortadora Acutom con disco de Diamante a 1500 RPM bajo lubricación constante. La sección transversal resultante se monta en una vácueta (Opal X-Press) y finalmente se realiza la preparación metalográfica bajo la norma ASTM E 11 (ASTM 2011) para dejarla con un acabado espejo que permita por medio de microscopia óptica confocal (Olympus DSX 510) tomar la relación de las ecuaciones 1 y 2.

Finalmente, se discutirá sobre los retos en años venideros con estas tecnologías, siendo críticos en la manufactura aditiva y la vinculación de la industria 4.0 para tener procesos eficientes y competitivos para los requerimientos locales y mundiales.

3. Resultados

Selección del material.

La selección de la materia prima mostró el material de aporte presenta tamaños de partícula pequeños (30-60µm) en comparación con otros trabajos estudiados (Muslim et al. 2023; Nie, Zhang, Wang, Yin, et al. 2022; Nie, Zhang, Wang, Zhang, et al. 2022), lo que puede tener una incidencia en el recubrimiento deseado. Por otro lado, al comparar la composición química del sustrato y del material de aporte (ver Tabla 1), se observa que el principal elemento mayoritario es el hierro, además que de compartir otros elementos aleantes como el Cr, Si y Mn que pueden ayudar a tener un mejor anclaje metalúrgico entre el sustrato y el material de aporte. Las diferencias en Carbono y Cromo respectivamente muestran que el sustrato presenta una alta resistencia al desgaste,

Desarrollo De Estrategias Para La Fabricación De Recubrimientos Por Deposición De Energía (DED)

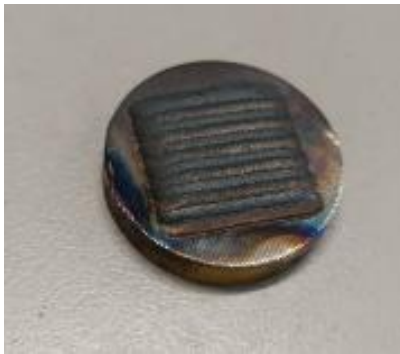
Dirigida. Análisis Del Proceso De Fabricación Y Retos Tecnológicos

característico de los aceros de herramientas (HSS), pero carece de buena resistencia a la corrosión. En contraste con el materia de aporte, siendo el Cr el segundo elemento mayoritario que permite la excelente resistencia en entornos corrosivos (Garcia-Cabazon et al. 2022; Nie, Zhang, Wang, Yin, et al. 2022; Stoudt, Campbell, y Ricker 2022).

Análisis del proceso de fabricación mediante la modificación de parámetros del proceso DED.

El recubrimiento depositado con los parámetros iniciales se muestra en las Figura 5a. Se observa el material depositado de manera homogénea sobre el sustrato.

a)



b)

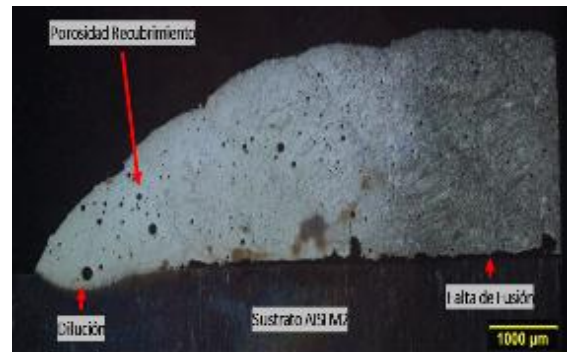


Figura 5. Depósitos por DED, a) Parámetros iniciales del proceso, b) sección transversal.

Un análisis en la sección transversal del recubrimiento refleja otros defectos como se muestra en la Figura 5b. De izquierda a derecha se observa una dilución al iniciar el depósito. Sin embargo, es evidente la falta de dilución generando una separación entre el sustrato y el recubrimiento debido a los parámetros de proceso seleccionados (Muslim et al. 2023). También se observan poros alrededor del recubrimiento, es decir, en la zona de dilución como de crecimiento de material.

La evaluación en la calidad de los depósitos (Tabla 5) reporta que con los parámetros iniciales se logra obtener un recubrimiento con poca dilución y alta porosidad.

Tabla 5. Calidad del depósito con parámetros iniciales.

Dilución %	Porosidad %
1.50±0.61	1.33

Las secciones transversales de los segundos parámetros de fabricación se muestran en la Figura 6. Es evidente la mejora de la dilución con al incrementar la potencia. A causa de una mayor cantidad de energía que permite un anclaje total tanto el sustrato como el material de aporte. La velocidad de 5mm/s a su vez logra una mayor cantidad de material depositado ya que el laser permanece un mayor tiempo en la zona (Figura 6a). En contraste aumentar la velocidad genera una menor cantidad de material depositado (Figura 6b).

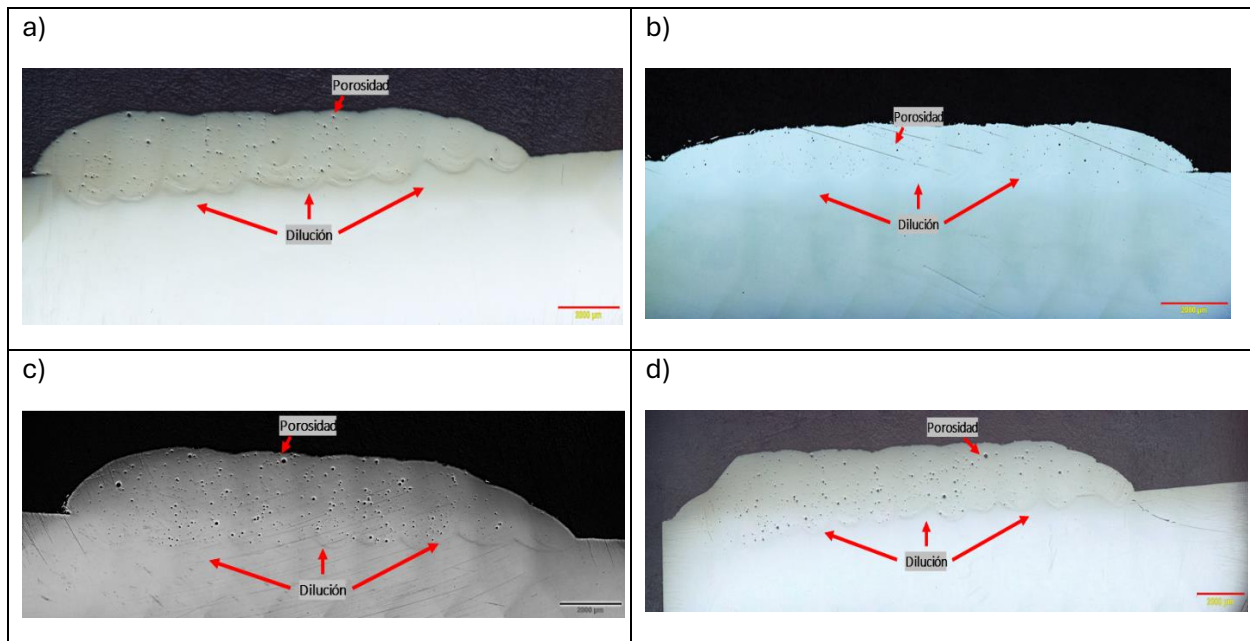


Figura 6. Secciones transversales de segundos parámetros, a) 1200W 5mm/s, b) 1200W 7mm/s, c) 1400W 5mm/s, d) 14000W, 7mm/s.

Por otro lado, al aumentar la potencia a 1400W, la dilución total permanece indicando que los parámetros de proceso permitieron fabricar recubrimientos con una alta afinidad metalúrgica entre el sustrato y el material de aporte.

Calidad de los depósitos

La Figura 7 muestra la evolución en la calidad de los recubrimientos al modificar los parámetros experimentales. Es evidente el aumento en la dilución de los recubrimientos al incrementar la potencia (Figura 7a), siendo esta una variable crítica del proceso DED ya que no solo permite fundir el material de aporte, sino también el sustrato para generar así un anclaje metalúrgico de las materias primas. La velocidad por otro lado se asocia a la cantidad de material depositado durante el proceso aditivo.

a)

b)

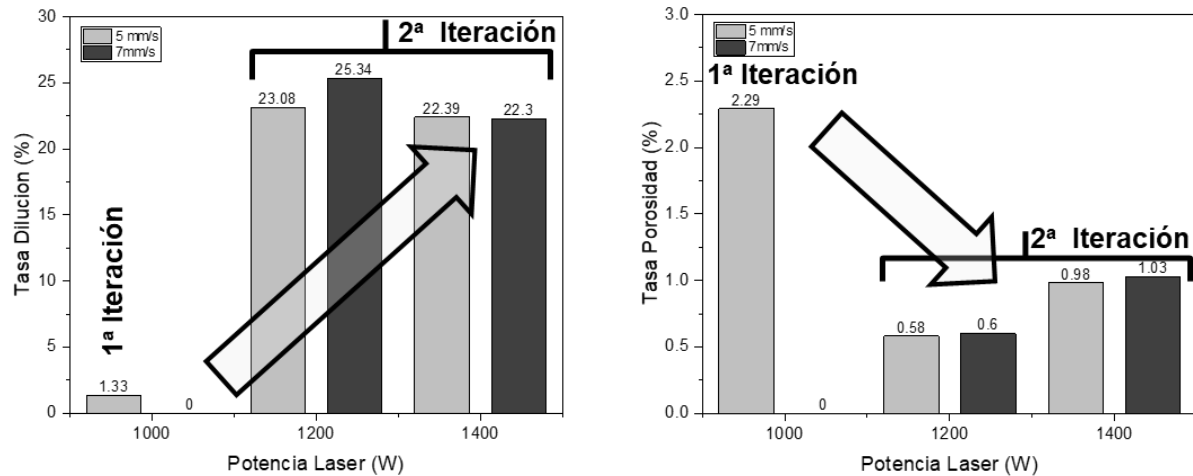


Figura 7. Evolución de los parámetros de proceso, a) Tasa de dilución, b) Tasa de porosidad.

La evolución en la porosidad muestra una tendencia a decrecer con la modificación de los parámetros de proceso (Figura 7b). La generación de poros se atribuye al atrapamiento de gases durante el proceso DED (Nie, Zhang, Wang, Zhang, et al. 2022). Este proceso cuenta con altas tasas de calentamiento y enfriamiento. El láser de alta energía libera vapores del sustrato y del material de aporte durante el proceso de fusión, las corrientes de Marangoni generan turbulencias en el charco fundido que actúan como un sistema de empuje para la liberación de gases (Mills et al. 1998). Sin los parámetros de proceso adecuado, este fenómeno se ve entorpecido generando que los gases no puedan salir hacia la superficie y queden atrapados durante la solidificación del recubrimiento. De allí la importancia en la potencia y la velocidad del proceso para tener una sinergia durante el proceso de fabricación para obtener recubrimientos de alta calidad.

Es indudable que la manufactura aditiva en el proceso DED esta lejos de estar optimizada. La variabilidad de equipos, materiales y procesos de fabricación establecen retos venideros para los años posteriores. La Figura 8 muestra los retos tecnológicos del DED. Entre ellos se encuentra la optimización de parámetros de proceso incorporando elementos de la industria 4.0 como la manufactura inteligente y la inteligencia artificial, con el fin de reducir defectos y mejorar el acabado superficial. A su vez es necesario optimizar los posts-procesos que sean comparables con materiales tradicionales. Finalmente es importante la integración de sistemas de control para realizar monitoreo en tiempo real del proceso aditivo y mejorar la eficiencia y ahorro en los costos de producción.

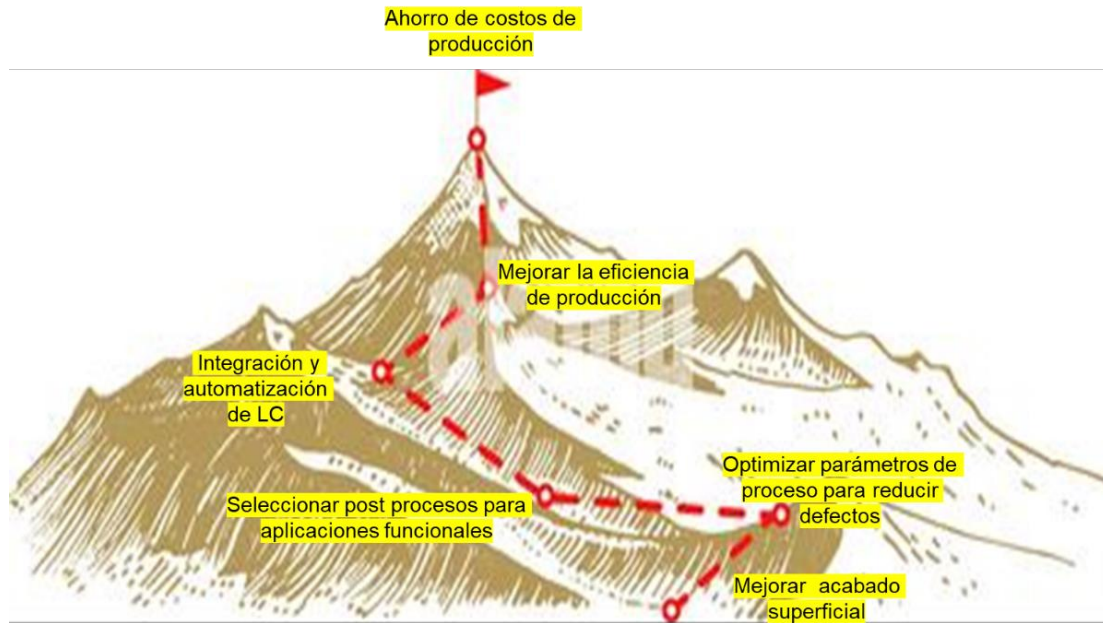


Figura 8. Retos y perspectivas del DED para los próximos años.

4. Conclusiones

La deposición de energía Dirigida (DED) constituye una técnica versátil empleada para la reparación de componentes de gran tamaño, dotando la superficie con propiedades diferentes al sustrato que permiten incrementar la resistencia al desgaste de los materiales. Se desarrolló una metodología para determinar la influencia de la calidad de los recubrimientos con la selección de la materia prima (polvo descartado) y los parámetros del proceso de Laser Cladding. La afinidad química del sustrato y de material de aporte permitieron fabricar recubrimientos metálicos de acero 17-4PH sobre AISI M2. El ajuste de la potencia y la velocidad de escaneo fue necesario para obtener recubrimientos con alta afinidad metalúrgica y reducción de la porosidad.

Al evaluar la evolución de la metodología se observa la interdependencia de los parámetros de fabricación y la necesidad de seguir contando con elementos tecnológicos de la industria 4.0 para optimizar los procesos aditivos en años futuros.

Referencias

- Ahn, Dong-Gyu. 2021. «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8(2):703-42. doi:10.1007/s40684-020-00302-7.
- ASTM. 2011. «E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1». ASTM Copyright. i(Reapproved):1-12. doi:10.1520/E0003-11.2.
- Cai, Chao, y Kun Zhou. 2022. «Metal additive manufacturing». *Digital Manufacturing: The Industrialization of «Art to Part» 3D Additive Printing* 247-98. doi:10.1016/B978-0-323-95062-6.00005-X.
- Farias, Francisco Werley Cipriano, Telmo Jorge Gomes dos Santos, y João Pedro Oliveira. 2024. «Directed Energy Deposition + Mechanical Interlayer Deformation Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Literature Review». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 131(3):999-1038. doi:10.1007/s00170-024-13126-5.
- Desarrollo De Estrategias Para La Fabricación De Recubrimientos Por Deposición De Energía (DED) Dirigida. Análisis Del Proceso De Fabricación Y Retos Tecnológicos

Félix-Martínez, Christian, Juansethi Ibarra-Medina, David Andrés Fernández-Benavides, Luis Alberto Cáceres-Díaz, y Juan Manuel Alvarado-Orozco. 2021. «Effect of the parametric optimization and heat-treatment on the 18Ni-300 maraging steel microstructural properties manufactured by directed energy deposition». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 115(11-12):3999-4020. doi:10.1007/s00170-021-07320-y.

García-Cabezon, C., M. A. Castro-Sastre, A. I. Fernández-Abia, M. L. Rodríguez-Mendez, y F. Martín-Pedrosa. 2022. «Microstructure–Hardness–Corrosion Performance of 17–4 Precipitation Hardening Stainless Steels Processed by Selective Laser Melting in Comparison with Commercial Alloy». *Metals and Materials International* 28(11):2652-67. doi:10.1007/s12540-021-01155-8.

Gokhale, Nitish P., y Prateek Kala. 2022. «Directed Energy Deposition for Metals». en *Additive and Subtractive Manufacturing Processes*. CRC Press.

Guo, Nannan, y Ming C. Leu. 2013. «Additive manufacturing: Technology, applications and research needs». *Frontiers of Mechanical Engineering* 8(3):215-43. doi:10.1007/s11465-013-0248-8.

Ju, Jiang, Yang Zhou, Maodong Kang, y Jun Wang. 2018. «Optimization of Process Parameters, Microstructure, and Properties of Laser Cladding Fe-Based Alloy on 42CrMo Steel Roller». *Materials* 2018, Vol. 11, Page 2061 11(10):2061. doi:10.3390/MA11102061.

Lin, Pei-Yi, Fang-Cheng Shen, Kuo-Tsai Wu, Sheng-Jye Hwang, y Huei-Huang Lee. 2020. «Process Optimization for Directed Energy Deposition of SS316L Components». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111(5):1387-1400. doi:10.1007/s00170-020-06113-z.

Mills, K. C., B. J. Keene, R. F. Brooks, y A. Shirali. 1998. «Marangoni Effects in Welding» editado por E. D. Hondros, M. McLean, y K. C. Mills. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 356(1739):911-25. doi:10.1098/rsta.1998.0196.

Muslim, Talha, Taner Karagoz, Semra Kurama, Pelin Sezer, Omer Faruk Yazici, y Recep Ozkok. 2023. «Laser metal deposition of 17–4 PH stainless steel: Geometrical, microstructural, and mechanical properties investigation for structural applications». *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 41:69-79. doi:10.1016/j.cirpj.2022.12.010.

Nie, M. H., S. Zhang, Z. Y. Wang, T. Y. Yin, C. H. Zhang, C. L. Wu, y D. X. Zhang. 2022. «Laser Cladding of 17-4 PH Stainless Steel Coatings: Microstructure, Texture Characterization, and Corrosion Resistance». *Journal of Materials Engineering and Performance* 32(12):5545-53. doi:10.1007/S11665-022-07484-Y/FIGURES/10.

Nie, M. H., S. Zhang, Z. Y. Wang, C. H. Zhang, H. T. Chen, y J. Chen. 2022. «Effect of laser power on microstructure and interfacial bonding strength of laser cladding 17-4PH stainless steel coatings». *Materials Chemistry and Physics* 275:125236. doi:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.125236.

Oh, Wook Jin, Wook Jin Lee, Min Seob Kim, Jong Bae Jeon, y Do Sik Shim. 2019. «Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition». *Optics & Laser Technology* 117:6-17. doi:10.1016/j.optlastec.2019.04.012.

Singh, Raghuvir, Damodar Kumar, S. K. Mishra, y S. K. Tiwari. 2014. «Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance». *Surface and Coatings Technology* 251:87-97. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.04.008.

Stoudt, M. R., C. E. Campbell, y R. E. Ricker. 2022. «Examining the Relationship Between Post-Build Microstructure and the Corrosion Resistance of Additively Manufactured 17-4PH Stainless Steel». *Materialia* 22:101435. doi:10.1016/j.mtla.2022.101435.

Svetlizky, David, Mitun Das, Baolong Zheng, Alexandra L. Vyatskikh, Susmita Bose, Amit Bandyopadhyay, Julie M. Schoenung, Enrique J. Lavernia, y Noam Eliaz. 2021. «Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: Physical Characteristics, Defects, Challenges and Applications». *Materials Today* 49:271-95. doi:10.1016/j.mattod.2021.03.020.

Touzé, Stéphane, Carolina Navarro Valero, Guillaume Rückert, y Jean-Yves Hascoët. 2025. «Closed-Loop Control of a Directed Energy Deposition Process for Repair Applications». *Progress in Additive Manufacturing* 10(8):4843-59. doi:10.1007/s40964-024-00867-8.

Predicción De Consumo De Energía En Robot Colaborativo Para El Proceso De Manufactura De Pcb's

M.C. José Antonio Cruz Ledesma¹, Dr. Guillermo Ronquillo Lomelí¹, Dr. Leonardo Barriga Rodríguez¹, Dr. Ángel Iván García Moreno¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
jacruz@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. El incremento en la automatización de procesos industriales ha impulsado el uso de robots colaborativos en tareas de alta precisión como la manufactura de tarjetas de circuito impreso (PCB, siglas en inglés). Sin embargo, el consumo energético de estos sistemas representa un reto económico y ambiental. En este trabajo se presenta un modelo de predicción del consumo energético de un robot colaborativo UR3e durante tareas de ensamblaje de PCBs, considerando variables dinámicas y estáticas como la velocidad de operación, el peso manipulado y las trayectorias ejecutadas. Para la adquisición de datos experimentales se empleó la estructura del sistema operativo del robot (ROS, siglas en inglés), nos permitió integrar la información del robot dentro del entorno de la celda de manufactura. A partir de estos datos, se entrenaron y evaluaron diferentes configuraciones de redes neuronales basadas en memoria a largo y corto plazo (LSTM, siglas en inglés). Los resultados muestran que la Configuración C alcanzó el mejor desempeño, con un error absoluto medio (MAE, siglas en inglés) de 0.0599 y con un error cuadrático medio (MSE, siglas en inglés) de 0.0054, evidenciando la capacidad del modelo para reproducir con precisión el comportamiento energético del robot bajo distintas condiciones de operación. Este nivel de exactitud abre la posibilidad de integrar funciones de costo basadas en energía para la optimización de trayectorias robóticas. El modelo propuesto constituye una alternativa viable y eficiente para la gestión energética en robots manipuladores, al aprovechar datos de operación ya disponibles mediante ROS, sin necesidad de instrumentación adicional. De esta forma, la metodología contribuye al desarrollo de soluciones de manufactura más sostenibles, alineadas con los objetivos de eficiencia operativa y disminución de las emisiones de carbono en la industria.

Palabras Clave: Redes Neuronales LSTM, Consumo de Energía, Robot Colaborativo, ROS.

1. Introducción

La automatización industrial ha evolucionado significativamente con la incorporación de robots colaborativos, capaces de compartir espacios de trabajo con seres humanos y realizar tareas de precisión con alta repetibilidad. En sectores como la manufactura electrónica, donde se exige velocidad, flexibilidad y exactitud, el uso de estos sistemas ha permitido mejorar la efectividad del ensamblaje de PCBs. A medida que las plantas de producción adoptan tecnologías más sofisticadas, el consumo energético asociado al funcionamiento de los robots se convierte en un factor crítico que impacta directamente en los costos operativos y en la sostenibilidad ambiental.

Diversos estudios han demostrado que la planificación de trayectorias, las condiciones de operación como la velocidad, la carga útil y la dinámica del robot influyen considerablemente en la demanda energética del sistema (Liu et al., 2018; Gürel et al., 2019; Boscariol & Richiedei, 2019).

En respuesta a este reto, la literatura ha explorado distintos grupos. El primer grupo se centra en modelos basados en física e identificación de parámetros, que permiten estimar el consumo a partir de ecuaciones dinámicas y mediciones de potencia o corriente. Estos trabajos facilitan la descomposición del gasto por articulación e integran factores como la fricción y la inercia, generando representaciones interpretables para diseñar estrategias de ahorro (Heredia et al., 2021; Yao et al., 2022; Merlo et al., 2023). Por otra parte, varios estudios han mostrado que la redundancia cinemática y la inclusión de estrategias de eficiencia en la programación de robots en celdas de manufactura puede reducir el consumo sin afectar la precisión (Boscariol & Richiedei, 2019; Hovgard et al., 2021; Gadaleta et al., 2021). En este mismo eje se incluyen investigaciones que emplean modelos híbridos entre simulación y medición experimental para validar parámetros energéticos, evidenciando la necesidad de integrar aproximaciones físicas con datos reales (Garriz et al., 2022; Li et al., 2022).

Un segundo grupo de contribuciones se orienta a la optimización y planificación de trayectorias con función de costo energético. Aquí se han aplicado técnicas clásicas como la programación matemática, métodos de escalado temporal y análisis de restricciones para minimizar simultáneamente el tiempo de ciclo y la energía (Gürel et al., 2019; Shinde et al., 2023). También se han propuesto enfoques metaheurísticos como el método de *optimización basado en enjambre de partículas* (PSO, siglas en inglés) y los algoritmos evolutivos tipo genético (GA, siglas en inglés), capaces de explorar configuraciones de velocidad y aceleración que ofrecen reducciones significativas en el consumo (Feng et al., 2020; Vysocký et al., 2020; Cao et al., 2020). Otras propuestas utilizan un algoritmo evolutivo de ordenamiento no dominado (NSGA-II, por sus siglas en inglés) y variantes multiobjetivo para equilibrar productividad, calidad de proceso y eficiencia energética en aplicaciones industriales complejas (Benotsmane et al., 2023; Li et al., 2023). La planificación de trayectorias también ha sido enriquecida mediante algoritmos de muestreo como el algoritmo de árbol aleatorio de exploración rápida tipo estrella (*RRT**, siglas en inglés) y su variante bidireccional (*Bi-RRT*, siglas en inglés), que en combinación con criterios energéticos permiten generar caminos eficientes en espacios de alta dimensionalidad (Gruszka et al., 2022; Nonoyama et al., 2022; Escobar-Naranjo et al., 2023). Incluso se han reportado experimentos mediante algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo para la optimización sin depender de un modelo explícito de los manipuladores, favoreciendo el desarrollo de soluciones autónomas en entornos cambiantes (Akrour et al., 2016).

De manera paralela, la comunidad ha comenzado a incorporar el aprendizaje automático como herramienta de predicción y optimización. Modelos basados en perceptrones multicapa y redes convolucionales han demostrado su eficacia para aproximar no linealmente el consumo energético, integrándose en entornos de transferencia de conocimiento entre robots o procesos (Yan et al., 2021; Yao et al., 2023). Estos métodos aprenden directamente de señales operativas, aunque su mayor limitación es la necesidad de grandes volúmenes de datos etiquetados y en su incapacidad para representar secuencias temporales largas con precisión.

Frente a estas limitaciones, el modelo de redes neuronales recurrentes (RNN, siglas en inglés), y en particular las arquitecturas *LSTM*, han surgido como una alternativa prometedora. Su capacidad para capturar dependencias temporales de largo alcance las convierte en candidatas ideales para modelar series temporales de estados articulares, velocidades, aceleraciones y corrientes.

Diversos estudios han demostrado que la combinación de LSTM con algoritmos evolutivos permite no solo predecir con alta exactitud el consumo, sino también optimizar la ejecución de tareas considerando simultáneamente productividad y sostenibilidad (Li et al., 2023; Jiang et al., 2023; Lin et al., 2023). Asimismo, se han explorado variantes como memorias a largo y corto plazo con normalización por lotes (BN-LSTM, siglas en inglés), que estabilizan el entrenamiento y ofrecen predicciones más fiables en entornos de manufactura real (Lin et al., 2024). En consecuencia, la integración de LSTM dentro de cadenas de etapas organizadas de predicción y optimización energética representa una de las tendencias más activas y de mayor impacto en la literatura actual.

El presente trabajo propone un modelo de predicción del consumo energético de un robot colaborativo UR3e, diseñado para operar de forma segura en interacción con personas en tareas de manufactura de PCBs. A partir de datos experimentales obtenidos bajo todas las condiciones de operación, se desarrolla un modelo matemático para estimar el consumo energético por ciclo de operación a través de una red LSTM. Dado que no se dispone de una metodología para el desarrollo de un modelo con estas características, en este trabajo se desarrolla un predictor de consumo de energía apropiado para ser empleado en un proceso de optimización energética con restricciones como limitaciones físicas, índice de manipulabilidad, etc. Finalmente, se utilizaron el MSE y el MAE para comparar el rendimiento de diferentes configuraciones de la red LSTM y así seleccionar la mejor estructura de modelo de predicción de consumo energético.

2. Metodología

Para el desarrollo del modelo de red neuronal artificial se empleó un enfoque basado en datos. En primer lugar, se realizó la recopilación de información a través de pruebas experimentales bajo condiciones controladas. Con la base de datos obtenida, la información se agrupa en tres grupos: entrenamiento, validación y prueba. A partir de ello, se procedió a la selección de la familia y la estructura del modelo, con el propósito de determinar la configuración más adecuada para la estimación de parámetros.

Una vez definido, el modelo fue evaluado mediante métricas de error que permitieron medir su capacidad predictiva. Esta etapa contempló la comparación de diferentes configuraciones y estructuras, con el fin de identificar la alternativa con mejor desempeño. Finalmente, se seleccionó el modelo que alcanzó los resultados más satisfactorios de acuerdo con los criterios establecidos (ver Figura 1).

2.1 Desarrollo del simulador en ROS

Como paso previo a la ejecución experimental con el robot real, se diseñó y configuró un entorno de simulación basado en ROS, con sus herramientas Rviz (visualización) y Gazebo (Simulación), con el objetivo de validar las trayectorias, condiciones de prueba y estrategias de adquisición de datos. Este entorno permite anticipar posibles errores, verificar la factibilidad de los movimientos y realizar

ajustes antes de interactuar directamente con el robot real, lo cual reduce significativamente los riesgos durante la fase experimental.

Modelado del robot

El modelado dinámico de manipuladores robóticos es un elemento esencial para analizar y diseñar estrategias de control. Dicho modelo describe matemáticamente la relación entre los movimientos articulares y los torques necesarios para generarlos. La ecuación general que describe la dinámica del robot manipulador de “ n ” grados de libertad, en este caso el robot UR3e, se expresa como (Spong et al., 2006):

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

donde, $M(q)$ es la matriz de inercia, que influye en la aceleración articular $\ddot{q}$, el término $C(q, \dot{q})\dot{q}$ son las fuerzas centrífugas y de Coriolis, $g(q)$ son las fuerzas gravitatorias y por último τ , son los pares o fuerzas aplicados por los actuadores del robot.

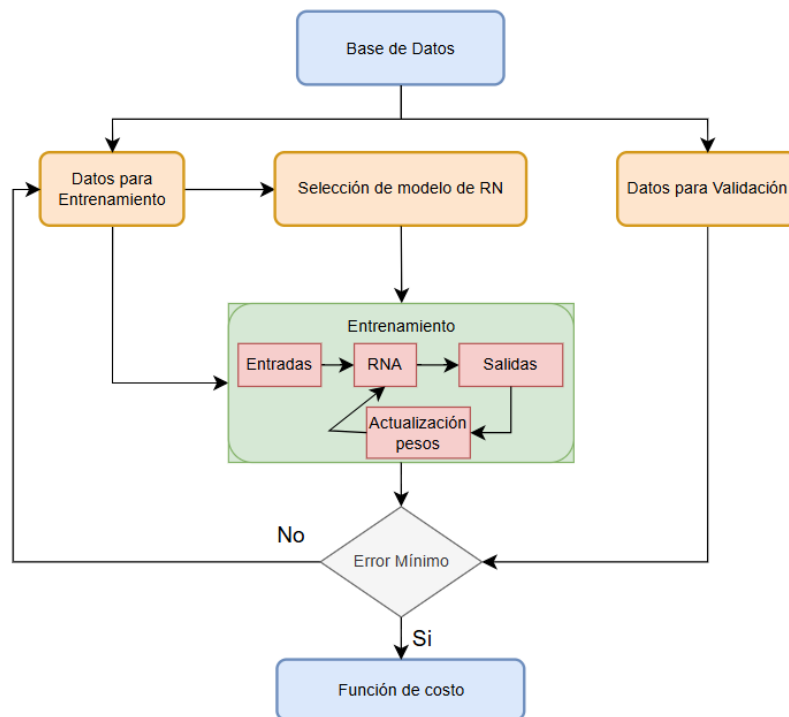


Figura 1. Metodología para selección de modelo de red neuronal.

Para el robot UR3e, la dinámica representada por esta ecuación se encuentra en el software integrado (firmware interno) del robot, el cual calcula los torques requeridos para cada articulación y envía la corriente eléctrica necesaria para ejecutar los movimientos. Para la simulación con Gazebo, se utiliza un motor de física de código libre (ODE, siglas en inglés), donde la ecuación

dinámica se integra con los parámetros del robot, obteniendo una aproximación de los torques y corrientes que demandaría el robot real.

La descripción estructural y cinemática del robot UR3e se desarrolló utilizando los lenguajes de formato unificado de descripción de robots (URDF, por sus siglas en inglés) y Xacro que es un macro XML, permitiendo una definición modular y reutilizable de los componentes. En el archivo Xacro principal se incluyeron:

- Las seis articulaciones tipo revoluta con sus respectivos rangos de movimiento.
- Los enlaces físicos entre las articulaciones, definidos por sus dimensiones (longitudes, diámetros y masas).
- El efector final, la cual está formada por una herramienta con cuatro ventosas para sostener la placa PCB.
- La cadena cinemática completa, con ejes de rotación y orientaciones respetando la convención de Denavit-Hartenberg.

Adicionalmente, se integraron los parámetros inerciales y de colisión para cada componente del robot, fundamentales para garantizar simulaciones realistas dentro de Gazebo y una correcta planificación en la herramienta de movimiento de ROS llamada MoveIt, en la Figura 2 se muestra el robot UR3e en Rviz.

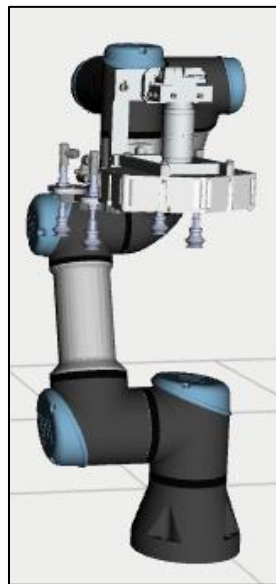


Figura 2. Robot UR3e desplegando en la herramienta de visualización de RViz.

Configuración de MoveIt para planificación de trayectorias

Con el modelo URDF completo, se generó el paquete de configuración para MoveIt utilizando el asistente de configuración. En este paquete se definieron:

- El grupo de planificación principal (manipulador), que agrupa las seis articulaciones del brazo.
- El punto de referencia para la herramienta del efector final y el sistema de coordenadas base.
- El archivo del formato semántico de descripción del robot (SRDF, por sus siglas en inglés) que permite agregar información semántica al modelo, como los grupos cinemáticos, posiciones predefinidas, y restricciones de autocolisión.
- Los módulos de cinemática, específicamente el solucionador de la cinemática inversa (IK, siglas en inglés).
- La configuración de las secuencias estructuradas de planificación, utilizando la biblioteca abierta de planificación de movimiento (OMPL, por sus siglas en inglés) y los controladores ROS para ejecutar trayectorias.

Esta configuración permitió utilizar MoveIt tanto en modo simulado como en modo real, con la posibilidad de generar trayectorias en el espacio cartesiano o en el espacio articular, verificar colisiones y simular la ejecución con retroalimentación visual en RViz, (ver Figura 3).

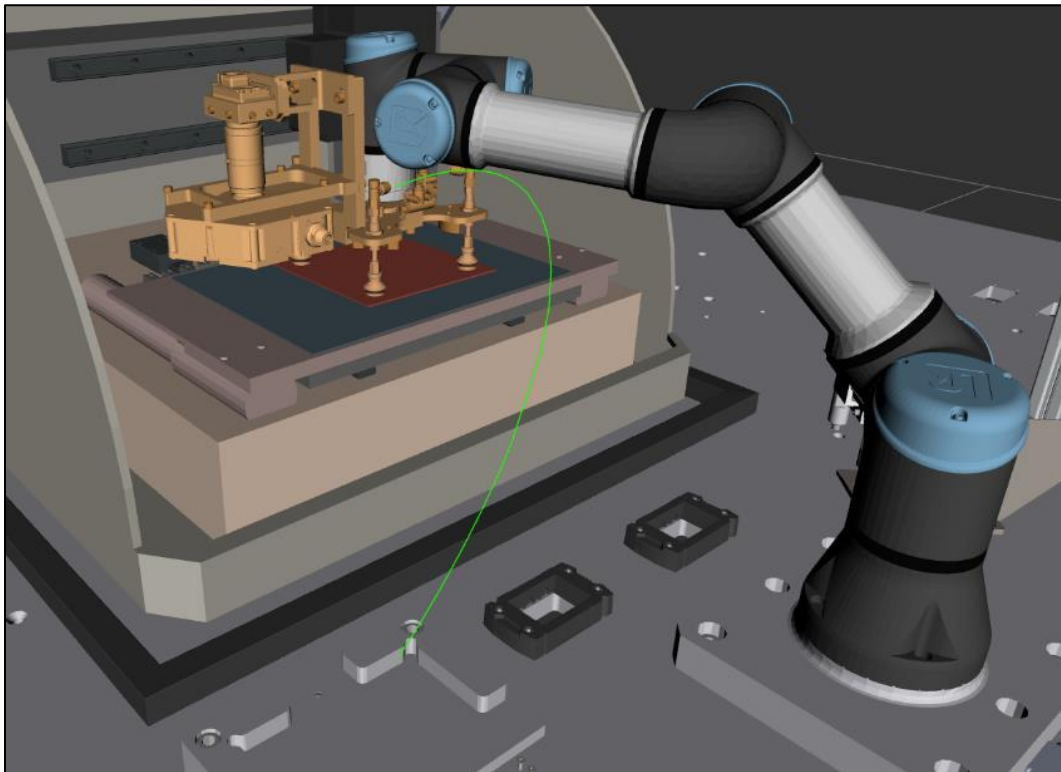


Figura 3. Generación y verificación de trayectoria con Rviz y MoveIt.

Trayectorias

Para mejorar la suavidad de las trayectorias se aplicó interpolación con splines cúbicos, siguiendo estudios que demuestran su efectividad en eficiencia energética y continuidad del movimiento. Estas funciones polinómicas de tercer orden garantizan continuidad en posición, velocidad y aceleración entre puntos. (Gao, R., Ren, H., & Wang, Y., 2019; Li, Y., Wang, H., & Wang, X., 2022). Su ecuación se representa como:

$$S_i(t) = a_i + b_i \cdot (t - t_i) + c_i \cdot (t - t_i)^2 + d_i \cdot (t - t_i)^3, t \in [t_i, t_{i+1}] \quad (2)$$

donde, $S_i(t)$ es la posición articular, y a_i, b_i, c_i, d_i son los coeficientes determinados a partir de las condiciones de continuidad en posición, velocidad y aceleración en los nodos de la trayectoria.

Movelt evalúa las trayectorias principalmente con criterios geométricos y cinemáticos. Verifica que los estados articulares estén dentro de los límites definidos en el URDF y SRDF, y que el robot no colisione consigo mismo ni con el entorno mediante monitoreo continuo de colisiones.

Integración del modelo en Gazebo

El robot UR3e fue incorporado como un modelo articulado controlado a través de ROS. Se definieron los controladores en un formato de serialización de datos (YAML, por sus siglas en inglés), activando tres modos de operación, control por posición, por velocidad y por de torque.

Además del robot, se modelaron elementos del entorno de trabajo, como las estaciones de toma (pick, en inglés), Rack A, Rack B y Rack C, la estación de colocación (place en inglés) y los elementos de la mesa de trabajo, (ver Figura4).

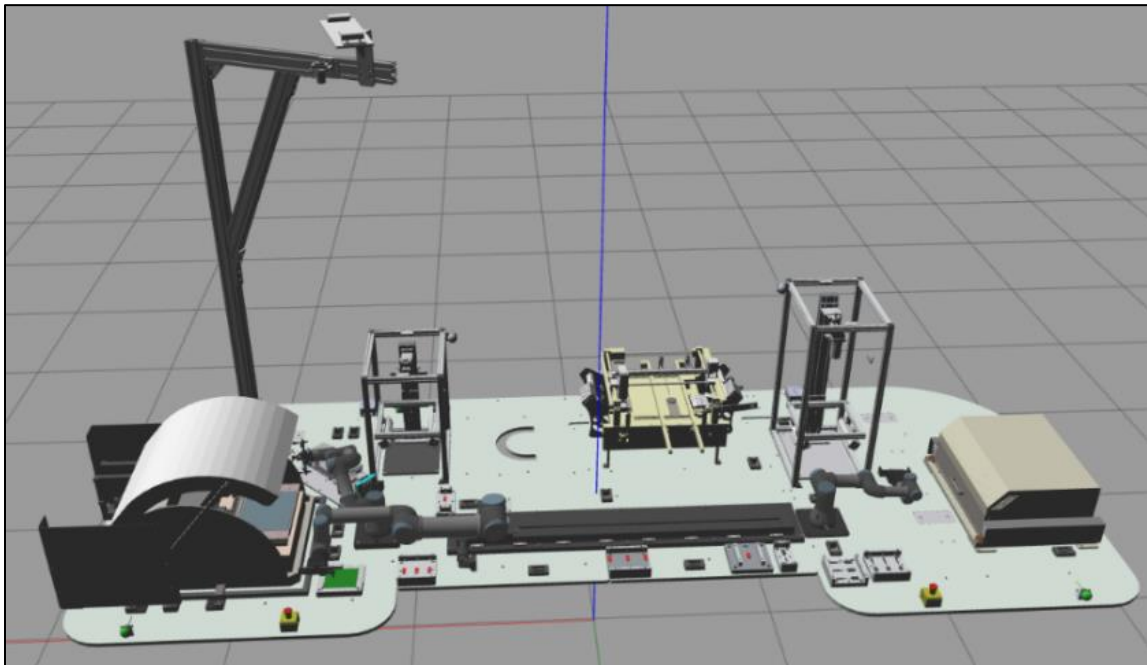


Figura 4. Simulador de la celda de manufactura en Gazebo.

Medición de consumo energético

Los datos de las articulaciones se obtienen al configurar el controlador del robot con ROS, donde a través de mensajes se reciben los datos de posición, velocidad, aceleración y corriente de cada una de las 6 articulaciones, para conocer el consumo de energía se utilizan los valores de corriente medidos durante la ejecución de la trayectoria y se tiene la siguiente ecuación para conocer la potencia instantánea:

$$P_t = \sum_{i=1}^n |I_t(t)| \cdot V \quad (3)$$

donde, $I_t(t)$ es la corriente de la articulación i en el instante t y V el voltaje del motor. La energía total se calcula como:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} P_t dt \quad (4)$$

Dado que la ecuación 4 entrega el resultado en Joules (J), es necesario convertir esta magnitud a Watt-hora (Wh) para expresar los datos en consumo eléctrico, para esto se divide entre 3600 para transformarla.

Validación del entorno y transición al sistema real

Una vez completado el desarrollo del simulador, se verificó que todas las combinaciones de prueba fueran viables: sin colisiones, dentro de los rangos articulares, y con trayectorias suaves. Las velocidades máximas, aceleraciones y cargas aplicadas fueron limitadas según las especificaciones del fabricante.

Posteriormente, se replicaron estas condiciones en el robot real, transfiriendo directamente los mismos archivos de configuración (URDF, controladores y trayectorias), lo que permitió mantener coherencia entre simulación y realidad. Esto garantizó una transición fluida entre ambos entornos, reduciendo la necesidad de ajustes adicionales en el robot real.

2.2 Variables y niveles experimentales

La etapa experimental se diseñó considerando cuatro factores principales: velocidad de operación, peso de carga, posición de pick y trayectoria de movimiento hacia la posición de place. Estos factores fueron seleccionados por su relevancia directa en el consumo energético del sistema robótico durante tareas típicas de ensamble. Cada factor fue definido con niveles, ver Tabla 1.

Tabla 1. Factores principales con sus niveles para la experimentación.

Factores de Entrada	Niveles
Velocidad	30, 60, 100 (%)
Posición de Pick	A, B, C
Peso de la carga	77, 430, 783, 1100 (g)

Trayectoria	1, 2, 3, 4, 5
Factores de Salida	Nivel
Tiempo	Tiempo medido (s)
Consumo de Energía	Energía (Wh)

Cada combinación de factores se ejecutó de manera individual para aislar su impacto en el consumo energético y facilitar el análisis posterior.

2.3 Procedimiento de adquisición de los datos

Para cada prueba, se programó al robot para realizar un ciclo completo de pick-and-place, siguiendo la trayectoria correspondiente a la combinación de factores establecida. Los datos se registraron cada 0.1 segundos. Esta información fue capturada directamente desde el controlador del robot y almacenada en archivos de texto, estructurados para facilitar su análisis. Cada combinación experimental fue repetida tres veces para garantizar la repetibilidad de los resultados y detectar posibles anomalías.

En total se realizaron 540 pruebas, cubriendo las diferentes combinaciones de los niveles de los cuatro factores de entrada y sus repeticiones. Los archivos se organizaron en una jerarquía de carpetas que refleja las condiciones de cada experimento, lo cual permitió una trazabilidad clara de los datos. Como resultado se obtiene una base de datos con 798,450 datos por repetición, con la cual se podrá realizar el entrenamiento y validación del modelo de predicción de energía con LSTM.

2.4 Selección del algoritmo de red neuronal

La selección del algoritmo constituye una etapa importante en el desarrollo del sistema predictivo, ya que determina la habilidad del modelo para anticipar con exactitud el comportamiento energético del robot colaborativo UR3e. En este estudio, la naturaleza de los datos recopilados presenta un desafío específico: se trata de series temporales multivariadas, formadas por posiciones articulares, velocidades, aceleraciones y corrientes, cuyos valores dependen de manera directa de la secuencia de estados anteriores y de las condiciones de operación. Este tipo de datos exhibe dependencias de corto y largo plazo, así como correlaciones entre múltiples variables, lo que limita la eficacia de modelos clásicos de regresión o de redes neuronales de perceptrón multicapa.

Red Neuronal LSTM

Con el fin de capturar estas relaciones temporales, se seleccionó una red neuronal del tipo LSTM, se compone de unidades llamadas celdas de memoria, cada una de las cuales incluye tres puertas fundamentales, olvido, entrada y salida que controlan cómo fluye la información a lo largo de la secuencia temporal. Estas puertas son funciones parametrizadas que utilizan combinaciones lineales de la entrada actual y del estado oculto previo, seguidas de funciones de activación no lineales (ver, Tabla 2). Hochreiter & Schmidhuber (1997)

La Figura 5, se observa el flujo de datos a través de una capa LSTM con entrada “x” y salida “y” con “T” pasos de tiempo. En el diagrama, h_t denota la salida (también conocida como *estado oculto*) y c_t denota el *estado de celda* en el paso de tiempo “t”.

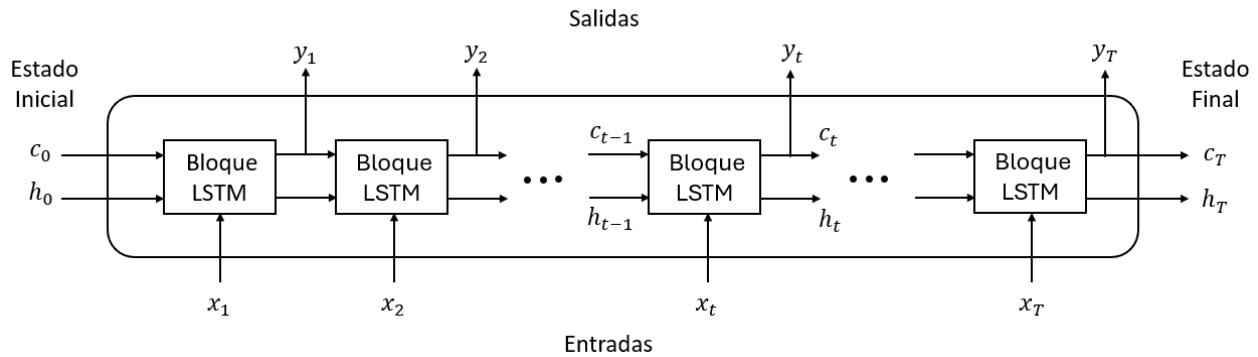


Figura 5. Flujo de una serie por LSTM

Si la capa produce la secuencia completa, entonces genera $y_1, y_2, \dots, y_t$, lo cual es equivalente a $h_1, h_2, \dots, h_t$. Si la capa produce únicamente el último paso de tiempo, entonces la salida es y_t , que es equivalente a h_t . El número de canales en la salida coincide con el número de unidades ocultas de la capa LSTM.

La primera operación de la LSTM utiliza el estado inicial de la red neuronal recurrente (RNN, siglas en inglés) y el primer paso de tiempo de la secuencia para calcular la primera salida y el estado de celda actualizado. En el paso de tiempo t, la operación utiliza el estado actual de la RNN (c_{t-1}, h_{t-1}) y el siguiente paso de la secuencia para calcular la salida y el nuevo estado de celda c_t . El estado de la capa está compuesto por el estado oculto (también llamado estado de salida) y el estado de celda. El estado oculto en el paso de tiempo t contiene la salida de la capa LSTM para ese instante. El estado de celda almacena información aprendida de los pasos de tiempo anteriores. En cada paso de tiempo, la capa añade o elimina información de este estado de celda. La actualización de esta información se regula mediante puertas. La Figura 6, muestra el flujo de información del instante de tiempo t. Esta figura muestra como las puertas olvidan, actualizan los nuevos estados de celda y se genera la salida del estado oculto.

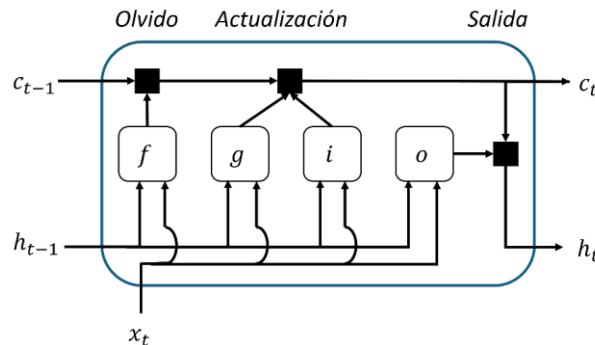


Figura 6. Flujo de datos en unidad de tiempo.

Dentro de una capa de LSTM, el modelo aprende tres conjuntos principales de parámetros, los pesos de entrada W , los pesos recurrentes R y el sesgo b (Bias). Estas matrices se unen mediante una concatenación de los pesos de entrada, los pesos recurrentes y el sesgo de cada componente. Esto se realiza según estas ecuaciones:

$$W = \begin{bmatrix} W_i \\ W_f \\ W_g \\ W_o \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_i \\ R_f \\ R_g \\ R_o \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_i \\ b_f \\ b_g \\ b_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde, i , f , g y o , determinan las puertas de entrada, olvido, el nuevo candidato de la celda y la salida, respectivamente.

La puerta de entrada controla cuánta información nueva se incorpora al estado de la celda:

$$i_t = \sigma_g(W_i x_t + R_i h_{t-1} + b_i) \quad (6)$$

$$g_t = \sigma_c(W_g x_t + R_g h_{t-1} + b_g) \quad (7)$$

donde, i_t es el vector que regula la proporción de información nueva, mientras que g_t constituye un candidato a memoria generado por una función de activación tangente hiperbólica σ_c que produce valores en el rango de $[-1, 1]$.

La puerta de olvido decide que parte del estado previo debe conservarse:

$$f_t = \sigma_g(W_f x_t + R_f h_{t-1} + b_f) \quad (8)$$

donde, f_t es el vector de activación de la puerta de olvido en el tiempo t , con valores entre 0 y 1, h_{t-1} el estado oculto de la celda en el instante anterior, x_t el vector de entrada en el instante actual, W_f es la matriz de pesos de la puerta de olvido, R_f la matriz de pesos recurrentes, b_f el sesgo correspondiente y σ_g la función de activación sigmoide, que comprime los valores a un rango entre 0 y 1, las principales funciones de activación se presentan en la Tabla 2.

El resultado f_t indica qué fracción de la memoria previa C_{t-1} debe conservarse. Un valor cercano a 1 significa “conservar”, mientras que un valor cercano a 0 significa “olvidar”. En el contexto de predicción energética, esta puerta permite que la red descarte estados pasados irrelevantes y retenga únicamente la información útil.

La actualización del estado de la celda combina la información retenida y la información nueva:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot g_t \quad (9)$$

donde, C_t representa el nuevo estado de memoria y $\odot$ denota el producto elemento por elemento. Esta operación permite que la celda equilibre entre olvidar información irrelevante y aprender nuevas dependencias.

Por último, la puerta de salida determina que información de la memoria interna se pasa al estado oculto actual:

$$O_t = \sigma_g(W_o x_t + R_o h_{t-1} + b_o) \quad (10)$$

$$h_t = O_t \odot \tanh C_t \quad (11)$$

donde, O_t regula la fracción de memoria expuesta y h_t constituye la salida de la celda, que alimenta a la siguiente unidad LSTM o a la capa superior.

En conjunto, las ecuaciones (5)–(11) describen el mecanismo mediante el cual una LSTM gestiona la información secuencial, permitiendo capturar tanto dependencias inmediatas como tendencias de más largo plazo. En el contexto de predicción energética, estas propiedades resultan esenciales, ya que el consumo del UR3e no depende solo del estado actual de sus articulaciones, sino también de la dinámica acumulada en intervalos previos de movimiento.

Tabla 2 Principales funciones de activación en redes neuronales

Función de activación	Fórmula matemática	Rango de salida
Unidad rectificada lineal (ReLU, siglas en inglés)	$f(x) = \max(0, x)$	$[0, \infty)$
Sigmoide	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$(0,1)$
Tanh (Tangente hiperbólica)	$f(x) = \tanh(x)$	$(-1,1)$
Lineal	$f(x) = x$	$(-\infty, \infty)$

Entrenamiento de LSTM

El entrenamiento de la red LSTM para la predicción de consumo energético en el robot colaborativo UR3e se fundamenta en la reducción de una función de pérdida que cuantifica la discrepancia entre los valores reales de consumo y las estimaciones generadas por el modelo. Dado que los datos corresponden a series temporales multivariadas derivadas de las trayectorias del robot incluyendo posiciones, velocidades, aceleraciones y corrientes de sus articulaciones, resulta indispensable emplear métricas que capturen adecuadamente el error. En este caso, se consideran dos errores, el MSE y el MAE, definidos como:

$$L_{MSE}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

$$L_{MAE}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (13)$$

donde y_i representa el consumo energético real medido, $\hat{y}_i$ la predicción generada por la red, N el número total de muestras, y θ el conjunto de parámetros (pesos y sesgos de las puertas de entrada, olvido y salida).

El cálculo de los gradientes para la actualización de los parámetros se realiza mediante el algoritmo de retropropagación a través del tiempo (BPTT, siglas en inglés), el cual aplica la red LSTM a lo largo de los pasos temporales. En este contexto, el error en el instante t depende no solo de las entradas

instantáneas, sino también de los estados ocultos acumulados en la secuencia de movimiento del robot. Formalmente, el gradiente de la pérdida respecto a los parámetros θ se expresa como:

$$\nabla_{\theta} L = \sum_{t=1}^T \frac{\delta L}{\delta h_t} \cdot \frac{\delta h_t}{\delta \theta} \quad (14)$$

donde, h_t es el estado oculto que codifica la dinámica del UR3e en el instante t , la propagación del error se acumula hacia atrás en la secuencia de longitud T .

Finalmente, los parámetros se actualizan iterativamente mediante reglas de optimización basadas en gradiente, como el descenso de gradiente estocástico (SGD, siglas en inglés) o estimación adaptativa de momentos (Adam, siglas en inglés):

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \eta \nabla_{\theta} L \quad (15)$$

donde, η corresponde a la tasa de aprendizaje. Este procedimiento ajusta progresivamente la memoria de la LSTM, permitiéndole capturar las relaciones temporales entre las variables articulares y su efecto en el consumo energético, lo que mejora de manera continua la capacidad predictiva del modelo.

3. Resultados

El proceso de desarrollo del modelo de predicción basado en redes neuronales LSTM sigue la metodología descrita en la sección anterior, donde como primer paso es la adquisición de datos a través del desarrollo e implementación de un diseño de experimentos.

3.1 Adquisición de datos experimentales

El diseño experimental consideró todas las combinaciones de los cuatro factores de entrada, ver Tabla 1, en cada ejecución se capturaron cuatro archivos de datos en formato de texto:

- Posiciones articulares (rad).
- Velocidades articulares (rad/s).
- Aceleraciones articulares (rad/s²).
- Corrientes eléctricas articulares (A).

3.2 Transformación al espacio cartesiano

A partir de las mediciones articulares se realizó la transformación cinemática directa para obtener, en cada instante:

- Posición del efector final (X, Y, Z).
- Orientación en cuaterniones (Qx, Qy, Qz, Qw).
- Distancia acumulada recorrida (m).
- Velocidades lineales (Vx, Vy, Vz) en m/s.

- Velocidades angulares (W_x, W_y, W_z) en rad/s.
- Módulo de la velocidad lineal $|V|$ y módulo de la velocidad angular $|W|$.
- Consumo energético instantáneo (W_h), calculado a partir de la corriente y la tensión nominal del actuador.

Estos datos se integraron en un único archivo por prueba, manteniendo el intervalo de muestreo original.

3.3 Normalización temporal y de escala

Dado que la duración de las trayectorias variaba según la combinación de factores, se aplicó una interpolación temporal lineal para ajustar todas las secuencias a 600 instantes equidistantes. Este número se seleccionó porque corresponde aproximadamente a la mayor duración observada en las ejecuciones de prueba considerando la frecuencia de muestreo de 10 Hz (un dato cada 0,1 s), lo que equivale a 60 s de trayectoria. De esta manera, se aseguró que ninguna ejecución requiriera extrapolación y que todas las secuencias compartieran la misma longitud para su procesamiento en la red LSTM.

La interpolación lineal se realizó de forma independiente para cada variable, utilizando la ecuación:

$$x(t') = x(t_i) + \frac{x(t_{i+1}) - x(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \cdot (t' - t_i) \quad (16)$$

donde, $x(t')$ es el valor interpolado en el nuevo instante, $x(t_i)$ y $x(t_{i+1})$ son los valores originales en los instantes adyacentes, t_i y t_{i+1} son los tiempos originales mas cercanos y t' es el tiempo interpolado.

Posteriormente, todos los datos se normalizaron mediante el método *min-máx* para escalar sus valores al rango $[0, 1]$, siguiendo la fórmula:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (17)$$

donde, x representa el valor original, x_{min} , x_{max} los valores mínimo y máximo en todo el conjunto de datos, y x_{norm} es el valor normalizado. Esta normalización preservó las relaciones relativas entre magnitudes y evitó sesgos durante el entrenamiento, garantizando que todas las variables tuvieran el mismo rango de influencia en el modelo.

3.4 Organización de los conjuntos de datos

Para cada prueba se construyó un conjunto de variables de entrada compuesto por:

- Variables secuenciales (600×16): incluyen las mediciones dinámicas en cada instante, tales como posición, orientación, distancia, velocidades lineales y angulares, y sus módulos.
- Variables estáticas (13): representan factores de configuración y parámetros iniciales que no varían a lo largo de la trayectoria.

Dentro de las variables estáticas, las correspondientes a la configuración experimental (velocidad nominal, peso manipulado, posición de pick y tipo de trayectoria) se codificaron de forma ordinal, asignando valores enteros a cada nivel:

- Velocidad nominal (%): 30 % = 0, 60 % = 1, 100 % = 2.
- Peso manipulado (g): 77 g = 0, 430 g = 1, 783 g = 2, 1100 g = 3.
- Posición de pick: A = 0, B = 1, C = 2.
- Tipo de trayectoria: T1 = 0, T2 = 1, T3 = 2, T4 = 3, T5 = 4.

Posteriormente, todas las variables estáticas (incluyendo las de codificación y otras magnitudes iniciales como distancia planificada, posición y orientación inicial, y tiempo nominal) fueron normalizadas mediante min-máx para llevarlas al rango [0,1] antes de ser utilizadas por la red.

La salida objetivo fue una serie de 600 valores que representan el consumo energético incremental por paso (ΔE en Wh). Los datos se dividieron en:

- Entrenamiento: 70 %
- Validación: 15 %.
- Prueba: 15 %.

3.5 Arquitectura de la red LSTM

Con el fin de analizar el compromiso entre precisión y complejidad del modelo, se definieron tres configuraciones de arquitectura basadas en redes LSTM. En todos los casos, la entrada secuencial corresponde a 600×16 y las variables estáticas a 13 características, normalizadas [0,1]. La salida del modelo es una secuencia de 600 valores que representa el consumo energético incremental por paso.

Las configuraciones propuestas se definieron en función de lo reportado en el estado del arte y de la necesidad de explorar variantes que capturen diferentes aspectos de la dinámica energética. La Configuración A - BN-LSTM con fusión tardía incorpora capas LSTM acompañadas de normalización por lotes, lo cual estabiliza el entrenamiento y mejora la generalización, manteniendo el esquema clásico de integración tardía entre variables secuenciales y estáticas (ver Tabla 3). La Configuración B - LSTM con fusión tardía sigue una arquitectura más sencilla y directa, basada únicamente en capas LSTM unidireccionales. (ver Tabla 4).

Finalmente, la Configuración C - LSTM ampliada, se incrementó la capacidad de la red mediante un mayor número de capas y unidades en la rama secuencial, lo que le otorga más flexibilidad para aprender relaciones complejas en los datos. (ver Tabla 5).

Tabla 3. Hiperparámetros de la Configuración A - BN-LSTM

Elemento de la red	Descripción
Entrada secuencial	600 pasos de tiempo × 16 variables dinámicas
Entrada estática	13 variables
Primera capa secuencial	BN-LSTM con 128 unidades, retorna secuencia completa
Segunda capa secuencial	BN-LSTM con 64 unidades, retorna solo la última salida
Rama estática	Capa densa con 64 neuronas y activación no lineal (ReLU)
Mecanismo de fusión	Concatenación de la salida secuencial y estática
Capa intermedia de fusión	Capa densa de 64 neuronas con activación ReLU
Capa de salida	Capa densa con 600 neuronas y activación lineal
Tamaño de lote	32 muestras por iteración
Épocas de entrenamiento	250

Tabla 4. Hiperparámetros de la Configuración B - LSTM

Elemento de la red	Descripción
Entrada secuencial	600 pasos de tiempo × 16 variables dinámicas
Entrada estática	13 variables
Primera capa secuencial	LSTM con 64 unidades, retorna secuencia completa
Segunda capa secuencial	LSTM con 32 unidades, retorna solo la última salida
Rama estática	Capa densa con 32 neuronas y activación no lineal (ReLU)
Mecanismo de fusión	Concatenación de la salida secuencial y estática
Capa intermedia de fusión	Capa densa de 64 neuronas con activación ReLU
Capa de salida	Capa densa con 600 neuronas y activación lineal

Tamaño de lote	32 muestras por iteración
Épocas de entrenamiento	250

Tabla 5. Hiperparámetros de la Configuración C – LSTM ampliada

Elemento de la red	Descripción
Entrada secuencial	600 pasos de tiempo × 16 variables dinámicas
Entrada estática	13 variables
Primera capa secuencial	LSTM con 256 unidades, retorna secuencia completa
Segunda capa secuencial	LSTM con 256 unidades, retorna solo la última salida
Rama estática	Capa densa con 64 neuronas y activación no lineal (ReLU)
Mecanismo de fusión	Concatenación de la salida secuencial y estática
Capa intermedia de fusión	Capa densa de 128 neuronas con activación ReLU
Capa de salida	Capa densa con 600 neuronas y activación lineal
Tamaño de lote	32 muestras por iteración
Épocas de entrenamiento	250

3.6 Validación de resultados

Para evaluar el desempeño de las configuraciones propuestas se llevó a cabo una etapa de validación, en la cual se compararon los valores de energía real frente a los valores predichos por cada configuración del modelo. En la Figura 7 se observa la gráfica correspondiente de la comparación entre los valores medidos de la energía real y las predicciones obtenidas con las configuraciones A, B y C. Esta visualización permite contrastar de manera directa el ajuste alcanzado por cada modelo respecto al comportamiento experimental.

De forma complementaria, en la Tabla 6 se muestran las métricas de error utilizadas, MAE y MSE. Estas métricas miden la diferencia entre los valores reales y los valores estimados, ofreciendo una medida objetiva del desempeño de cada configuración.

Los resultados muestran que la *Configuración C* logra el mejor ajuste, con valores de MAE y MSE significativamente menores en comparación con las configuraciones A y B. En particular, la Configuración B es la que presenta mayor error, evidenciando un comportamiento menos estable y

con mayor dispersión en las predicciones. Por su parte, la Configuración A alcanza un desempeño intermedio, con errores menores que los de B, pero aún por encima de los obtenidos con C.

4. Conclusión

Actualmente, en los procesos de manufactura una parte significativa del consumo energético proviene de sistemas robotizados que operan de manera continua. Este consumo impacta en los costos de producción y en la huella ambiental de las plantas industriales. Por lo tanto, resulta fundamental contar con herramientas que permitan estimar y optimizar la energía utilizada por los robots colaborativos.

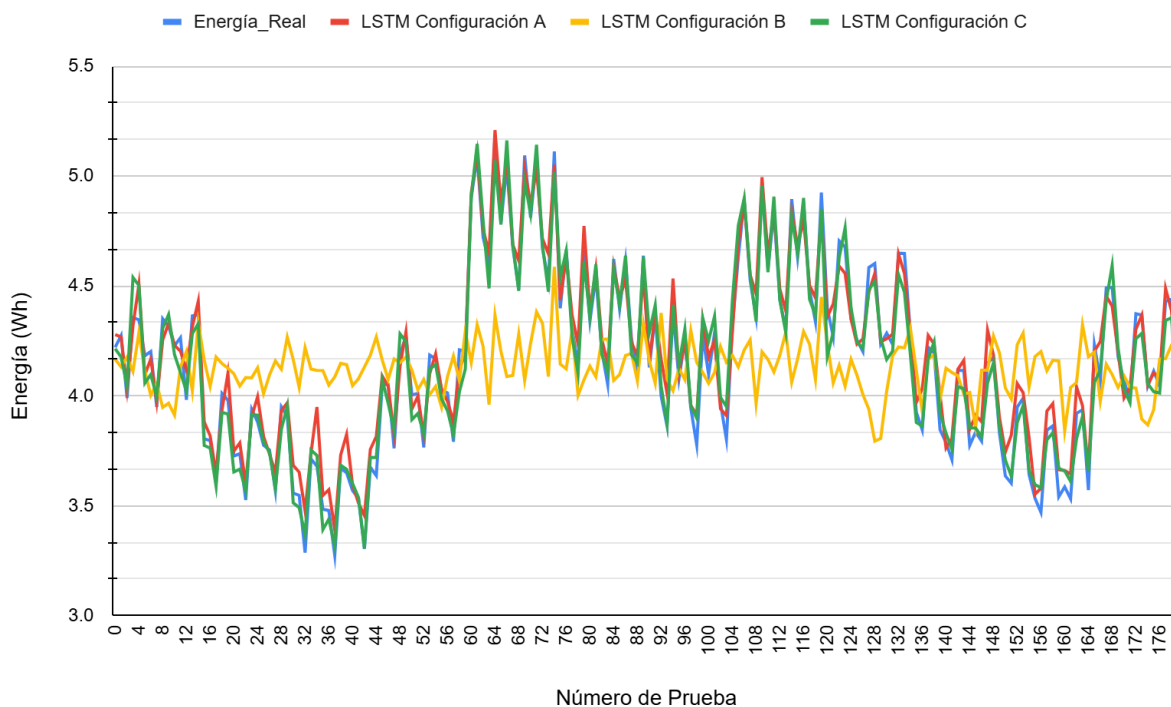


Figura 7. Gráfica comparativa entre valor real de energía y valores predichos por cada configuración de la red LSTM.

Tabla 6. Métricas de error por configuración

Configuración	MAE	MSE
A	0.065714	0.006752
B	0.329608	0.160780
C	0.059907	0.005470

En este trabajo se desarrolló un enfoque basado en datos para predecir el consumo energético de un robot colaborativo UR3e durante la ejecución de trayectorias en la manufactura de placas electrónicas, considerando tanto variables dinámicas como estáticas del sistema. Para ello se diseñaron, implementaron y evaluaron diferentes configuraciones de redes LSTM. Los resultados mostraron que la configuración A alcanzó un desempeño adecuado con errores relativamente bajos, mientras que la configuración B presentó limitaciones notables al registrar errores considerablemente más altos, lo que la hace menos confiable para este tipo de aplicaciones. En contraste, la configuración C fue la que obtuvo el mejor rendimiento al lograr los menores valores de MSE y MSA, evidenciando su capacidad para reproducir con mayor precisión el comportamiento energético real del robot.

La metodología empleada confirma que los modelos de redes neuronales profundas constituyen una alternativa viable y económica para la predicción del consumo energético en procesos industriales. Este enfoque permite aprovechar datos ya disponibles en la operación de los robots, los cuales contienen información valiosa que, en muchos casos no se utiliza plenamente. Ampliar el conjunto de datos de entrenamiento e incorporar nuevas variables de operación podría mejorar aún más la calidad de las estimaciones.

En conclusión, la utilización de redes LSTM representa una herramienta prometedora para la gestión energética en entornos de manufactura avanzada. Su aplicación no solo contribuye a reducir costos operativos, sino que también apoya la transición hacia sistemas más eficientes y sostenibles, alineados con las demandas actuales de la industria 4.0.

Referencias

- Akrour, R., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2016). Model-free trajectory optimization for reinforcement learning. *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, 2016, 287–296. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:46605>
- Benotsmane, R., Zemouche, A., & Bedouhene, F. (2023). Optimization of robotic motion parameters for energy-efficient manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 80, 102502. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102502>
- Boscariol, P., & Richiedei, D. (2019). Trajectory design for energy savings in redundant robotic cells. *Robotics*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/robotics8010015>
- Cao, H., Zhou, J., Jiang, P., Hon, K. K. B., Yi, H., & Dong, C. (2020). An integrated processing energy modeling and optimization of automated robotic polishing system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101973. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101973>
- Escobar-Naranjo, J., Vargas, C., & Riaño, L. (2023). Energy-aware trajectory planning using Bi-RRT and reinforcement learning. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107(2), 36. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01839-2>
- Feng, Y., Ji, Z., Gao, Y., Zheng, H., & Tan, J. (2020). An energy-saving optimization method for cyclic pick-and-place tasks based on flexible joint configurations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102037. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102037>
- Gadaleta, M., Pagano, M., & Antonelli, D. (2021). Experimental datasets for energy-efficient trajectory optimization in industrial robots. *IEEE Access*, 9, 44512–44524. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066547>
- Gao, R., Ren, H., & Wang, Y. (2019). Energy-optimized trajectory planning of industrial robots using cubic spline interpolation and genetic algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.003>

- Garriz, I., Sanchez, D., & Mujica, L. (2022). Multi-objective optimization of energy and performance in automotive robotic applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3), 1201–1213. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08020-3>
- Gruszka, Ł., Wróbel, K., & Lis, K. (2022). Energy-efficient trajectory planning for pick-and-place operations in industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102378>
- Gürel, S., Gultekin, H., & Eghbal Akhlaghi, V. (2019). Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.002>
- Heredia, J., Schlette, C., & Kjærgaard, M. B. (2021). Data-driven energy estimation of individual instructions in user-defined robot programs for collaborative robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 6836–6843. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3094781>
- Heredia, J., Schlette, C., & Kjærgaard, M. B. (2023). Disaggregation of energy consumption in collaborative robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(1), 125–137. <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3201234>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hovgard, M., Lennartson, B., & Bengtsson, K. (2021). Applied energy optimization of multi-robot systems through motion parameter tuning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 34, 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.07.012>
- Jiang, P., Li, H., & Wang, X. (2023). Energy prediction and optimization in industrial robots using LSTM and genetic algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135411>
- Li, H., Xu, Z., & Chen, J. (2022). Efficient computation for energy-optimized robot trajectories. *IEEE Access*, 10, 21451–21462. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146549>
- Li, J., Zhang, Y., & Wu, H. (2023). Multi-objective optimization of process parameters using LSTM-MLP and NSGA-II for robotic grinding. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102440. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102440>
- Li, Y., Wang, H., & Wang, X. (2022). Energy-aware trajectory planning of collaborative robots based on trajectory segmentation and spline fitting. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 74, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102239>
- Lin, H. I., Mandal, R., & Wibowo, F. S. (2024). BN-LSTM-based energy consumption modeling approach for an industrial robot manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, Article 102629. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102629>
- Lin, Y., Zhao, Q., & Huang, X. (2023). Batch-normalized LSTM for robust energy consumption prediction in collaborative robots. *Applied Energy*, 340, 120900. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120900>
- Liu, A., Liu, H., Yao, B., Xu, W., & Yang, M. (2018). Energy consumption modeling of industrial robot based on simulated power data and parameter identification. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(5), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814018773852>
- Merlo, A., Palomba, I., & Zanella, A. (2023). Eco-programming of collaborative robots for energy-efficient manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.03.012>
- Nonoyama, T., Okada, T., & Matsumoto, K. (2022). Energy-efficient motion planning with RRT* under dynamic constraints. *Advanced Robotics*, 36(5–6), 297–309. <https://doi.org/10.1080/01691864.2022.2034056>
- Olier, M., Salmi, M., & Mognol, P. (2022). Selection of actuation strategies for energy-efficient robotic systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9), 2905–2917. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08277-6>

- Pellicciari, M., Berselli, G., & Leali, F. (2013). Reducing the energy consumption of pick-and-place robotic systems through motion design. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(1), 153–160. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203309>
- Shinde, P., Kulkarni, V., & Patil, R. (2023). Joint optimization of cycle time and energy consumption in industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 80, 102499. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102499>
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. **IEEE Control Systems**, 26(6), 113-115. <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.252815>
- Vysocký, A., Papřok, R., Šafařík, J., Kot, T., Bobovský, Z., Novák, P., & Snášel, V. (2020). Reduction in robotic arm energy consumption by particle swarm optimization. *Applied Sciences*, 10(22), 8241. <https://doi.org/10.3390/app10228241>
- Yan, J., & Zhang, M. (2021). A transfer-learning based energy consumption modeling method for industrial robots. *Journal of Cleaner Production*, 318, 129299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129299>
- Yao, B., Liu, H., & Xu, W. (2022). ResNet-based transfer learning for energy modeling in industrial robots. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(7), 1887–1899. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01745-8>
- Yao, Y., Chen, Z., & Wang, J. (2023). Convolutional neural network models for energy-efficient robot operation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 81, 102518. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102518>
- Yoshikawa, T. (1985). Manipulability of robotic mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, 4(2), 3–9. <https://doi.org/10.1177/027836498500400201>
- Zhang, M., & Yan, J. (2021). A data-driven method for optimizing the energy consumption of industrial robots. *Journal of Cleaner Production*, 278, 124862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124862>

Predicción De Radiación Solar Usando Modelos Polinomiales

Jesús Miguel Ángel Rodríguez Mendoza¹ y Guillermo Ronquillo Lomeli¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México
jm.rodriguezm@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. La creciente demanda energética global exige soluciones que incrementen la eficiencia y reduzcan el impacto ambiental. La energía solar es una alternativa clave, pero su integración fiable requiere pronósticos precisos de radiación. Este trabajo evalúa un modelo basado en expansiones polinomiales tipo Volterra para estimar la irradiancia solar global en horizontes de tiempo cortos en la región de Ensenada, Baja California. Se emplean series históricas y modelos de cielo claro como referencia, se exploran estructuras NARMA con distintos órdenes y número de términos autorregresivos, y se comparan errores mediante RMSE, MAE y MBE para horizontes de una a seis horas. Los resultados indican que el modelo ofrece buen ajuste en horizontes muy cortos, con RMSE aproximado a 15.44 W/m^2 a una hora, y que el error crece de forma sostenida hasta aproximadamente 55.42 W/m^2 a seis horas, lo que sugiere la necesidad de mayor resolución temporal o de entradas exógenas para horizontes largos. El modelo es computacionalmente ligero y su bajo coste de procesamiento facilita su implementación en entornos con recursos limitados.

Palabras Clave: Función Basada en Polinomios de Volterra (VPBF), Redes Neuronales, Radiación Solar.

1. Introducción

Desde las actividades cotidianas hasta los procesos industriales, toda acción humana requiere energía, y la demanda global de ésta ha crecido de manera sostenida con el desarrollo tecnológico y la expansión de servicios digitales, transporte y procesos productivos. Históricamente, la Revolución Industrial consolidó el uso predominante de combustibles fósiles como fuente primaria de energía para generar trabajo y electricidad, lo que impulsó modelos de consumo energético hoy cuestionados por sus efectos ambientales y limitaciones de suministro (Glover & McCulloch, 1958; Liu & Jordan, 1960). La combustión de hidrocarburos contribuye significativamente a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera y provoca impactos colaterales por su extracción y procesamiento: contaminación atmosférica y acuífera, degradación de suelos y pérdida de biodiversidad. Estos efectos afectan la salud pública y la resiliencia ambiental (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014; Solé, 2014). Frente a estas realidades, la transición hacia fuentes renovables se vuelve imperativa: la energía solar, por su abundancia y bajo impacto operacional, se presenta como una de las alternativas con mayor potencial, si bien su adopción exige planificación y herramientas predictivas que permitan maximizar su aprovechamiento.

La literatura sobre estimación de radiación solar muestra una evolución desde fórmulas empíricas locales hasta modelos teóricos y físicos más generales. Métodos clásicos relacionaron radiación con horas de insolación y propusieron índices de aclaramiento o claridad solar como variables clave (Glover & McCulloch, 1958; Liu & Jordan, 1960; Page, 1961). Sobre estas bases se desarrollaron expresiones que modelan la fracción horaria de la radiación diaria (Collares-Pereira & Rabl, 1979; Erbs, Klein & Duffie, 1982), y se propusieron correlaciones para la porción difusa y la directa según el índice de claridad y el ángulo horario (Orgill & Hollands, 1977; Reindl, Beckman & Duffie, 1990). Los modelos de cielo claro (por ejemplo, Bird & Hulstrom) y los enfoques anisotrópicos para superficies inclinadas (Pérez y colaboradores) incorporaron la física de la atmósfera y la geometría solar para mejorar estimaciones en condiciones específicas (Bird & Hulstrom, 1981; Perez et al., 1983; Perez et al., 1987; Maxwell, 1987). Más recientemente, los modelos basados en observaciones satelitales y en parámetros atmosféricos, como el modelo McClell, han ofrecido alternativas robustas para condiciones de cielo despejado considerando aerosoles, ozono y vapor de agua (Lefèvre et al., 2013).

Paralelamente, las técnicas estadísticas y de series temporales, así como los métodos de aprendizaje automático, han ganado terreno para pronósticos a corto plazo. En este campo destacan aplicaciones de modelos ARMA y GARCH para predicciones probabilísticas de irradiancia en horizontes de horas (David et al., 2016) y su adaptación a contextos mexicanos (H. Farias, 2018). Otros aportes incluyen correlaciones empíricas entre radiación y variables meteorológicas (Ulgen & Hepbasli, 2002; Ahmed, Ahmad & Akhtar, 2009; Okundamiya & Nzeako, 2010) que sirven de insumo para modelos híbridos.

A partir de lo anterior, resulta evidente que lograr una predicción de radiación solar con bajo error es clave para aumentar la fiabilidad de la energía solar como recurso principal: pronósticos precisos optimizan la operación y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas, mejoran la gestión económica de la inversión y permiten integrar con mayor seguridad a la red y a otros usos (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014; Solé, 2014). No obstante, la fluctuación tanto espacial como temporal de la radiación, junto con perturbaciones locales (aerosoles, incendios, cambios de uso del suelo, eventos meteorológicos puntuales), impone un desafío para modelos universales y exige aproximaciones que combinen fundamento físico, información histórica y capacidad de capturar no linealidades.

Por ejemplo, tomando una irradiancia horizontal media aproximada de 170 W/m^2 y una eficiencia comercial típica del 20% para módulos fotovoltaicos, la potencia media aprovechable por metro cuadrado sería de $\approx 34 \text{ W}$ (170×0.20). Esto equivale a $\approx 297.8 \text{ kWh}$ por m^2 al año ($34 \text{ W} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ d} / 1000$). Bajo este escenario, una mejora relativa de sólo 1% en la energía realmente captada se traduciría en $\approx 2.98 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$, y una mejora del 5% en $\approx 14.89 \text{ kWh/m}^2$ por año, escalando a 1 ha ($10\,000 \text{ m}^2$) un 5% supone $\approx 148.9 \text{ MWh}$ adicionales al año. Estas cifras muestran que ganancias aparentemente pequeñas en precisión del pronóstico pueden convertirse en aumentos energéticos y económicos relevantes a escala de planta y, por tanto, justifican la inversión en mejores modelos de predicción y en estrategias operativas asociadas (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014; Solé, 2014; Assaf et al., 2023; El-Shahat et al., 2024).

Estudios recientes muestran que los modelos de aprendizaje profundo y las arquitecturas híbridas, por ejemplo, CNN-LSTM o combinaciones de redes convolucionales con información satelital, suelen mejorar la predicción de irradiancia a corto plazo frente a métodos tradicionales, reduciendo el error de pronóstico en múltiples casos de estudio (Assaf et al., 2023; El-Shahat et al.,

2024). No obstante, las redes convolucionales y otras arquitecturas profundas habitualmente requieren hardware acelerado (GPU) y mayor coste computacional para su entrenamiento e inferencia; en contraste, los enfoques polinomiales como las VPBF son mucho más ligeros computacionalmente, fáciles de entrenar e interpretar, lo que facilita su implementación en entornos con recursos limitados (Liu, 2001; Ronquillo, 2015).

Este trabajo presenta la implementación y evaluación de un modelo de predicción de radiación global basado en expansiones polinomiales. Se propone comparar su rendimiento frente a modelos de referencia y enfoques de series temporales aplicados a la región de Ensenada, Baja California, con el propósito de valorar su utilidad práctica en planificación y aprovechamiento estratégico de la energía solar. Se busca, calcular la irradiancia global basándose en registros históricos y modelos teóricos de cielo claro (McClear, Bird/Ineichen, etc.), validar la capacidad predictiva de las VPBF frente a modelos ARMA/GARCH y correlaciones empíricas utilizadas en trabajos previos (David et al., 2016; H. Farias, 2018); y discutir las implicaciones operativas y económicas de las mejoras en la precisión del pronóstico para la adopción de sistemas fotovoltaicos en la zona de estudio.

2. Materiales y Métodos

El proyecto abarca cinco etapas clave. Comienza con la recolección de datos durante la fase de experimentación, en la cual se recopila información esencial sobre el comportamiento del sistema, incluyendo fuentes como NASA Power y CICESE. Los datos, registrados entre las 7 a.m. y las 4 p.m., a una latitud de 31.85° N, longitud -116.66° W, y a nivel del mar, se expresan en W/m² y se organizan en intervalos de una hora. Obteniendo de aquí los valores reales de la radiación GHI (irradiancia horizontal global), la cual consiste en la suma de la radiación que se proyecta directamente sobre un punto específico (irradiancia horizontal) y aquella que llega de manera dispersada por los aerosoles del ambiente (irradiancia difusa). Y se contrasta con modelos predictivos de cielo claro, obtenidos por medio de información satelital y de predicción, pero que varía debido a que se ve directamente afectada por la atmósfera, aerosoles, contaminación, entre otros. Al obtener el cociente del valor real sobre el predicho por el modelo de cielo claro, se obtiene la razón de diferencia conocido como “índice de cielo claro”.

La siguiente etapa consiste en la selección de la estructura del modelo, utilizando un modelo NARMA con 'p' términos autorregresivos (AR) para la predicción del índice de cielo claro (kt), considerando un horizonte de predicción 'h'. Esta etapa se enfoca en capturar relaciones complejas entre entradas y salidas para lograr una predicción precisa.

$$\widehat{kt}^*_{(t+h)} = f(kt^*_{(t-1)}, kt^*_{(t-2)}, \dots, kt^*_{(t-p)}) \quad (1)$$

Posteriormente, se determina el vector de pesos utilizando el método de mínimos cuadrados para estimar los pesos óptimos. La fórmula para este proceso es:

$$\widehat{W} = \arg \min_W \|Y - \phi(x)W\|_2 \quad (2)$$

La Figura 1 presenta un esquema general mostrando el modelo considerado para la predicción de radiación solar.

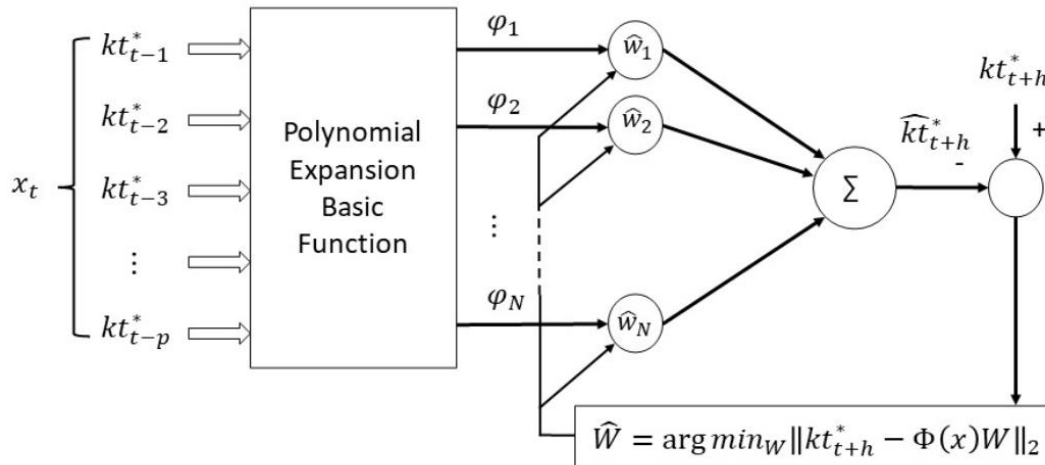


Figura 1 Estructura general del modelo propuesto.

Luego, el proyecto avanza hacia la estimación y validación del modelo, con un enfoque principal en la reducción del error. Se generan variaciones en la estructura del modelo mediante el ajuste del modelo con diferentes valores de 'p' y 'l'. Los coeficientes se ajustan para minimizar la diferencia entre los valores estimados y los datos observados a lo largo de múltiples iteraciones. Para determinar la estructura del modelo, se exploran diversas combinaciones de parámetros, incluyendo el "orden" (l) y los términos autorregresivos (p). La Tabla 1 muestra estas combinaciones, considerando un horizonte de predicción de 1 a 6 horas.

Tabla 1 Parámetros explorados para la estructura del modelo

Horizonte de predicción (h)	Orden (l)	Términos autorregresivos (p)
1	1, ..., 4	1, ..., 3
2		
3		
4		
5		
6		

Para evaluar la precisión de la predicción de radiación solar a partir de las diferentes estructuras del modelo probadas, se emplearon las siguientes métricas de error: RMSE (Error Cuadrático Medio), MAE (Error Absoluto Medio) y MBE (Error Medio del Sesgo), a partir del GHI del índice kt predicho por el modelo y el modelo de cielo claro.

3. Resultados

La Tabla 2 muestra las estructuras de los modelos que presentan el mejor rendimiento en distintos horizontes de predicción.

Tabla 2 Estructuras de modelos con mejor desempeño.

Horizonte de predicción (h)	Orden (l)	Términos autorregresivos (p)	Error (W/ m ²)	Métrica
1	4	2	15.4371	RMSE
2	4	1	27.6394	
3	1	3	37.569	
4	1	2	45.3985	
5	2	2	51.4819	
6	1	2	55.4178	
1	4	2	0.021042	MBE
2	4	1	0.73218	
3	4	1	1.6358	
4	1	1	2.2013	
5	1	1	2.5844	
6	1	1	2.888	
1	4	2	12.066	MAE
2	4	1	21.535	
3	4	1	29.2975	
4	2	2	35.0432	
5	2	2	38.9277	
6	2	2	41.4873	

Se seleccionó el día con la desviación estándar más alta entre las respectivas horas de luz solar para evaluar el rendimiento del modelo, siendo el 16 de abril el día con mayor desviación estándar: 189.8242. Además, se consideró también el 17 de abril, por presentar también una alta desviación: 153.9887.

A continuación, se presentan gráficamente diferentes predicciones de este modelo en contraste con la GHI real (GHI), la GHI de cielo despejado (GHI_sky) y la radiación obtenida por el modelo (GHI_e) en los dos días seleccionados.

Predicción a 1 hora (4,2)

La Figura 2 muestra los resultados de la predicción con 1 hora de anticipación usando un modelo con orden 4 y 2 términos autorregresivos, que tiene un RMSE general de 15.4371 W/m². Durante el primer día, presenta un error más alto que el segundo, siendo el error absoluto más alto de 46.32518 W/m².

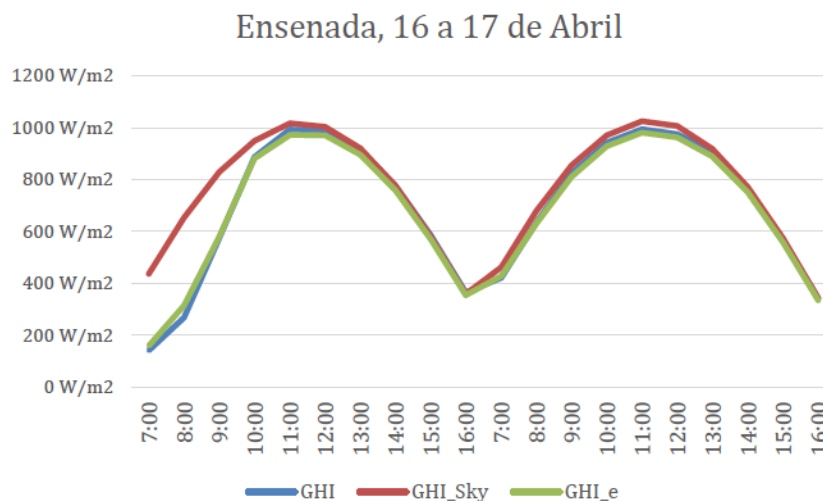


Figura 2 Predicción a una hora.

Predicción a 2 horas (4,1)

La Figura 3 muestra los resultados del modelo para una predicción a 2 horas de anticipación, con orden 4 y 1 término autorregresivo, con un RMSE general de 27.6394 W/m^2 . En el primer día, el error es mayor que el segundo, con un error absoluto máximo de 88.47287 W/m^2 , casi el doble que en la predicción a una hora.

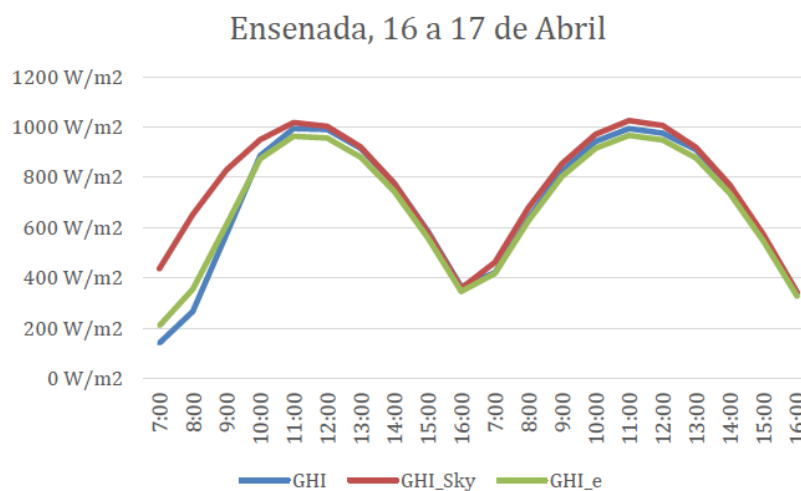


Figura 3 Predicción a dos horas.

Predicción a 3 horas (4,1)

La Figura 4 muestra los resultados del modelo para una predicción a 3 horas con orden 4 y 1 término autorregresivo, con un RMSE general de 37.569 W/m^2 . Nuevamente, el primer día presenta mayor error, alcanzando un máximo absoluto de 117.9182 W/m^2 , casi el triple del error de la predicción a una hora y mayor también que el de la predicción a dos horas.

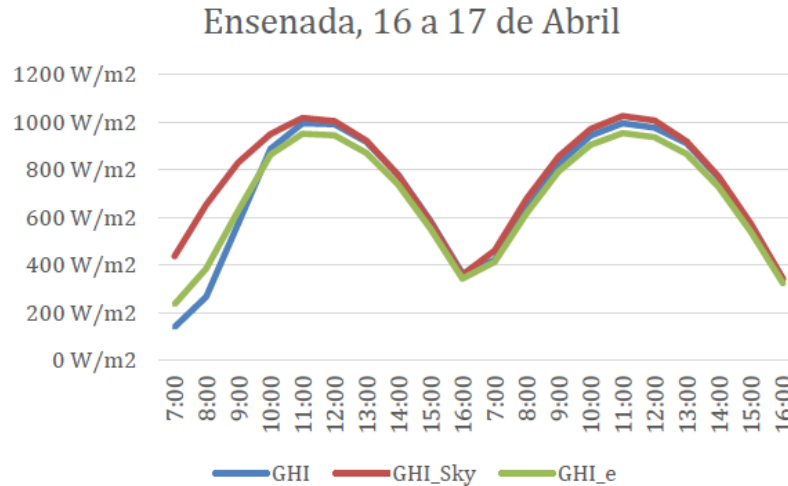


Figura 4 Predicción a tres horas.

Predicción a 4 horas (1,2)

La Figura 5 presenta los resultados de una predicción a 4 horas con orden 1 y 2 términos autorregresivos, obteniendo un RMSE general de 45.3985 W/m^2 . El primer día vuelve a presentar mayores errores, siendo el máximo absoluto de 113.665 W/m^2 . Es notorio cómo el error aumenta respecto a los modelos anteriores y cómo los valores tienden a ser más bajos en el primer día.

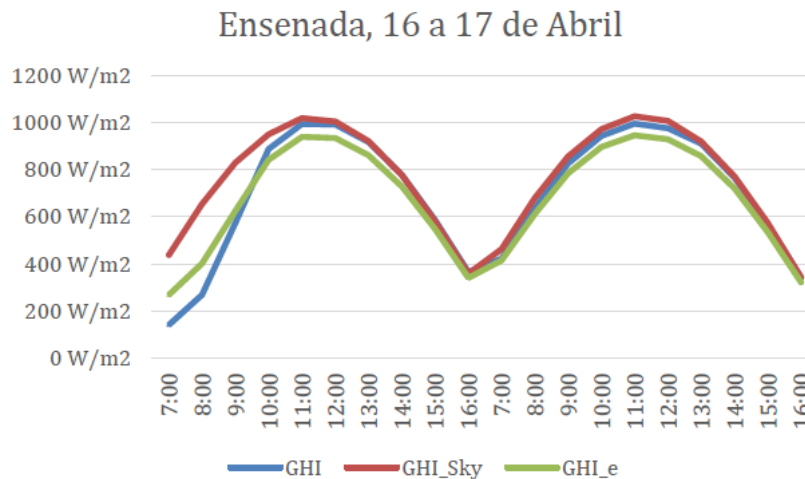
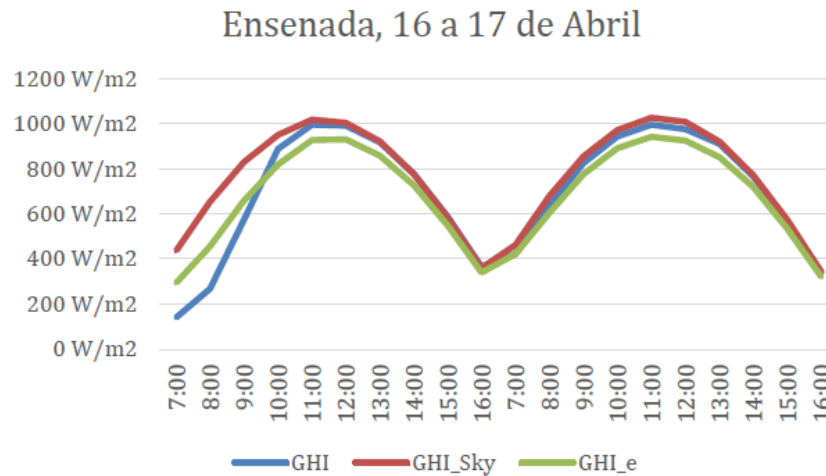


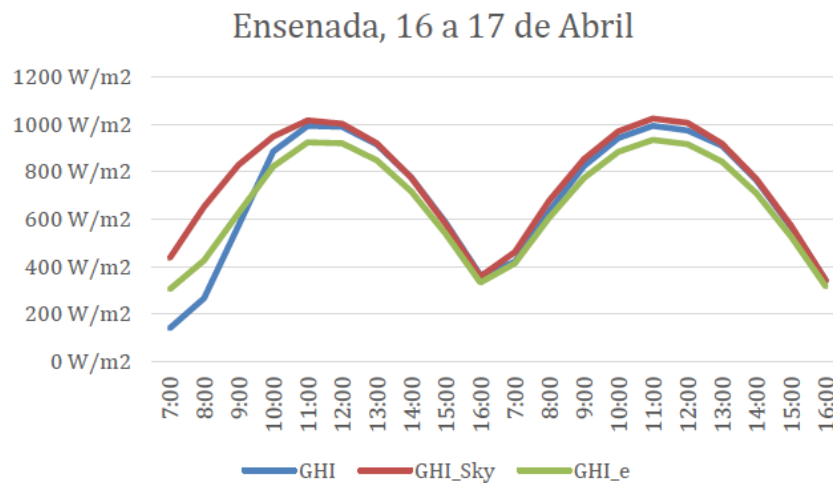
Figura 5 Predicción a cuatro horas.

Predicción a 5 horas (2,2)

La Figura 6 muestra los resultados de la predicción a 5 horas con orden 2 y 2 términos autorregresivos, alcanzando un RMSE de 51.4819 W/m^2 . Nuevamente, el primer día presenta el error más alto, con un máximo absoluto de 187.0249 W/m^2 , mostrando un incremento significativo respecto al modelo anterior.

**Figura 6** Predicción a cinco horas.**Predicción a 6 horas (1,2)**

La Figura 7 presenta la predicción a 6 horas con un modelo de orden 1 y 2 términos autorregresivos, con un RMSE general de 55.4176 W/m^2 . El primer día presenta nuevamente un mayor error, con un máximo absoluto de 164.7946 W/m^2 , ligeramente inferior al presentado en la predicción de 5 horas. Sin embargo, se observa cómo el RMSE muestra un incremento progresivo, indicando mayor error en el sistema con mayor horizonte de predicción.

**Figura 7** Predicción a seis horas.

Puede observarse que el error del modelo crece con el horizonte de predicción: el RMSE pasa de $\approx 15.44 \text{ W/m}^2$ (1 h) a $\approx 55.42 \text{ W/m}^2$ (6 h), y las demás métricas (MAE y MBE) muestran una tendencia análoga. Las gráficas confirman que, aunque el modelo sigue la tendencia general de la GHI y del GHI_sky, falla sistemáticamente al capturar picos y caídas abruptas, lo cual se manifiesta en los errores absolutos máximos observados (p. ej. 46.33, 88.47, 117.92, 113.66, 187.02 y 164.79 W/m^2 para 1–6 h respectivamente). Además, las predicciones presentan peores comportamientos en el día de mayor variabilidad (16 de abril, $\sigma = 189.82$), lo que indica sensibilidad del modelo a condiciones de alta variabilidad intradía.

Discusión

Los resultados muestran una tendencia nítida de aumento del error con el horizonte de predicción. El RMSE pasa de aproximadamente 15.44 W/m^2 a 1 h hasta alrededor de 55.42 W/m^2 a 6 h. Las series de errores absolutos máximos por horizonte fueron 46.33, 88.47, 117.92, 113.66, 187.02 y 164.79 W/m^2 para 1 a 6 h respectivamente. Estas magnitudes confirman que la incertidumbre acumulada y la alta variabilidad intradía en días como el 16 de abril, cuya desviación estándar fue cerca de 189.82 W/m^2 , son la principal fuente de los picos de error observados. Tomando una irradiancia media aproximada de 170 W/m^2 y una eficiencia típica de módulos del 20 por ciento, la potencia aprovechable media por metro cuadrado sería de alrededor de 34 W, lo que corresponde a casi 298 kWh/m^2 al año. En ese contexto, ganancias pequeñas en la energía realmente captada son relevantes. Por ejemplo, una mejora relativa de 1 por ciento equivale a cerca de 2.98 kWh/m^2 al año y una mejora de 5% equivale a cerca de 14.89 kWh/m^2 al año, lo que en una hectárea supondría alrededor de 148.9 MWh adicionales al año. Estas cifras cuantitativas ayudan a dimensionar el impacto práctico de mejorar la precisión del pronóstico. En términos computacionales el modelo demuestra una ventaja práctica.

El ajuste y la evaluación sobre un año de datos en el equipo empleado se completaron en el orden de 5 minutos sin GPU. Este tiempo es indicador de la parsimonia computacional del enfoque y facilita despliegues en entornos con recursos limitados. La ventaja operativa contrasta con la de modelos profundos como CNN o CNN-LSTM que en trabajos comparativos muestran mejoras en precisión, pero requieren hardware acelerado y tiempos de entrenamiento e inferencia sensiblemente más largos.

Para mejorar la robustez del sistema y reducir errores en horizontes más largos sugerimos acciones concretas sin remover la estructura base del modelo. Primero aumentar la resolución temporal. Actualmente se usa muestreo horario entre 7am a 4 p.m. que da 10 muestras por día. Pasar a muestreo de 15 minutos eleva ese número a 40 muestras por día, lo que multiplica la información temporal disponible y permite detectar cambios abruptos con mayor fidelidad. El coste computacional tiende a escalar de forma aproximada con el número de muestras, por lo que un muestreo de 15 minutos podría aumentar el tiempo de cómputo en un factor cercano a cuatro, lo que en la misma máquina llevaría a un tiempo de procesamiento orientativo del orden de 20 minutos por año de datos, todavía razonable para muchas aplicaciones locales. Segundo incorporar entradas exógenas. Descomponer el GHI en sus componentes directa y difusa como entradas independientes y añadir variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y medidas de aerosol debe reducir la variabilidad no explicada por la sola serie de GHI. Tercero explorar hibridaciones ligeras que combinen las expansiones polinomiales con mecanismos de memoria como LSTM. En este esquema las expansiones polinomiales aportan parsimonia e interpretación de coeficientes mientras que la memoria secuencial ayuda a captar dependencias temporales más largas sin obligar a desplegar modelos muy pesados. Por último, mantener validaciones estrictas en tiempo y probar el modelo con días extremos ayudará a asegurar que las mejoras se traduzcan en rendimiento operacional.

4. Conclusiones

Aportación principal: se confirma que las expansiones polinomiales son una alternativa práctica y de bajo coste para la predicción de radiación solar a muy corto plazo en entornos con recursos

computacionales limitados. Hallazgos clave: el modelo logra un buen ajuste a 1 h con RMSE aproximado a 15.44 W/m^2 , pero su precisión disminuye de forma sostenida hasta 6 h con RMSE alrededor de 55.42 W/m^2 . Los picos de error observados en días de alta variabilidad muestran la necesidad de mayor resolución temporal y de entradas adicionales para horizontes más largos. El coste computacional es reducido y favorece la implementación local sin infraestructura de cómputo especializada.

Se recomienda aumentar la resolución temporal a 15 o 30 minutos para capturar dinámicas abruptas, incorporar la descomposición de la GHI en sus componentes de irradiancia directa normal DNI y de irradiancia difusa DHI y añadir variables meteorológicas y de aerosol como entradas al modelo, además conviene evaluar hibridaciones que combinen expansiones polinomiales con mecanismos de memoria tipo LSTM para mejorar los horizontes intermedios sin aumentar innecesariamente el coste computacional. El bajo coste de procesamiento facilita el despliegue in situ en tiempo real en plantas o estaciones locales, y un esquema típico de implementación incluiría adquisición desde piranómetros o sensores locales, preprocesamiento mínimo, inferencia en un dispositivo de borde o en un servidor local y almacenamiento periódico de resultados para control. Es recomendable mantener un modo de respaldo basado en modelos de cielo claro y actualizar el modelo periódicamente con nuevos datos para preservar la robustez operativa. Mejoras aparentemente pequeñas en la precisión del pronóstico se traducen en incrementos energéticos y económicos relevantes a escala de planta, por lo que la inversión en optimización de modelos y en estrategias operativas está plenamente justificada.

Referencias

- Glover, J., & McCulloch, J. (1958). The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine.
- Liu, B., & Jordan, R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* Vol. 4, 1-19.
- Page, J. (1961). The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N - 40°S . *Proceedings of the UN conference on new sources of energy* (págs. 378-390). Rome: UN.
- Iqbal, M. (1979). A study of Canadian diffuse and total solar radiation data, part I. Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy* Vol. 22, 81-86.
- Lam, J. C., & Li, D. H. (1996). Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment*, 527-535.
- Orgill, J., & Hollands, K. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* Vol. 19, 357-359.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The Average Distribution of Solar Radiation- Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy* Vol. 22, 155-164.
- Erbs, D., Klein, S., & Duffie, J. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy* Vol. 28, 293-302.
- Bird, R. E., & Hulstrom, R. L. (1981). A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute.

- Perez, R., Scott, J., Seals, R., Arbogast, C., & Stewart, R. (1983). An anisotropic model for diffuse radiation incident on slopes of different orientations and possible applications to CPC's. Albany: Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & David, M. (1987). A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* Vol. 39, 221-231.
- Maxwell, E. L. (1987). PV Performance Modeling Collaborative. Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute.
- Reindl, D., Beckman, W., & Duffie, J. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* Vol. 45, 1-7.
- Ulgen, K., & Hepbasli, A. (2002). Comparison of solar radiation correlations for Izmir, Turkey. *International Journal of Energy Research*, 413-430.
- Ahmed, M., Ahmad, F., & Akhtar, M. (2009). Estimation of global and diffuse solar radiation for Hyderabad, Sindh, Pakistan. *Journal of Basic and Applied Sciences* Vol. 5, 73-77.
- Okundamiya, M., & Nzeako, A. (2010). Empirical model for estimating global solar radiation on horizontal surfaces for selected cities in the six geopolitical zones in Nigeria. *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology* Vol. 2, 805-812.
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., & Morcrette, J.-J. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques* Vol. 6.
- Vega de Kuyper, J. C., & Ramirez Morales, S. (2014). Fuentes de energía, renovables y no renovables aplicaciones (1era ed.). Bogotá: Alfaomega.
- Solé, A. C. (2014). Energías Renovables (2da ed.). Bogotá: Ediciones de la U.
- Liu, G. (2001). Nonlinear Identification and Control: A Neural Network Approach. Nottingham: Springer.
- Ronquillo Lomeli, G. (2015). Inteligencia Artificial para optimización de flama en quemadores a bunker C. Santiago de Querétaro: CIDESI.
- David, M., Ramahatana, F., Trombe, P. J., & Lauret, P. (2016). Probabilistic forecasting of the solar irradiance with recursive. *Solar Energy* 133, 55-72.
- Farías Tovar, H. G. (2018). Predicción de radiación solar por series de. Santiago de Querétaro: CIDESI.
- Assaf, A. M., Haron, H., Abdull Hamed, H. N., Ghaleb, F. A., Qasem, S. N., & Albarrak, A. M. (2023). A Review on Neural Network Based Models for Short Term Solar Irradiance Forecasting
- El-Shahat, D., Tolba, A., Abouhawwash, M., & Abdel-Basset, M. (2024). Machine learning and deep learning models based grid search cross validation for short-term solar irradiance forecasting

Sistema De Segmentación Automática Y Análisis Morfológico De Arcadas Dentales En Imágenes Radiográficas Para Apoyo Clínico

Braulio Díaz Ceballos¹ y Francisco Javier Cuevas de la Rosa¹

¹Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Lomas del Campestre, 37150 León de los Aldama, Gto.
brauliodiazceballos@gmail.com

Resumen. La salud bucodental es un componente esencial del bienestar general, y las variaciones en la estructura dental pueden reflejar condiciones que no siempre son perceptibles en una revisión clínica convencional. En este contexto, el uso de radiografías y técnicas de procesamiento digital de imágenes constituye una alternativa eficaz para identificar irregularidades en la morfología dental de manera automatizada. Se desarrolló un programa de segmentación para la detección automática de diastemas en radiografías dentales. El sistema empleó procesamiento digital de imágenes en escala de grises y análisis morfológico aplicado a un conjunto de radiografías obtenidas de la facultad de odontología de la Universidad De La Salle Bajío. Los resultados mostraron que el algoritmo logró identificar diastemas en la mayoría de los casos, aunque enfrentó limitaciones asociadas al contraste y la superposición de estructuras en la zona de incisivos. Se concluye que la propuesta es viable como apoyo al diagnóstico, y que la implementación de mecanismos adaptativos podría mejorar su robustez para aplicaciones clínicas.

Palabras clave: Procesamiento, morfología, automatizada.

1. Introducción

En la actualidad, la salud bucodental es un componente esencial del bienestar general. Las variaciones en la estructura o apariencia de los dientes pueden reflejar condiciones que no siempre son perceptibles mediante una inspección clínica convencional. En este contexto, el uso de imágenes radiográficas y técnicas de análisis computacional ofrece una alternativa valiosa para detectar patrones inusuales en la morfología dental, facilitando la identificación de posibles irregularidades de forma automatizada.

Si bien, existen sistemas basados en AI que asisten en la detección de estructuras dentales y/o patologías, muchos de estos requieren equipos especializados y costosos, fuera del alcance de clínicas pequeñas o consultorios con recursos limitados.

El objetivo principal es identificar irregularidades en la morfología dental de la sección inframaxilar a partir del análisis computacional de imágenes radiográficas, con el fin de generar alertas tempranas de manera automatizada. Este sistema busca no solo ser una herramienta de apoyo clínico para odontólogos, sino también una alternativa asequible que contribuya a mejorar la calidad de vida en la población mediante el acceso a tecnologías diagnósticas más inclusivas.

2. Antecedentes

Anil K Jain y Chen (2004) realizaron un estudio en donde muestra un proceso semi automático para la identificación humana basado en el análisis mediante la comparación de imágenes radiográficas, el proceso consta de varios módulos siendo que primero se realiza la segmentación de los dientes en las radiografías utilizando técnicas de preprocesamiento y detección de bordes para aislar las regiones dentales relevantes. Luego, se extraen los contornos de cada diente para representar su forma de manera computacional, midiendo desde su orientación de la pieza, en inicio y final de las partes del diente (corona y raíz), el tamaño del diente, su ancho, etc. Además, que se comparan las piezas con sus vecinos para observar parentescos con respecto a radiografías anteriores del paciente, siendo la forma y especio entre las piezas adyacentes.

Un trabajo de investigación en México, realizado por Luis Miguel García Alcalá (2020), aborda la segmentación de piezas dentales. Su algoritmo utiliza el operador de Sobel para detectar gradientes verticales y una curva cúbica para identificar el área entre los dientes superiores e inferiores. Aunque su método es efectivo para medir el tamaño dental, requiere una intervención humana considerable.

Lee et al. (2023) desarrollaron un modelo de *deep learning* capaz de identificar múltiples enfermedades dentales en radiografías panorámicas, alcanzando altos niveles de precisión y demostrando el potencial clínico de este enfoque.

Al-Antari et al. (2022) compararon diferentes arquitecturas de segmentación en radiografías panorámicas, destacando la eficacia de modelos como DoubleU-Net para delimitar dientes y raíces con elevada exactitud.

Estos resultados confirman la viabilidad de la segmentación como herramienta base en aplicaciones odontológicas.

3. Marco teórico

La primera, conocida como dentición infantil, decidua o de leche, comienza a aparecer en la boca del lactante alrededor de la primera mitad de vida. Esta dentición consta de 20 dientes, los cuales permanecen en la boca del niño hasta aproximadamente los seis años, momento en el que comienzan a erupcionar los dientes permanentes. Durante esta transición, se habla de dentición mixta, ya que los dientes temporales son progresivamente reemplazados por los definitivos, un proceso que ocurre entre los seis y 12 años. Finalmente, hacia los 18 años, la dentición permanente se completa con un total de 32 piezas. Ahora bien, la dentadura permanente se supone que con los cuidados correctos tienen que durar para toda la vida del individuo (Martin, 2013).

La dentición permanente está formada por distintos tipos de dientes tales como los incisivos, los caninos, premolares y molares, cada diente tiene una función específica. Ahora bien, cuando nos referimos a un diente en específico no basta con mencionar que tipo de diente, un ejemplo es cuando mencionamos un incisivo en concreto no basta con solo mencionarlo ni referirse al primero o el segundo. Es por ello que se inventaron los odontogramas los cuales nos permiten referirnos a cada diente de forma individual. Por motivos de simpleza solo se mencionará el odontograma más utilizados por los odontólogos (Martin, 2013).

Odontograma de la Federación Dental Internacional (FDI)

El sistema FDI numera los dientes desde el centro hacia atrás, comenzando en la arcada superior derecha. Cada diente recibe un número de dos dígitos: el primero indica el cuadrante y el segundo la posición del diente (Martin, 2013).

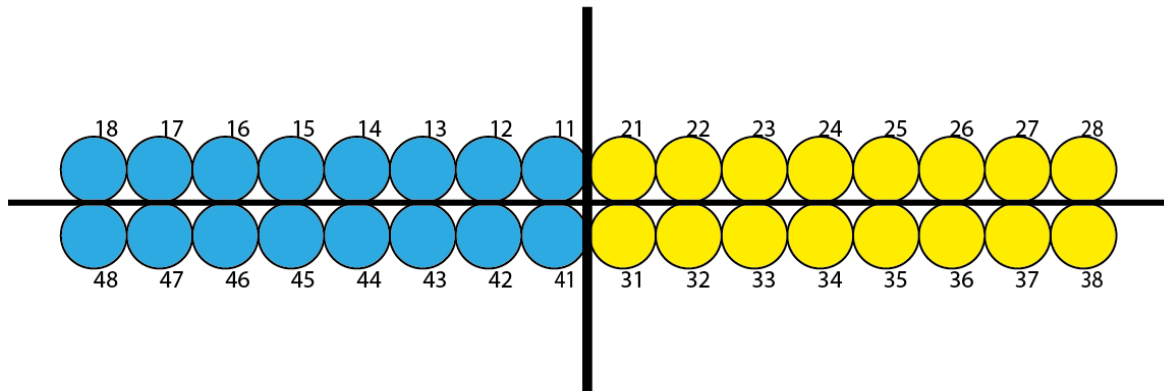


Figura. 1. Diagrama de la dentadura permanente según el sistema FDI.

1

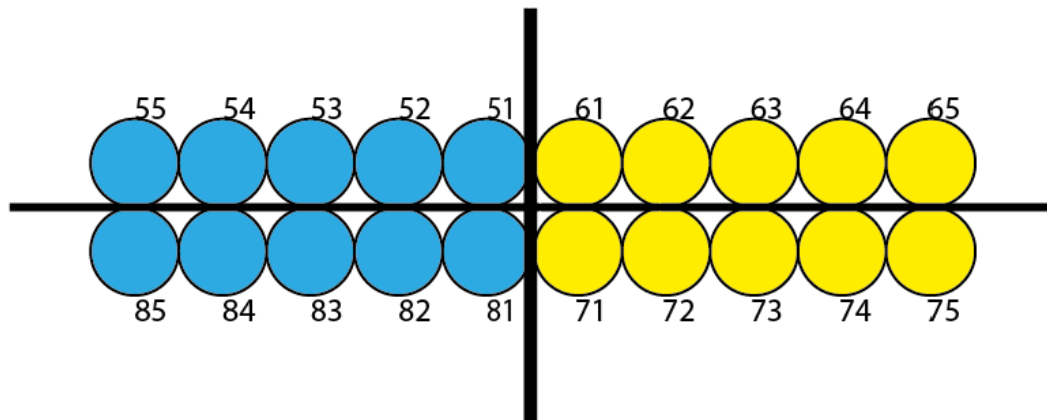


Figura. 2 Diagrama de la dentadura infantil según el sistema FDI.

3.1 Anatomía básica del diente

Cada diente se compone principalmente de dos partes: la corona y la raíz, separadas por la línea cervical o cuello dental. La corona está recubierta por esmalte, mientras que la raíz lo está por cemento, ambos actuando como barreras frente a agentes físicos y químicos. El esmalte, al ser la parte visible y expuesta, posee una gran resistencia, en contraste con la raíz, que se encuentra protegida dentro de la encía y alojada en una cavidad ósea llamada alvéolo (Gurrola y Revuelta, 2023).

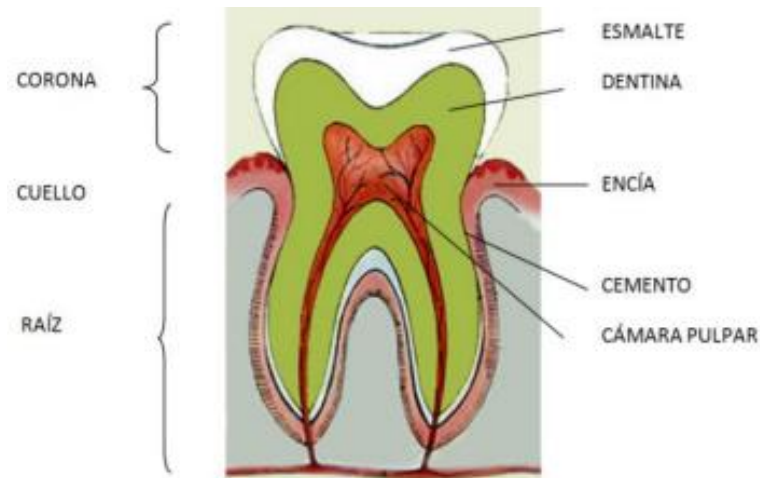


Figura. 3. Anatomía básica de un diente (Martin, 2013).

3.2 Fundamentos de visión por computadora

Segmentación basada en Umbralizado. La umbralización convierte una imagen en escala de grises a una binaria (blanco y negro). Esto permite etiquetar objetos de interés, como los dientes, con un valor diferente al fondo. Es una técnica de segmentación rápida y de bajo costo computacional, ideal para procesar imágenes en tiempo real

Umbralización fija. La umbralización fija permite separar objetos de interés del fondo utilizando un valor de umbral constante aplicado a toda la imagen. En este trabajo se empleó para distinguir las estructuras dentales en radiografías en escala de grises, generando imágenes binarias que facilitaron la posterior segmentación (Pajares & De la Cruz, 2001).



Figura. 4. Imagen de Lena en escala de grises y sometida a una umbralización fija.

2

3.3 Filtrado y realzado de las imágenes

Operaciones morfológicas. La morfología matemática es una herramienta para el procesamiento de imágenes que se basa en la teoría de conjuntos. Trata las imágenes como conjuntos de puntos para analizar sus formas, siendo una técnica fundamental para trabajar con imágenes binarias. Las operaciones en la escala de grises se pueden separar dependiendo a la necesidad, que realmente

son procesos matemáticos en lo que respecta a espacios vectoriales, dicho procesos serían los siguientes:

- Dilatación
- Erosión
- Cierre
- Conciencia estructural

3.4 Dilatación

La dilatación es una de las operaciones morfológicas fundamentales en el procesamiento de imágenes. Su función principal consiste en expandir las regiones de primer plano (blancas) dentro de una imagen binaria, lo que permite reforzar bordes, rellenar huecos pequeños y conectar regiones cercanas. En términos conceptuales, puede entenderse como la superposición de un elemento estructurante sobre la imagen: si este coincide con algún píxel del objeto, dicho píxel se conserva y la región se expande. Esta propiedad hace que la dilatación sea útil en aplicaciones donde se busca resaltar o unificar estructuras. En este trabajo, se aplicó la dilatación para mejorar la continuidad de las piezas dentales segmentadas, facilitando la identificación de los espacios interdentes (Pajares & De la Cruz, 2001)

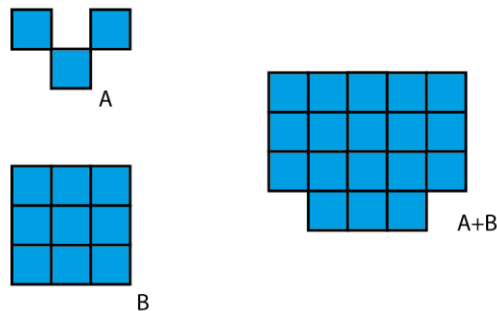


Figura. 5. Representación gráfica del proceso de dilatación.

3.5 Filtro de paso alto

Los filtros de paso alto se emplean en procesamiento digital de imágenes para resaltar cambios bruscos de intensidad, asociados a los bordes de los objetos. Su funcionamiento se basa en el cálculo de gradientes direccionales, que indican la variación local de la intensidad en el plano de la imagen. En la práctica, estos gradientes se aproximan mediante operadores de convolución, siendo el operador de Sobel uno de los más utilizados. Este operador aplica máscaras de 3×3 en direcciones horizontal y vertical para detectar contornos y transiciones de intensidad. En este trabajo, el operador de Sobel se utilizó para realzar los bordes dentales y facilitar la delimitación de las estructuras durante la segmentación (Pajares & De la Cruz, 2001).

3.6 Fundamentos matemáticos y computacionales

Centroide. Es el punto que indica el centro geométrico de un objeto y puede calcularse utilizando fórmulas matemáticas.

Cuando un cuerpo está compuesto por un material uniforme u homogéneo, su densidad o peso específico permanecen constantes en toda su estructura. Como resultado, estos valores pueden factorizarse y cancelarse en las integrales utilizadas para calcular el centroide, simplificando las ecuaciones. Con ello en mente las ecuaciones mencionadas son las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{\int x dA}{\int dA}, \quad \bar{y} = \frac{\int y dA}{\int dA} \quad (1)$$

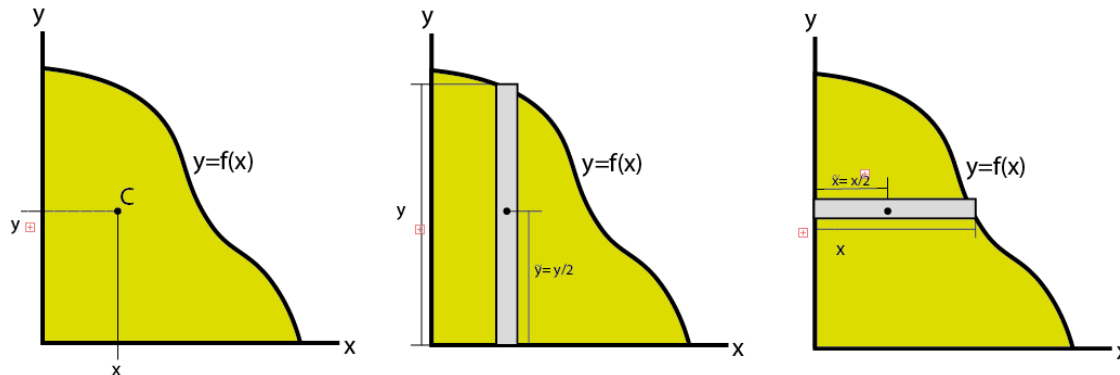


Figura. 6. Demostración de cómo funciona las fórmulas para encontrar las coordenadas del centroide.

Con ello se pueden identificar áreas dentro de imágenes para su respectivo análisis (Jaramillo, s.f.)

Mínimos cuadrados. Al trabajar con coordenadas, la regresión polinomial se utiliza para encontrar una curva que se aproxime a todos los puntos. Este método busca el mínimo error entre los datos, en lugar de una interpolación que podría oscilar demasiado (Chapra, 2007).

Regresión polinomial. Cuando los datos no presentan una relación lineal, se puede utilizar la regresión polinomial para ajustar un polinomio de grado adecuado que represente mejor la tendencia observada. El ajuste se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, que busca minimizar el error entre los valores observados y los predichos por el polinomio. En el contexto de este estudio, la regresión polinomial se emplea para modelar patrones en las mediciones morfológicas de las arcadas dentales obtenidas de las imágenes radiográficas, lo que permite cuantificar y analizar de manera más precisa características relevantes para la segmentación automática y el apoyo clínico (Chapra, 2007).

4. Metodología

4.1 Descripción del dataset utilizado

Las radiografías utilizadas provienen de la Universidad La Salle Bajío. Estas imágenes panorámicas, capturadas por estudiantes, presentan variaciones en brillo y ruido, lo que complica el proceso de detección de dientes, por lo que se tomó una muestra de 20 imágenes para la realización de los procesos.

Desarrollo del programa. Para este proyecto se utilizó Python, gracias a su versatilidad y facilidad de uso. El entorno de desarrollo fue Visual Studio Code, que optimizó la escritura y depuración del código, permitiendo un flujo de trabajo eficiente.

Las principales bibliotecas utilizadas durante el desarrollo fueron:

- NumPy: Para manipulación y procesamiento de matrices, especialmente en el manejo de las imágenes como arreglos bidimensionales.
- OpenCV (cv2): Para realizar operaciones avanzadas de procesamiento de imágenes, incluyendo filtrado, detección de bordes y binarización.
- Matplotlib: Para la visualización de datos e imágenes procesadas, incluyendo la generación de histogramas y comparaciones visuales.
- SciPy: Para implementar métodos matemáticos y funciones estadísticas, fundamentales en el análisis y preprocesamiento de las imágenes.

4.2 Algoritmos implementados

- Preprocesamiento: Se utiliza el filtro cv2.blur con una máscara de 17x17 para eliminar el ruido de la imagen y mejorar la calidad de los datos.
- Binarización: Los píxeles de la imagen se convierten a un formato binario (blanco y negro) usando un umbral definido por el usuario.
- Detección de bordes y segmentación: Las funciones de la biblioteca OpenCV identifican los contornos cerrados, lo que permite segmentar las estructuras dentales.
- Determinación de centroides: Se calculan los centroides de las cinco áreas más grandes para analizar su cercanía al centro de la imagen.

Una vez localizada la sección inframaxilar, se definió una curva base que aproxima la trayectoria del maxilar. Para ello se seleccionaron puntos de referencia obtenidos del borde dental y se ajustó una curva polinomial mediante el método de mínimos cuadrados, minimizando el error global de ajuste. Posteriormente, esta curva se refinó con un ajuste spline, lo que permitió mayor flexibilidad para adaptarse a las variaciones anatómicas de cada radiografía.

Ahora bien, se establecieron los bordes verticales, con el fin de delimitar de manera precisa la arcada inframaxilar y generar la spline de referencia. Para ello se creó un mapa de gradiente con el operador de Sobel el cual no permitió establecer el límite de la spline en base a los bordes maxilares y realizar el trazo.

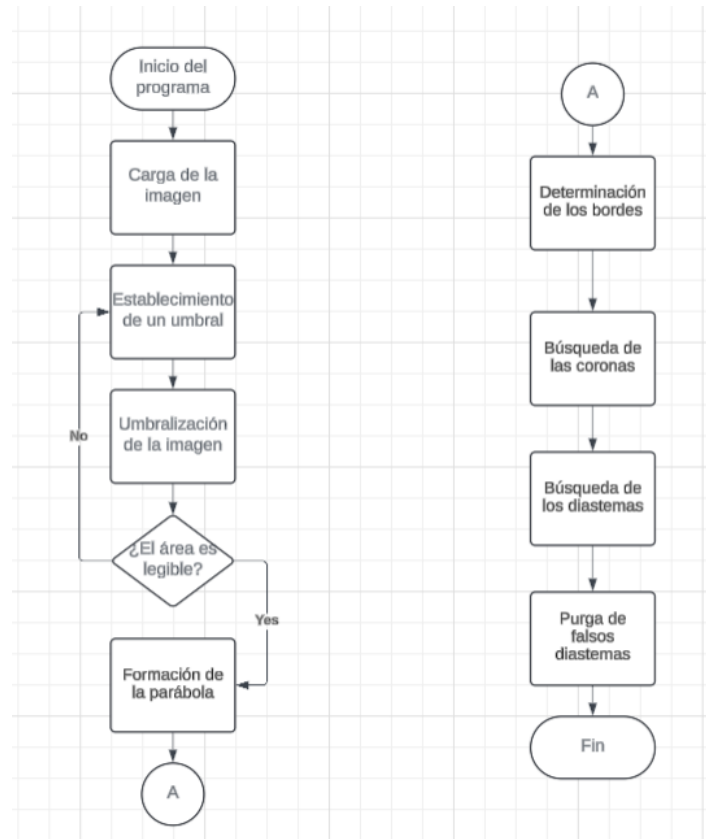


Figura. 7. Diagrama de flujo de los procesos del programa a grandes rasgos.

5. Resultados

Binarización: El umbral inicial fue del 35%, ajustado manualmente para mejorar la segmentación. A veces, las áreas centrales se conectaban, pero se corrigió con dilatación. En general, la detección del área de interés fue satisfactoria, debido a que es fácil de identificar el área central de la dentadura.



Figura. 8. Imagen umbralizada.

Histogramas: Los histogramas justificaron la elección de los umbrales. Se notaron picos en los extremos de la escala, lo que causó desequilibrios en la intensidad. Algunas imágenes se inclinaron hacia intensidades bajas o altas, afectando al algoritmo.

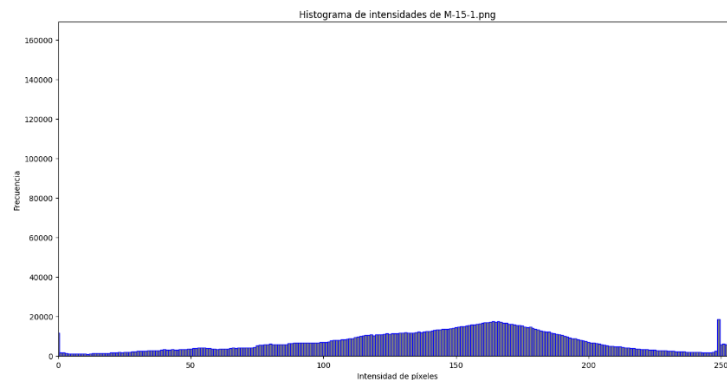


Figura. 9. Histograma de la imagen.

Contornos: La identificación de los contornos fue clave para validar las etapas previas. A veces, aparecieron contornos adicionales, lo que demostró que el resultado dependía de la binarización inicial. Al ajustar el umbral, se aisló mejor el contorno central.

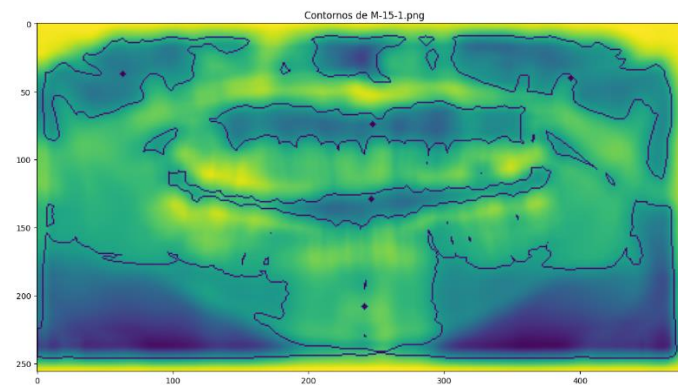


Figura. 10. Contornos detectados.

Puntos iniciales de la sonrisa: La detección de los puntos para la parábola fue casi perfecta debido a la ausencia de ruido. La precisión de esta fase se basa directamente en la calidad de la segmentación anterior.



Figura. 11. Puntos iniciales de la imagen.

Filtro Sobel: En 90 % de los casos, los bordes fueron claros. Sin embargo, algunas imágenes tenían maxilares desvanecidos o con ruido. La detección, cuando fue posible, ayudó a establecer límites más confiables para la búsqueda de diastemas.

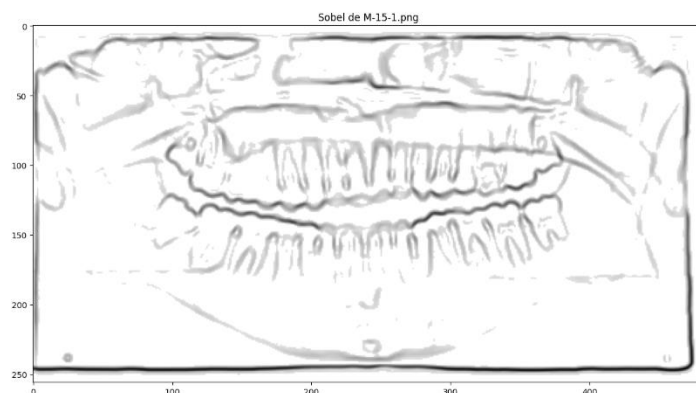


Figura. 12. Resultado del proceso de Sobel.

Análisis general: Los patrones se asociaron a la morfología dental y a las condiciones de captura (superposiciones, curaciones). Estos factores influyeron en los parámetros de binarización y segmentación del algoritmo.

Resultados finales: El programa identificó las áreas de interés en la mayoría de las imágenes, pero requirió ajustes manuales. En el futuro, la automatización de los parámetros reducirá la intervención del usuario.

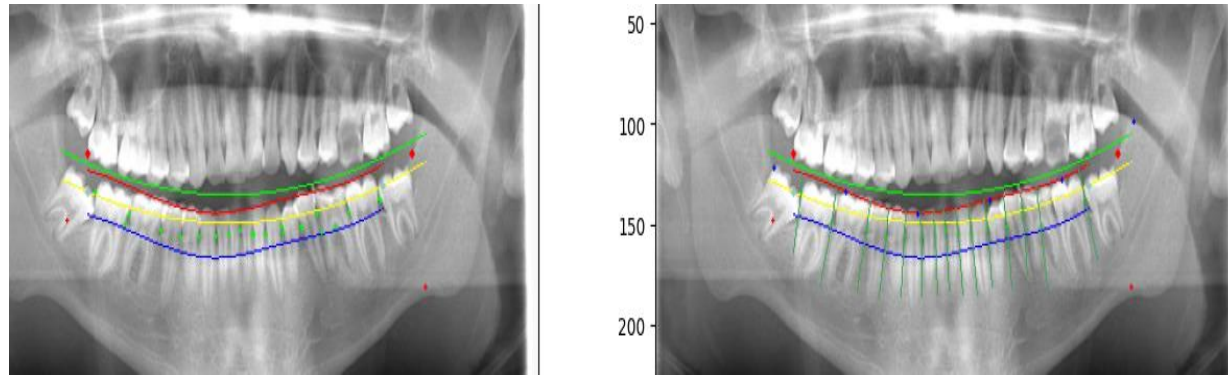


Figura. 13. Imagen del resultado final del proceso del programa.

6. Discusión

Aunque el algoritmo mostró un rendimiento prometedor, enfrentó retos importantes en las etapas finales del procesamiento. La detección de diastemas se complicó por la superposición de estructuras y el ruido, especialmente en la zona de los incisivos, donde la presencia de la columna vertebral generó interferencias visuales. El contraste de la radiografía también resultó un factor crítico, ya que su variabilidad afectó la capacidad del algoritmo para distinguir entre los espacios dentales y las pulpas. Además, debido a que los pasos del algoritmo se condicionan entre sí, los errores iniciales tendieron a propagarse, afectando la precisión final.

7. Conclusiones

Se demostró la viabilidad de un enfoque algorítmico para el diagnóstico de diastemas en radiografías dentales. Para fortalecer esta propuesta, será crucial desarrollar un sistema que se adapte automáticamente a las características de la imagen —como contraste y morfología—, lo que permitiría reducir la necesidad de intervención humana y hacer al algoritmo más robusto y confiable para su aplicación clínica.

Referencias

- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). Métodos numéricos para ingenieros. McGraw-Hill.
- Cuevas, F., Rocha Navarro, M., García Salido, M., & Rodríguez Villegas, M. (2023). Metrology and digital image processing in dentistry. In IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/>
- García Alcalá, L. M. (2020). Segmentación de radiografías panorámicas dentales mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora]. León, Guanajuato, México.
- Goma Martín, C. (2013). El conocimiento de las poblaciones del pasado a través de los restos óseos: Introducción a la morfología dental y confección de una clave dicotómica para la clasificación de piezas aisladas [Proyecto de final de carrera, Universidad Autónoma de Madrid]. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/660344/goma_martin_cristina.pdf?sequence=1
- Gurrola, B., & Revuelta, L. P. (2023). Tallado en cera de dientes permanentes. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/2023/Publicaciones/libros/cbiologia/Tallado_cera.pdf

Jain, A. K., & Chen, H. (2004). Matching of dental X-ray images for human identification. *Pattern Recognition*, 37(7), 1519–1532. https://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Dental/JainChen_MatchingDentalXRays_PR04.pdf

Jaramillo, N. S. (s. f.). Centro de gravedad y centroides. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias Aplicadas y Humanísticas. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/nayive/mr10_web/tema2_centroides.pdf

Pajares, G., & De la Cruz, J. M. (2001). *Visión por computador: Imágenes digitales y aplicaciones*. Ra-Ma.

Yang, H., Wang, X., & Li, G. (2022). Tooth and pulp chamber automatic segmentation with artificial intelligence network and morphometry method in cone-beam CT. *International Journal of Morphology*, 40(2), 407–413. <https://www.scielo.cl/pdf/ijmorphol/v40n2/0717-9502-ijmorphol-40-02-407.pdf>

Lee, J.-H., Kim, D.-H., Jeong, S.-N., & Choi, S.-H. (2023). Dental disease detection in panoramic radiographs using deep learning. *Applied Sciences*, 13(16), 7947. <https://doi.org/10.3390/app13167947>

Al-Antari, M. A., Al-Waisy, A. S., Alzubaidi, L., & Lu, H. (2022). A comparative study of deep learning models for dental segmentation in panoramic radiograph. *Applied Sciences*, 12, 3103. <https://doi.org/10.3390/app12063103>

Silva, G., Oliveira, L., & Pithon, M. (2018). Automatic segmenting teeth in X-ray images: Trends, a novel data set, benchmarking and future perspectives. *Expert Systems With Applications*, 107, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.001>

Na`am, J., Harlan, J., Madenda, S., & Wibowo, E. P. (2016). The algorithm of image edge detection on panoramic dental X-ray using multiple morphological gradient (mMG) method. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6, 1012-1018. https://drive.google.com/file/d/142Pw2iaBwnKkk9BcAqYYZ_7c8dfOCve_/view

Sistema De Adquisición Y Visualización Web De Datos En Tiempo Real Sobre Una Arquitectura Determinista De Doble Núcleo En ESP32

José Humberto Cabello-Avalos^{1*}, Elienai Simón-Mier¹, Rodolfo Sánchez Fraga¹, César Hernández-Enríquez¹, Jesús Alcantar-Peña¹, Carlos Augusto López-Lazcano¹, Jorge Alberto Soto-Cajiga¹, Víctor Samuel Balderrama Vázquez^{1*}

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México

*j.cabello@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen. Los sistemas DAQ (sistema de adquisición de datos) en tiempo real para IoT (Internet de las cosas) actualmente son utilizados para el monitoreo de variables físicas (por ejemplo: temperatura, presión, humedad, etc.) utilizando sensores en tiempo real, el cual deben de ofrecer un muestreo de alta frecuencia con procesamiento, comunicación y almacenamiento de los datos obtenidos. En el presente trabajo se desarrolla una arquitectura embebida de bajo costo sobre ESP32 y FreeRTOS que ancla la adquisición de datos a ~1 ms en el Núcleo 1. Mientras que en el Núcleo 0 se hace el procesamiento de la señal, la interfaz web embebida (SSE) y el registro de los datos. El implemento de filas/mutex en el Núcleo 0 y Núcleo 1 permite que este sistema adquiera datos en tiempo real mediante el desacople de tareas. Experimentalmente, el período de muestreo de adquisición de datos está configurado para un tiempo de ~1 ms, el cual mantiene un jitter (variabilidad temporal) mínimo, inclusive cuando el sistema de visualización de web de tiempo real se encuentra activo. Con este sistema de adquisición se valida que el reparto de tareas en multinúcleo es una alternativa para la lectura y envío de datos cuando se conecta un sensor a este sistema. Este sistema de adquisición de datos puede ser usado en aplicaciones dentro de la industria 4.0 conectando a cualquier tipo de sensor.

Palabras Clave: ESP32, FreeRTOS, Tiempo real, Adquisición de datos, IoT.

1. Introducción

Los sistemas de adquisición y visualización de datos (DAQ) son fundamentales en la ingeniería y la ciencia para monitorear, registrar y analizar fenómenos del mundo real. Típicamente, estos sistemas convierten señales físicas —como temperatura, voltaje o movimiento— en datos digitales que pueden ser procesados y presentados al usuario a través de interfaces gráficas o pantallas, Silveira & Paravidino, (2025); Kalytka, (2023).

En este contexto, el microcontrolador ESP32 ofrece una plataforma de hardware para poder desarrollar dichos sistemas. Su popularidad deriva de su doble núcleo, conectividad Wi-Fi/BLE integrada y un robusto ecosistema de código abierto, habilitando casos de uso que van desde la

energía fotovoltaica hasta las redes de sensores sincronizadas y el hogar inteligente, Hercog et al., (2023); Babiuch & Postulka, (2021); Espinosa-Gavira et al., (2024).

El reto central al diseñar sistemas DAQ de alto rendimiento es el determinismo bajo concurrencia. Los bucles únicos (super-loops) fallan en escenarios complejos donde múltiples tareas deben ejecutarse simultáneamente. Un sistema operativo de tiempo real (RTOS) resuelve esto al permitir concurrencia gestionada por prioridades y un claro desacople entre tareas, Chia, (2022); Septian & Arkan, (2022); Turkmanović et al., (2023).

El módulo Wi-Fi del ESP32 corre por defecto en el Núcleo 0. Por ello, anclar la adquisición al Núcleo 1 y mover las tareas de red/SD/UI al Núcleo 0 es una estrategia clave, Arm et al., (2022); Foltýnek et al., (2019), especialmente para aplicaciones de monitoreo con visualización remota Pratikto et al., (2023).

1.1 Plataformas hardware

El ESP32 ha demostrado una gran versatilidad en aplicaciones de monitoreo y control, abarcando desde el análisis eléctrico hasta la recolección de datos de temperatura y humedad, Babiuch et al., (2019); Pratama & Kiswantono, (2023); Kalytka, (2023).

Información reportada sobre el ADC interno de ESP32 menciona la presencia de ruido y no linealidad especialmente en los extremos del intervalo; para mayor precisión se sugiere el uso de convertidores externos como el ADS1115, Espinosa-Gavira et al., (2024); Indriyani et al., (2024). Además, la combinación del periférico I2S con el ADC habilita muestreos de hasta ~96 kHz utilizando DMA para la transferencia de datos, Tran et al., (2024).

1.2 Arquitecturas de software en RTOS y patrones

El patrón productor-consumidor con *queues* (filas de datos) es fundamental para desacoplar la adquisición de la transmisión o procesamiento de datos Turkmanović et al., (2023). FreeRTOS es ampliamente adoptado para estructurar tareas concurrentes en sistemas embebidos complejos Chia, (2022); Septian & Arkan, (2022).

Principios como SOLID y patrones de diseño como “Sensor-View” mejoran la modularidad, mantenibilidad del firmware Babiuch & Foltýnek, (2024), y la integración con herramientas de alto nivel como LabVIEW también ha sido usada y documentada Sugiarto, (2016).

1.3 Multinúcleo, jitter y métricas de tiempo real

Debido a que la actividad del módulo Wi-Fi corre siempre en el Núcleo 0 del ESP32, por lo que, involucrar otras tareas en ese núcleo aumenta el *jitter* (*variabilidad temporal*) de todas las tareas que se ejecutan en ese mismo núcleo, mientras que el Núcleo 1 permanece casi sin ser afectado, Arm et al., (2022). La separación física de tareas críticas (en el Núcleo 1) y tareas tolerantes a la latencia (en el Núcleo 0) es una práctica recomendada, Foltýnek et al., (2019). La evaluación del comportamiento en tiempo real de un sistema considera métricas clave como la latencia de interrupción, el tiempo de cambio de contexto y el tiempo de respuesta de las tareas, Arm et al., (2022).

Sistema De Adquisición Y Visualización Web De Datos En Tiempo Real Sobre Una Arquitectura Determinista De Doble Núcleo En ESP32

1.4 Protocolos, visualización y gateways

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un estándar en IoT por su baja latencia y mínimo consumo de ancho de banda, Adrian et al., (2024). Los protocolos como ESP-NOW habilitan mallas de comunicación local sin necesidad de tener un punto de acceso, Urazayev et al., (2023).

Mientras que LoRa (Long Range) aporta largo alcance y bajo consumo energético, Manuhutu et al., (2025). Las plataformas como Node-RED y los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) abiertos permiten la creación de *dashboards* y la orquestación de flujos de datos He et al., (2024), respectivamente.

Los *gateways* de código abierto, estos permiten hacer enlaces con los sensores locales y la nube, Schraven et al., (2022), donde los servicios como Google Firebase ofrecen opciones de bajo costo para la persistencia de datos, Megantoro et al., (2022).

1.5 Aplicaciones representativas

El alcance de uso del ESP32 en soluciones de IoT como en la energía fotovoltaica, la calidad del aire y la agricultura de precisión son ejemplos usados actualmente, J. Zhang et al., (2018); Pineda-Tobón et al., (2024); Megantoro et al., (2022). El uso del sistema de archivos SPIFFS junto a mecanismos de re-envío de datos típicamente son usados en sistemas industriales, el cual proporciona resiliencia ante fallos de conectividad, Ashwini M S et al., (2025). En control móvil y audio en tiempo real, se usan arquitecturas de doble hilo para Bluetooth el cual así se evitan bloqueos, Gupta et al., (2025).

La combinación de Tasmota, Node-RED, InfluxDB y Grafana han sido utilizados para la telemetría de sistemas fotovoltaicos Radia et al., (2023). También se reportan casos de uso en seguridad, monitoreo ambiental y laboral, Babiuch & Postulka, (2021); Lozada Contreras & Bautista España, (2024). Otros ejemplos incluyen la medición de energía y la adquisición de datos ambientales, K. Zhang & Lv, (2022).

2. Metodología

2.1 Arquitectura de hardware

El sistema se implementó sobre un ESP32-WROOM-32E que integra la ruta de adquisición analógica a ~1 kHz y un canal de temperatura basado en un termistor NTC leído por descarga RC. La salida hace uso del DAC integrado para reflejar la señal procesada y un subsistema de almacenamiento en tarjeta SD para el registro continuo a 1 kHz, con escritura en lotes y rotación horaria. La interfaz inalámbrica usa el propio dispositivo vía Wi-Fi, con una página HTML/JS embebida que recibe datos por Server-Sent Events (SSE) y ofrece descargas CSV de los *buffers* en RAM. Esta es una configuración autosuficiente que permite evaluar el desempeño en campo con mínima infraestructura sin dependencia de recursos externos.

2.2 Arquitectura de software (FreeRTOS)

Dado que la adquisición exige determinismo mientras que la red, la UI y el almacenamiento son asíncronos, se adoptó un diseño multinúcleo con FreeRTOS. Este desacopla responsabilidades mediante queues y protege recursos compartidos con mutex.

La tarea `AdcReaderTask` se ancló al Núcleo 1 y se ejecuta a 1 kHz, incorporando la medición de temperatura. En paralelo, `ProcessorTask` (Núcleo 0) aplica filtrado IIR y compensación térmica, mientras que `SDWriterTask` (Núcleo 0) implementa la escritura en lotes. Este aislamiento físico materializa el patrón de arquitectura para DAQ de alta velocidad, Turkmanović et al., (2023), y mitiga el *jitter* inducido por la pila Wi-Fi, Arm et al. (2022).

2.3 Interfaz y flujo de datos

La interfaz web embebida establece un flujo SSE con dos canales: un canal "plot" a 5 Hz para visualización continua y un canal "info" a 1 Hz para valores agregados. Además, se exponen descargas CSV desde los *buffers* de anillo en RAM (Random Access Memory) para capturas instantáneas de 15 min. Con ello se consigue una solución autocontenida, alternativa a arquitecturas basadas en *brokers* externos como MQTT o pilas de telemetría abiertas, Adrian et al., (2024); Septian & Arkan, (2022); He et al., (2024). La Figura 1 muestra la arquitectura propuesta para el sistema de adquisición.

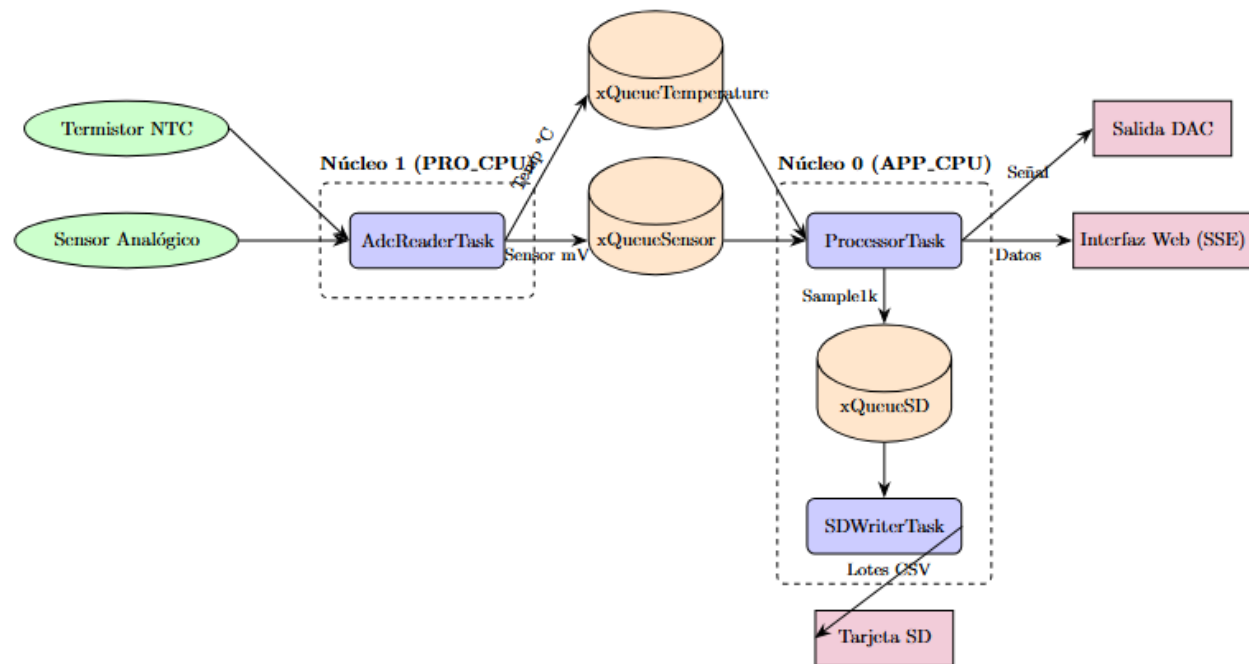


Figura 1. Diagrama de flujo de datos y arquitectura del sistema en el ESP32. Se muestra la distribución de tareas entre los dos núcleos de CPU y la comunicación mediante filas de FreeRTOS.

2.4 Validación del funcionamiento del sistema

Sistema De Adquisición Y Visualización Web De Datos En Tiempo Real Sobre Una Arquitectura Determinista De Doble Núcleo En ESP32

Para validar la robustez y el determinismo del sistema, se diseñó un protocolo experimental centrado en la evaluación bajo carga. Este protocolo abordó tres dimensiones clave:

1. Estabilidad del muestreo bajo estrés de red y almacenamiento. Se sometió al sistema a escenarios de estrés simulado para cuantificar su impacto en el lazo de adquisición de datos. Para la estabilidad de la red se ejecutó un script automatizado que realizaba peticiones HTTP concurrentes y repetitivas al servidor web embebido. Específicamente, se solicitaron descargas de archivos CSV de gran tamaño de forma continua mientras múltiples clientes se conectaban simultáneamente a la interfaz web para recibir datos vía SSE.
2. Calidad de la medición y procesamiento. Se verificó que el procesamiento concurrente de datos no degradara la integridad de la señal ni interfiriera con la temporización del muestreo.
3. Robustez de la comunicación. Se evaluó la latencia extremo-a-extremo, desde la captura del dato por el sensor hasta su visualización en el navegador cliente a través del canal SSE.

Estas mediciones se alinean con las guías de evaluación de sistemas en tiempo real, Espinosa-Gavira et al., (2024) y permiten contrastar el beneficio del anclaje a núcleos (core pinning) y del procesamiento por lotes (batching) frente a configuraciones más simples.

La interfaz de usuario embebida (SSE) cumple un doble propósito. Además de visualizar en tiempo real los datos adquiridos, funciona como un panel de diagnóstico para el propio sistema. Este *panel* muestra métricas operativas críticas —como la tasa de muestreo efectiva, la latencia y la ocupación de los búferes—, permitiendo así evaluar continuamente la calidad y el rendimiento del proceso de adquisición. De este modo, la interfaz se transforma en una herramienta de autoevaluación, no solo en un simple visualizador.

3. Resultados y Discusión

3.1 Rendimiento en tiempo real

Bajo escenarios de trabajo, la tarea `AdcReaderTask` anclada al Núcleo 1 conservó un período de ~1 ms con *jitter* mínimo, mientras la cola (queue) entre tareas amortiguaba la variabilidad de latencia. Este comportamiento confirma que el aislamiento de tareas en diferentes núcleos es una estrategia eficaz contra el *jitter* del módulo Wi-Fi, el cual se alinea con lo reportado para sistemas FreeRTOS en ESP32, Arm et al., (2022). Los resultados vistos de acuerdo al experimento planteando permiten extender el modelo RTOS para aplicaciones y monitoreo de gran variedad de sensores. La Figura 2 muestra el proceso de asignación multinúcleo en FreeRTOS al módulo ESP32 como parte del sistema de adquisición de datos.

```

void setup() {
    Serial.begin(115200); delay(500);

    // RTOS sync
    xRingMutex = xSemaphoreCreateMutex();
    xQueueTemperature = xQueueCreate(5, sizeof(float));
    xQueueSensor = xQueueCreate(600, sizeof(uint32_t));
    xADCSemaphore = xSemaphoreCreateMutex();
    xQueueSD = xQueueCreate(SD_QUEUE_CAP, sizeof(Sample1k));

    // ADC
    adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
    adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_4, ADC_ATTEN_DB_11);
    adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_7, ADC_ATTEN_DB_11); // GPIO35
    esp_adc_cal_characterize(ADC_UNIT_1, ADC_ATTEN_DB_11, ADC_WIDTH_BIT_12, 1100, &adc_chars);

    // Wi-Fi y HTTP
    startWiFi();
    setupHTTP();

    // Tareas
    xTaskCreatePinnedToCore(AdcReaderTask, "AdcReader", 4096, nullptr, 2, nullptr, 1);
    xTaskCreatePinnedToCore(ProcessorTask, "Processor", 4096, nullptr, 1, nullptr, 0);
    xTaskCreatePinnedToCore(SDWriterTask, "SDWriter", 4096, nullptr, 1, nullptr, 0);
}

```

Figura 18. Asignación del sistema multinúcleo en FreeRTOS para la asignación de tareas.

3.2 Calidad de adquisición

La lectura del sensor a 1 kHz se mantuvo estable y el pos-procesamiento no introdujo atrasos temporales. No obstante, se reconoce la limitación del ADC interno del ESP32 (ruido y no linealidad) esta limitación fue cubierta al evitar usar el ADC en los valores extremos de su intervalo de lectura (0 V y 3.3 V), pero encontramos conveniente que para aplicaciones de alta precisión es recomendable integrar un ADC externo como el ADS1115 como lo han implementado otros artículos, Espinosa-Gavira et al., (2024); Indriyani et al., (2024); Oliveira et al., (2025). La Figura 3 muestra la implementación del sistema físico para la lectura y envío de datos de sensores mediante el uso de ESP32.

3.3 Comunicación y almacenamiento

El servidor asíncrono mantuvo una UI fluida con SSE, soportando descargas CSV concurrentes sin interrupciones, mientras la tarea SDWriterTask registró los datos a 1 kHz sin pérdidas. La estrategia es valiosa en entornos con conectividad incierta, ofreciendo una solución local y resiliente. Conceptualmente este trabajo, se ubica como una alternativa autocontenida frente a arquitecturas que dependen de *brokers* MQTT o SCADA, Adrian et al., (2024); Ashwini M S et al., (2025); He et al., (2024). La Figura 4 muestra la interfaz WiFi remota con la que se monitorea el sistema de adquisición datos en tiempo real junto al panel de variables de control y monitoreo.

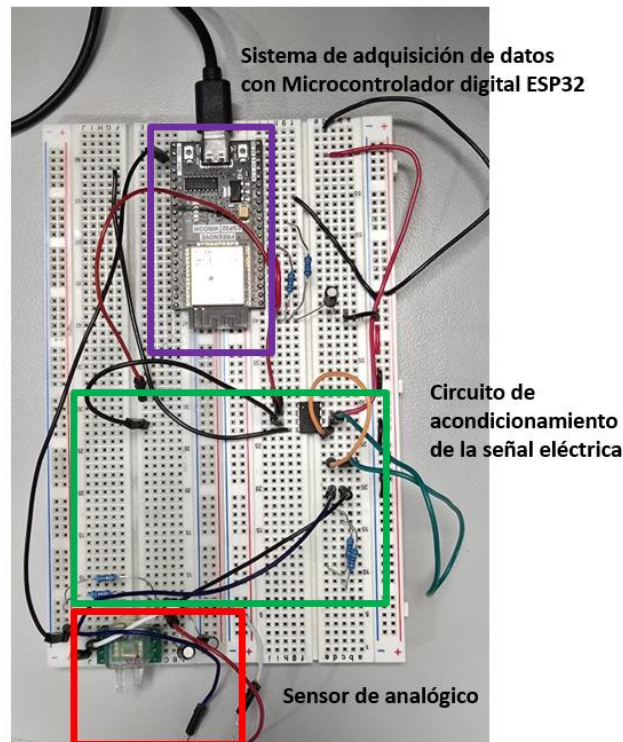


Figura 3. Implementación física del circuito propuesto probando el sistema de adquisición de datos con sensores analógicos.

4. Conclusiones

Se validó una arquitectura dual-núcleo (Núcleo 0 y Núcleo 1) con FreeRTOS y SSE que sostiene un muestreo determinista a ~ 1 kHz para adquirir la información de un sensor analógico de elección libre. La adquisición analógica de los datos se envía al Núcleo 1 donde estos son aislados físicamente y desacoplados para ser almacenados en filas. Posteriormente estos datos son procesados y preparados según la aplicación, realizándose dentro del Núcleo 0. La siguiente fase prepara los datos para enviarse a una interfaz gráfica (UI) embebida para su visualización en tiempo real con SSE. Por lo tanto, esta arquitectura determinista de doble núcleo permite ser usado en un sistema de adquisición de datos en aplicaciones dentro de la industria 4.0 conectando cualquier tipo de sensor.

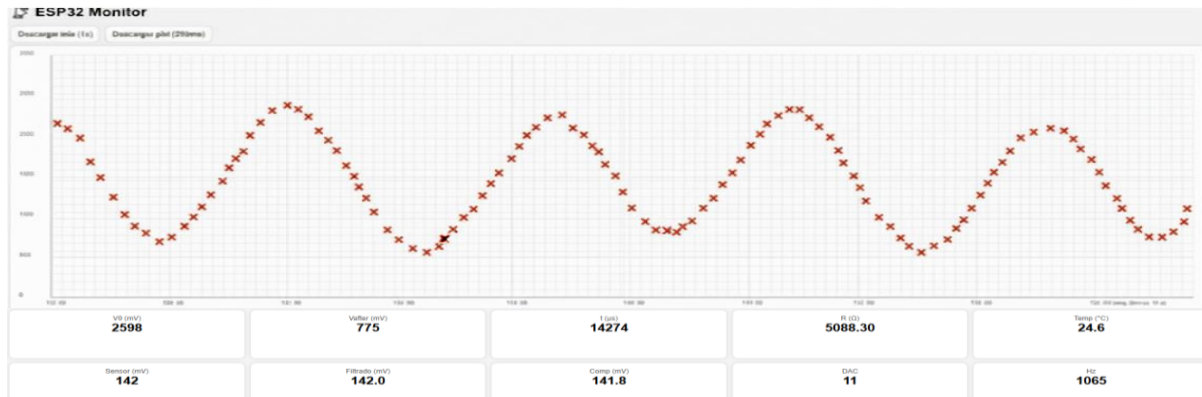


Figura 4. Interfaz WiFi remota con la que se monitorea el sistema de adquisición datos en tiempo real con varios parámetros de interés en el panel y en rojo se muestran los valores de lectura registrados del sensor analógico.

5. Agradecimientos

Agradecemos a Secihti por otorgar el número de beca 001797 para José Humberto Cabello Ávalos. Agradecimientos a CIDESI y al Posgrado de PICYT. Agradecimientos a la Gerencia de Microtecnologías y Semiconductores de la Dirección de Semiconductores y Electrónica. Agradecimiento a mis Directores de Tesis, al personal de Microtecnologías por el soporte en el laboratorio de cuarto limpio. Agradecimiento de Víctor Samuel Balderrama Vázquez a la Secihti dentro del marco de Investigadores por México, bajo el Proyecto No. 2, en cual se desarrolla este trabajo. Proyecto apoyado por la “Secihti” en el año 2025. Proyecto MADTEC-2025-M-96.

6. Referencias

- Adrian, M., Constantin, G., Girjob, C., Chicea, A. L., Maroşan, A., Girjob, C. E., Crenganiş, M., & Morariu, F. (2024). Real-Time Data Acquisition With Esp32 for Iot Applications Using Open-Source Mqtt Brokers. *Proceedings in Manufacturing Systems*: 61 – 68. <https://www.researchgate.net/publication/388464048>
- Arm, J., Baştán, O., Mihálik, O., & Bradác, Z. (2022). Measuring the Performance of FreeRTOS on ESP32 Multi-Core. *IFAC-PapersOnLine*, 55(4): 292 – 297. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.06.048>
- Ashwini M. S., Punith Kumar M. B., & Thejesh P. (2025). Design and Implementation of a Smart Industrial Gateway for CNC Machines Using ESP32-WROOM-32. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 12(4): 103 – 116. <https://doi.org/10.32628/ijrsrset251302>
- Babiuch, M., & Foltyniek, P. (2024). Benefits of Using Design Patterns on Microcontrollers in Implemented IoT Applications. *Sensors*, 24(23): <https://doi.org/10.3390/s24237803>
- Babiuch, M., Foltyniek, P., & Smutny, P. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *Proceedings of the 2019 20th International Carpathian Control Conference, ICC3 2019*. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765944>
- Babiuch, M., & Postulka, J. (2021). Smart Home Monitoring System Using ESP32 Microcontrollers. *Internet of Things*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94589>
- Chia, K. S. (2022). An Integration of Open-Source Resources in Distance Teaching for Real-Time Embedded System Using Arduino Microcontroller and Freertos. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(6): 194–205. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.06.017>
- Sistema De Adquisición Y Visualización Web De Datos En Tiempo Real Sobre Una Arquitectura Determinista De Doble Núcleo En ESP32

Espinosa-Gavira, M. J., Agüera-Pérez, A., Palomares-Salas, J. C., Sierra-Fernandez, J. M., Remigio-Carmona, P., & González de-La-Rosa, J. J. (2024). Characterization and Performance Evaluation of ESP32 for Real-time Synchronized Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 237(2022): 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.104>

Foltýnek, P., Babiuch, M., & Šuránek, P. (2019). Measurement and data processing from Internet of Things modules by dual-core application using ESP32 board. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 52(7–8): 970–984. <https://doi.org/10.1177/0020294019857748>

Gupta, S., Mamodiya, U., Hossain, A. K. M. Z., & Al-Gburi, A. J. A. (2025). A Framework for Bluetooth-Based Real-Time Audio Data Acquisition in Mobile Robotics. *Signals*, 6(3), 31. <https://doi.org/10.3390/signals6030031>

He, W., Baig, M. J. A., & Iqbal, M. T. (2024). An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition Architecture for Photovoltaic System Monitoring Using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. *Energies*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/en17102295>

Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*, 23(15). <https://doi.org/10.3390/s23156739>

Indriyani, Y. A., Efendi, R., Rustami, E., Rusmana, I., Anwar, S., Djajakirana, G., & Santosa, D. A. (2024). Affordable ESP32-based monitoring system for microbial fuel cells: real-time analysis and performance evaluation (ESP32-based data logger as a monitoring system for microbial fuel cell). *International Journal of Energy and Water Resources*, 8(2): 199–212. <https://doi.org/10.1007/s42108-023-00255-y>

Kalytko, A. (2023). A Computer System for Collecting Data on Temperature and Humidity on Premises. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 8(1): 17–24. <https://doi.org/10.23939/acps2023.01.017>

Lozada Contreras, J. D., & Bautista España, A. D. (2024). Sistema IoT para el monitoreo de variables ambientales en un ambiente laboral. *Revista Social Fronteriza*, 4(1): e41117. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(1\)117](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)117)

Manuhutu, F., Souisa, M., & Sapulete, S. M. (2025). Laboratory Model Landslide Monitoring System Using Internet of Things (Iot) Technology. *Indonesian Physical Review*, 8(2): 506–518. <https://doi.org/10.29303/ipr.v8i2.479>

Megantoro, P., Prastio, R. P., Kusuma, H. F. A., Abror, A., Vigneshwaran, P., Priambodo, D. F., & Alif, D. S. (2022). Instrumentation system for data acquisition and monitoring of hydroponic farming using ESP32 via Google Firebase. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(1): 52–61. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i1.pp52-61>

Oliveira, C. E. A., Avelar, T. A., Tinôco, I. de F. F., Coelho, A. L. de F., Sousa, F. C. de, & Barbari, M. (2025). Development and Validation of Data Acquisition System for Real-Time Thermal Environment Monitoring in Animal Facilities. *AgriEngineering*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020045>

Pineda-Tobón, D. M., Espinosa-Bedoya, A., & Branch-Bedoya, J. W. (2024). Aquality32: A low-cost, open-source air quality monitoring device leveraging the ESP32 and google platform. *HardwareX*, 20(November). <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00607>

Pratama, E. W., & Kiswantono, A. (2023). Electrical Analysis Using ESP-32 Module In Realtime. *JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences)*, 7(2): 1273–1284. <https://doi.org/10.54732/jeecs.v7i2.21>

Pratikto, Arman, M., Falahuddin, M. A., Pratama, R. A., Fitriani, R. Z., & Kuan, Y. Der. (2023). Temperature Data Acquisition System for Showcase Refrigerator Based on ESP32 and Online Remote Display. *Sensors and Materials*, 35(11): 3687–3696. <https://doi.org/10.18494/SAM4691>

Radia, M. A. A., Nimr, M. K. E., & Atlam, A. S. (2023). IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 6(November), 100348. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100348>

Schraven, M. H., Droste, K., Carducci, C. G. C., Müller, D., & Monti, A. (2022). Open-Source Internet of Things Gateways for Building Automation Applications. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/jsan11040074>

Sistema De Adquisición Y Visualización Web De Datos En Tiempo Real Sobre Una Arquitectura Determinista De Doble Núcleo En ESP32

- Septian, B., & Arkan, F. (2022). Freertos Based Air Quality Monitoring System Using Secure Internet of Things. *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*, 3(1): 147–153. <https://doi.org/10.20884/1.jutif.2022.3.1.172>
- Silveira, S. B., & Paravidino, F. (2025). Data Acquisition System with Arduino for Environmental Monitoring via Serial Interface and LCD Display. June. <https://www.researchgate.net/publication/393005374>
- Sugiarto, T. (2016). LabVIEW-Arduino Interfacing for Data Acquisition and Telemetry System. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3654.0568>. <https://www.researchgate.net/publication/299602749>
- Tran, V. K., Thai, B. T., Pham, H., Nguyen, V. K., & Nguyen, V. K. (2024). A Proposed Approach to Utilizing Esp32 Microcontroller for Data Acquisition. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(4): 474–488. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.4>
- Turkmanović, H., Karličić, M., Rajović, V., & Popović, I. (2023). High Performance Software Architectures for Remote High-Speed Data Acquisition. *Electronics (Switzerland)*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/electronics12204206>
- Urazayev, D., Eduard, A., Ahsan, M., & Zorbas, D. (2023). Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW. *SIST 2023 - 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings, May*. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223585>
- Zhang, J., Chen, J., Li, M., Ge, Y., Wang, T., Shan, P., & Mao, X. (2018). Design, fabrication, and implementation of an array-type MEMS piezoresistive intelligent pressure sensor system. *Micromachines*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/mi9030104>
- Zhang, K., & Lv, H. F. (2022). Design and implementation of energy consumption acquisition device based on ESP32. *Journal of Physics: Conference Series*, 2310(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2310/1/012035>

Tribología Inteligente Aplicada En El Proceso DED-LB, Para Predecir El Desgaste De Recubrimientos Base Cobalto Asociados Al Sector Metalmecánico

Viridiana Humarán-Sarmiento ^{1,2*}, Juan Manuel González-Carmona ², Enrique Martínez-Franco ², Ángel-Iván García-Moreno ²

¹ Instituto Tecnológico Superior de Guasave, Carretera a la Brecha S/N, Ej. Burrioncito, Guasave, Sinaloa, México.

² Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, 76125 Querétaro, México.

*viridiana.hs@guasave.tecnm.mx

Resumen. El desgaste de materiales en componentes críticos representa un problema económico y tecnológico relevante. Se estima que el 23 % del consumo energético mundial se origina en contactos tribológicos, de los cuales un 3 % corresponde a pérdidas asociadas al desgaste de materiales y al reemplazo de piezas. La Tribología inteligente es una nueva disciplina del conocimiento que permite predecir propiedades tribológicas como tasas de desgaste y coeficientes de fricción. De particular interés los recubrimientos fabricados por manufactura aditiva con la técnica de Deposición de Metal por Láser (DED-LB). Actualmente se trabaja con compuestos de matriz metálica MMC (Stellite 6 y WC-12Co) con diferentes aleaciones de interés para el sector aeronáutico, automotriz y metalmecánico. La implementación de metodologías de aprendizaje supervisado “Machine Learning” (ML) en ciencia e ingeniería de materiales permiten identificar patrones de características sobre fenómenos físicos y propiedades mecánicas, las cuales se almacenan en bases de datos para procesarlos y aprender de ellos para la toma de decisiones. Con el objetivo de obtener predicciones mayores al 85% de precisión, se realizaron pruebas experimentales para la obtención de datos térmicos y tribológicos para integrar conjuntos para entrenamiento con diferentes modelos de ML. Se presentan resultados de predicción para Stellite 6 a nivel escritorio con diferentes segmentaciones de datos. Los resultados muestran una precisión superior al 85 % para predicciones de tasa de desgaste y coeficiente de fricción considerando la métrica estadística del coeficiente de determinación R-cuadrado (R^2).

Palabras Clave: Tribología inteligente, Deposición Directa de Energía (DED-LB), “Machine Learning” (ML).

1. Introducción

La evolución de la industria se ha desarrollado fuertemente a lo largo de la historia, la inserción de tecnología a los procesos de manufactura aditiva (MA) de metales a nivel científico y tecnológico permiten la solución a las demandas de los productos requeridos por diversos sectores manufactureros de nivel nacional e internacional. De acuerdo con la clasificación de la ISO/ASTM 52900 (52900:2021(E), 2022), la Deposición de Energía Dirigida (DED-LB) es una técnica de MA que Tribología Inteligente Aplicada En El Proceso DED-LB, Para Predecir El Desgaste De Recubrimientos Base Cobalto Asociados Al Sector Metalmecánico

se caracteriza por depositar aleaciones de metales en polvo a través de una fuente láser para formar recubrimientos duros sobre sustratos de este u otro material para reparación o para incrementar la vida útil de piezas que están en constante desgaste o en condiciones de altas temperaturas.

La tribología estudia principalmente tres elementos involucrados en la interacción de dos superficies: fricción, desgaste y lubricación (Nian Yin, 2023) , y es hoy en día una ciencia que se enfoca de manera sistémica en lograr que desde la fabricación, hacer revestimientos de alto rendimiento en procesos industriales y contribuir a la reducción el consumo energético (Anitesh Kumar et al., 2022), (Teng Wu et al., 2022).

Por otro lado, la NIST (NIST, 2013), American Makes (Manufacturing, America Makes & ANSI Additive, 2017) y Wohles Report (Terry Wohlers et al., 2022), coinciden en integrar sistemas de predicción usando inteligencia artificial para contribuir en la eliminación de pruebas destructivas de los materiales.

Es aquí donde surge el concepto de Tribo-informática también denominada “*Intelligent Tribology*” en consecuencia de las ciencias basadas en datos para materiales complejos, cuyas características de la superficie cambian con el tiempo y el rápido desarrollo de nuevos métodos de análisis de *Big Data*, *Machine Learning*, así como redes neuronales artificiales entre otras (S. Hasan, M. Nosonovsky et al., 2022).

El trabajo presenta el proceso de tribología para la matriz base cobalto (Stellite 6/WC-12Co) con distintos parámetros de proceso de fabricación, la determinación de las pruebas de desgaste, y resultados de pruebas de escritorio con diferentes divisiones de datos para entrenamiento, pruebas y validación.

Planteamiento del problema

La manufactura aditiva mediante la técnica DED-LB enfrenta retos significativos relacionados con la calidad y confiabilidad de las piezas producidas, especialmente ante las crecientes demandas de sectores industriales y tecnológicos. Distintos organismos internacionales, como NIST y American Makes, han identificado limitaciones en el monitoreo *in-situ*, destacando la ausencia de sensores especializados, la baja resolución térmica y la incertidumbre en la medición de variables críticas durante el proceso. Estas limitaciones impactan de manera directa en la reproducibilidad de las piezas y, en consecuencia, en sus propiedades mecánicas y tribológicas.

En este contexto, la incorporación de técnicas de Inteligencia Artificial, particularmente el *Machine Learning*, ofrece una alternativa para predecir en tiempo real el comportamiento de los materiales y reducir la dependencia de pruebas experimentales costosas. Los compuestos de matriz metálica (MMCs) como Stellite 6 y WC-12Co, procesados por DED-LB, incorporan una mejora en el desempeño de recubrimientos, incrementando la vida útil de componentes en sectores como el aeronáutico, automotriz y metalmecánico. A nivel global, se prevé que el mercado de manufactura aditiva de metales compuestos crezca entre un 30 % y un 35 % anual en la próxima década, reflejando su impacto económico y tecnológico (SmarTech, 2019).

Bajo estas condiciones, se plantea como problemática central la necesidad de integrar sistemas de monitoreo *in-situ* con modelos predictivos basados en ML, capaces de anticipar propiedades tribológicas de los MMCs y contribuir al mejoramiento de procesos, reducción de costos y generación de conocimiento científico y tecnológico aplicable al contexto nacional e internacional.

1.2 Estado del arte

La técnica DED-LB ha despertado un interés creciente en la investigación debido a su versatilidad para la reparación de piezas desgastadas en sectores estratégicos como el automotriz, aeroespacial, petroquímico, agrícola y en la fabricación de moldes y troqueles (Blakey-Milner, B. et al., 2021), (Li, X et al., 2024), (Svetlizky, D. et al., 2022).

Entre los materiales empleados, el Stellite 6 se ha consolidado como aleación base en compuestos de matriz metálica (MMC) utilizados en recubrimientos, gracias a sus propiedades mecánicas y tribológicas. Aunque durante el proceso DED-LB presenta variaciones microestructurales asociadas a las altas temperaturas en cortos intervalos de tiempo, sigue siendo una opción confiable para la reparación de componentes. La adición de agentes reforzantes permite optimizar la distribución de carburos y disminuir la susceptibilidad al agrietamiento ocasionado por los elevados gradientes térmicos generados durante la deposición (Cui, Y. et al., 2022), (Ilanlou, M. et al., 2023), (Moradi, M. et al., 2020), (Moradi, M. et al., 2020b), (Pilehrood, S. H. et al., 2021), (Singh, J. et al., 2022).

Se han reportado aplicaciones tribológicas en recubrimientos a base de Stellite 6 combinados con refuerzos (Chen, L. et al., 2019) evaluaron recubrimientos autolubricantes conformados por Stellite 6, NbC y hBN depositados mediante DED-LB sobre acero Cr12MoV. Los resultados mostraron que la incorporación de estos refuerzos incrementó de forma significativa la resistencia al desgaste y redujo la fricción frente a un sustrato de 60Si2Mn sin recubrimiento. Dichos beneficios se atribuyen tanto a la formación de una microestructura homogénea y refinada como a la acción lubricante sólida del hBN durante el deslizamiento en seco. Los valores obtenidos de coeficiente de fricción oscilaron entre 0.422 y 0.613, con tasas de desgaste de $0-25 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, lo que posiciona a este tipo de recubrimientos como una alternativa prometedora para aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste y bajos coeficientes de fricción sin el uso de lubricantes líquidos.

La literatura reciente también refleja una transición hacia el uso de modelos numéricos y metodologías de inteligencia artificial en conjunto con las prácticas experimentales, con el fin de examinar el rendimiento de los componentes fabricados, incluyendo propiedades tribológicas (Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. , 2013). La incorporación de métodos estadísticos y computacionales avanzados ha dado lugar a un nuevo paradigma en el análisis de datos, donde se emplea la estadística inductiva para identificar patrones, relaciones no lineales y posibles efectos causales a partir de grandes volúmenes de información experimental. Este enfoque permite descubrir dependencias invisibles para las metodologías clásicas, aunque es importante señalar que las correlaciones identificadas no siempre implican causalidad (Paturi, U. M. R. et al., 2023).

En este marco, el aprendizaje automático (ML) ha cobrado relevancia como una herramienta idónea para la manufactura aditiva. Aunque el ML cuenta con varias décadas de desarrollo, sus aplicaciones en este campo son relativamente recientes y abarcan desde la optimización de parámetros de proceso y la predicción de propiedades, hasta la detección de defectos y la estimación de calidad (Meng, L. et al., 2020). Para atender la problemática de la repetibilidad y los defectos en piezas, diversos autores destacan la importancia de implementar sistemas de monitoreo *in-situ* y estrategias de control con retroalimentación (Mahmoud, D. et al., 2021). Los sensores modernos en técnicas como PBF-LB generan grandes cantidades de datos con alta dimensionalidad, lo que dificulta su análisis mediante métodos tradicionales. En este contexto, los algoritmos de ML permiten reconocer patrones y regularidades sin requerir programación explícita, consolidándose como una herramienta eficaz para el monitoreo *in-situ* y abriendo el camino hacia la Tribología Inteligente.

En estudios recientes sobre recubrimientos fabricados mediante manufactura aditiva, se han implementado algoritmos de ensamblado (*boosting*) como XGBoost (XGB) y LightGBM (LGBM) para predecir propiedades tribológicas. Un trabajo enfocado en recubrimientos obtenidos por WAAM comparó seis modelos: XGBoost, LightGBM, CatBoost, HistGBRT, NGBoost y AdaBoost. Los resultados evidenciaron que XGB y LGBM ofrecieron un desempeño predictivo sólido; sin embargo, el algoritmo Random Forest (RF) alcanzó la mayor precisión, con valores de ($R^2 = 0.90$) para el coeficiente de fricción y ($R^2 = 0.93$) para la fricción. El análisis de interpretabilidad mediante SHAP indicó que las variables de lubricación y carga tuvieron la mayor influencia en las predicciones (Alamoudi, T. et al., 2024).

Este nuevo enfoque integra la capacidad predictiva de la IA con la experimentación tribológica, lo que posibilita anticipar el comportamiento de recubrimientos y componentes fabricados por DED-LB. La Tribología Inteligente no solo contribuye a mejorar la comprensión de los fenómenos de desgaste y fricción, sino que también ofrece un impacto directo en la optimización de procesos, la disminución de costos y el aumento de la confiabilidad en sectores industriales de alto valor.

2. Metodología

El desarrollo del proyecto se realizó en diferentes etapas definidas por los procesos necesarios para las técnicas de caracterización, proceso de fabricación e implementación de ML. Se caracterizó el polvo (fluidez, medición del tamaño de partículas, morfología), posteriormente se fabricaron las mezclas con molienda de alta energía y se realizaron planes y diseños experimentales para las MMCs, esta información detallada se puede consultar en la publicación (V. Humarán- Sarmiento et al., 2024).

Se integró un sistema de monitoreo en la celda de manufactura con proceso DED-LB para obtener las temperaturas del proceso de fabricación de cordones y recubrimientos. En la figura 1 se muestra un esquema con la representación de pasos del enfoque de Tribología inteligente del proyecto con el sistema de adquisición y procesamiento de datos para realizar las predicciones.

Para el caso de estudio particular lo que se hizo fue la determinación de los ensayos de fricción y desgaste en recubrimientos a temperatura ambiente para aplicaciones metalmecánicas (ver tabla 1, (V. Humarán-Sarmiento et al., 2023). Los recubrimientos se depositaron con diferentes parámetros (potencia del láser (P), velocidad del robot (V) y velocidad de flujo másico (PFR)) de polvo metálico con base cobalto (*Stellite 6*) sobre sustrato SS304, la nomenclatura RA corresponde a 700 P, 4 V, 8 PFR; RB (820 P, 5 V, 10 PFR); RC (1000 P, 5 V, 9 PFR), RD (830 P, 6 V, 9.5 PFR) y se evaluaron tribológicamente con un ensayo recíprocante con una bola de zirconia de 5 mm.

Los índices de desgaste y de fricción a 5000, 12500 y 20000 ciclos, son los datos que servirán como datos de salida para entrenar un modelo de predicción mediante aprendizaje automático supervisado con los algoritmos “Random Forest” (RF), “Multilayer Perceptrón” (MLP), “XGBoost” (XGB) y “Light Gradient Boosting” (LGBM).

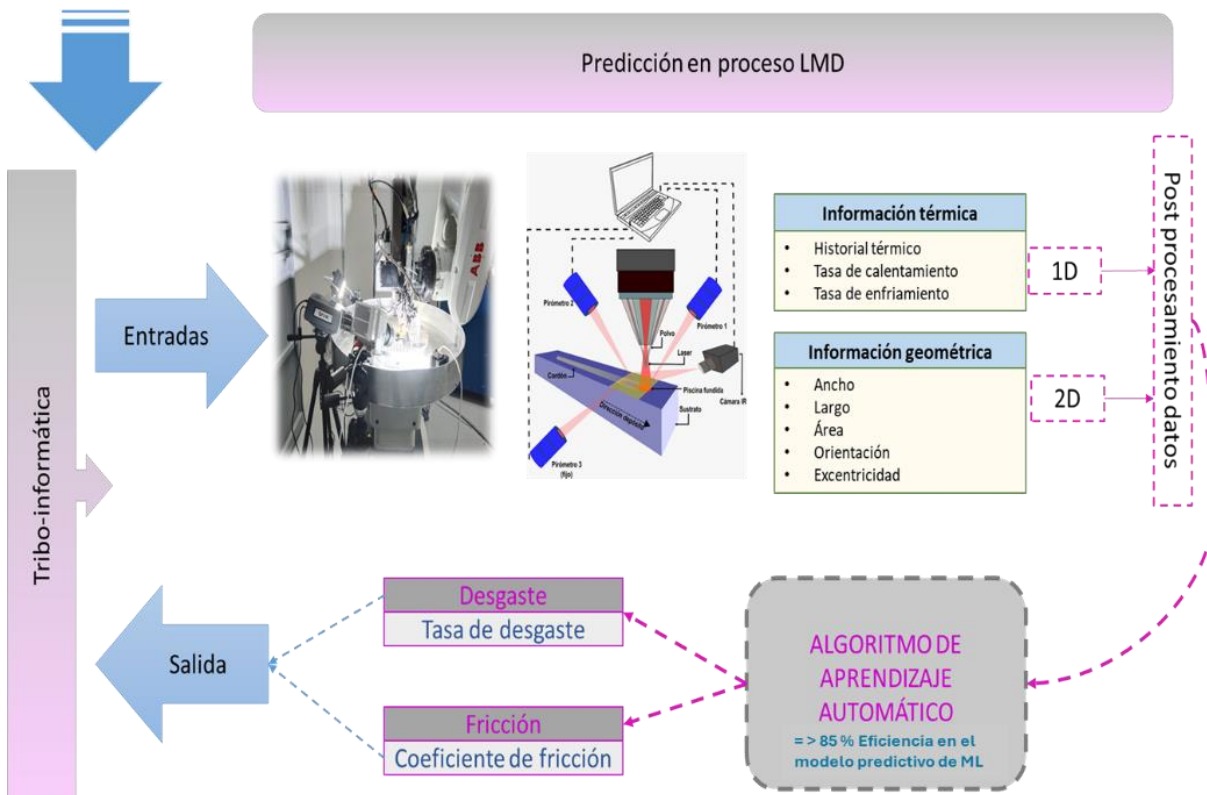


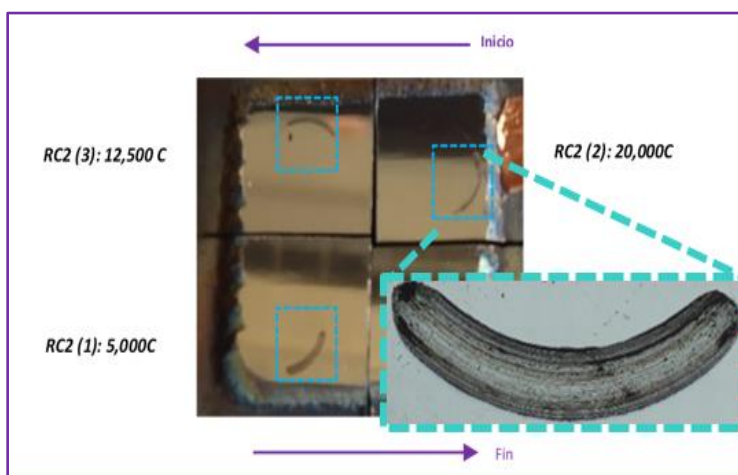
Figura 1. Representación de la metodología.

Tabla 1. Condiciones para estudio tribológico.

Parámetros	Valor
Carga	10 N
Esfuerzo de contacto	1648.7 Mpa
L1 (5000 Ciclos)	<i>Velocidad:</i> 1,3203 cm/s. <i>Distancia:</i> 42,03 m.
L2 (12500 Ciclos)	<i>Velocidad:</i> 1,3203 cm/s. <i>Distancia:</i> 105,07 m.
L3 (20000 Ciclos)	<i>Velocidad:</i> 1,3203 cm/s. <i>Distancia:</i> 167,55 m
Ángulo	80 °
Radio	3,01 mm
Frecuencia	1 Hz

3 Resultados

Considerando para esta publicación los resultados de tribología para Stellite 6, se observa una representación de las huellas de desgaste obtenidas en la figura 2 de la muestra RC con mejores resultados de parámetros de proceso DED-LB, y después de los ensayos de desgaste se realizaron mediciones del perfilómetro de la huella en 5 secciones transversales; se promediaron las áreas y se obtuvo el volumen desgastado respecto al trabajo realizado con la carga y la distancia para obtener las tasas de desgaste.

**Figura 2.** Muestra RC de Stellite 6 con pruebas de desgaste a 5,000, 12500 y 20000 ciclos.

En la figura 3 (b), figura 4 (d) y figura 5 (f), se observan las gráficas de barras de las tasas de desgaste obtenidas para 5000, 12500 y 20000 ciclos respectivamente de las muestras RA, RB, RC y RD donde se observan diferencias entre las tasas de desgaste para cada muestra a pesar de que son del mismo material (Stellite 6), se obtuvieron mayores tasas de desgaste (mayores a 6×10^{-5} (mm³/N*m)) a 5000 ciclos y mayor variación entre ellas, sin embargo conforme va aumentando el número de ciclos en 12500 por ejemplo se identifican menor variación entre las diferentes muestras y con valores de tasa de desgaste (mayores a 2×10^{-5} (mm³/N*m)), y para los 20000 ciclos en general son menores las tasas de desgaste (menores a 2×10^{-5} (mm³/N*m)), presentando mayor variación la muestra RB en todos los casos, esto se asocia a la menor potencia de láser utilizada y mayor tasa de flujo de polvo en el proceso, sin embargo de manera general se determinó que a los 20000 ciclos los resultados presentan menor desgaste y más estabilidad a pesar de tener variaciones de parámetros en las muestras utilizadas con el mismo material.

Con los datos obtenidos en el tribómetro se calculó la envolvente y los coeficientes de fricción se muestran en las figuras: 3 (a) 5000 ciclos, figura 4 (c) 12500 ciclos y figura 5 (e) 20000 ciclos. Los datos que se obtuvieron se compararon con lo reportado en la literatura (Anitesh Kumar et al., 2022), (Teng Wu et al., 2022), (Zhengfei Chen et al., 2019) y se comprobó que los valores obtenidos para COF se encuentran en los rangos reportados para 5000 ciclos (0.47-0.60), para 12500 ciclos (0.54-0.64) y para 20000 ciclos (0.51-0.62) y es para el COF donde la variación entre parámetros de proceso para cada muestra no es representativo para el coeficiente obtenido del mismo material. Estos valores se usaron como datos de salida para el dataset de entrenamiento que se definió para cada muestra por parámetro de proceso.

Los datos de entrada se calcularon a partir de los datos térmicos obtenidos del sistema de monitoreo compuesto por un par de pirómetros *Optris CT 2MH1* y un *Metis 3M22*, además una cámara infrarroja *FLIR A6751SC*. Los datos térmicos que se consideraron para este estudio son la tasa de enfriamiento, tasa de calentamiento e historial térmico de los recubrimientos y de los datos de la cámara FLIR se calcularon las características geométricas de la piscina fundida (ancho, largo, área, orientación y excentricidad). Los datos se normalizaron y se eliminaron valores atípicos, posteriormente se determinaron los hiper parámetros para cada una de las arquitecturas seleccionadas RF, MLP, XGB, LGBM (R. Cázares, et al., 2023).

Las métricas de validación calculadas fueron el coeficiente de determinación (R^2), error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (MSE). El objetivo es obtener tasas de precisión superiores al 0.85 de R^2 . Los resultados se muestran en la tabla 2 para tasa de desgaste, donde LGBM mostró tener el mejor desempeño con un valor de 0.88 con el 90% de datos para entrenamiento, y 0.83 con un 70% de datos de entrenamiento y el algoritmo XGB muestra un 0.87 de R^2 con un 80% de datos para entrenamiento. Este comportamiento se debe a que ambos modelos basados en *boosting* son más eficientes en la optimización de errores residuales y en el manejo de interacciones no lineales, lo que les permitió superar el desempeño de RF y MLP. En contraste, RF tiende a generar modelos más estables, pero menos sensibles a patrones complejos cuando los datos de entrenamiento son limitados, mientras que MLP requiere un ajuste más fino de hiperparámetros y una mayor cantidad de datos para evitar sobreajuste o sub-entrenamiento.

En la tabla 3 se observan los resultados para COF, donde se obtuvieron mejores resultados con los algoritmos LGBM con 0.92 con el 90 % de datos para entrenamiento, XGB con 0.93 con 80% de datos para entrenamiento, y LGBM con una precisión de 0.89 con 70 % de datos para entrenamiento. Es importante mencionar que estos resultados solo son para el *Stellite 6* y de los mejores valores obtenidos se harán las predicciones para las MMC, así como las validaciones *in-situ* como trabajo futuro. En este caso, LGBM y XGB superaron a RF y MLP porque su estructura basada en *boosting* les permitió adaptarse mejor a relaciones complejas y reducir el error de manera más eficiente.

En conjunto, los resultados para tasa de desgaste y coeficiente de fricción evidencian que los algoritmos LGBM y XGB fueron los más consistentes al mantener valores de (R^2) superiores al umbral de 0.85 en la mayoría de los escenarios evaluados. Su capacidad para ajustar de manera progresiva los errores y modelar interacciones complejas explica su mejor desempeño frente a RF y MLP, los cuales resultaron más dependientes de la cantidad de datos y de la optimización de hiperparámetros. Con ello, se establece que LGBM y XGB constituyen las opciones más confiables para realizar las predicciones y análisis posteriores en este estudio.

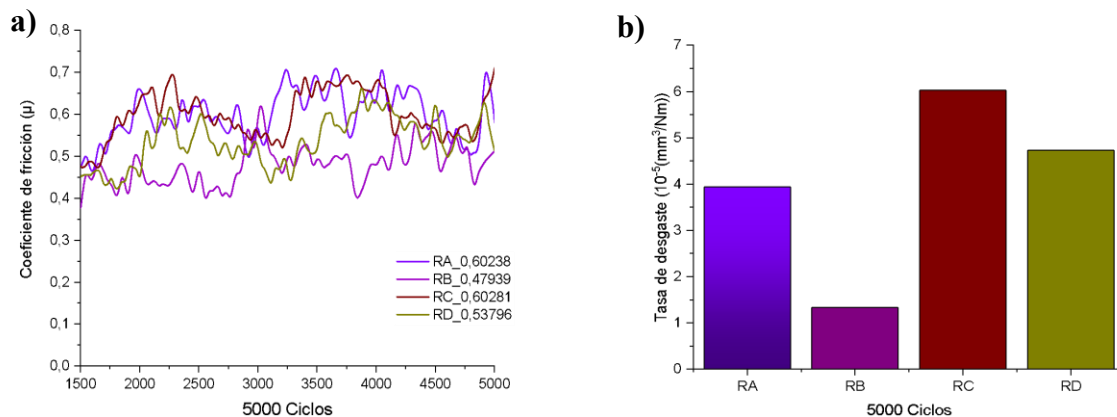


Figura 3. a) COF de 5000 ciclos de rayado para muestras RA, RB, RC, RD ; **b)** Tasa de desgaste de 5000 ciclos para muestras RA, RB, RC, RD.

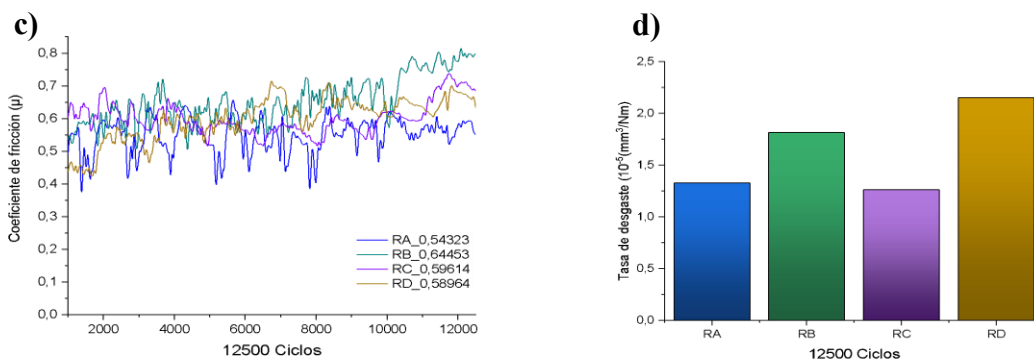


Figura 4. c) COF de 12500 ciclos de rayado para muestras RA, RB, RC, RD ; **d)** Tasa de desgaste de 12500 ciclos para muestras RA, RB, RC, RD.

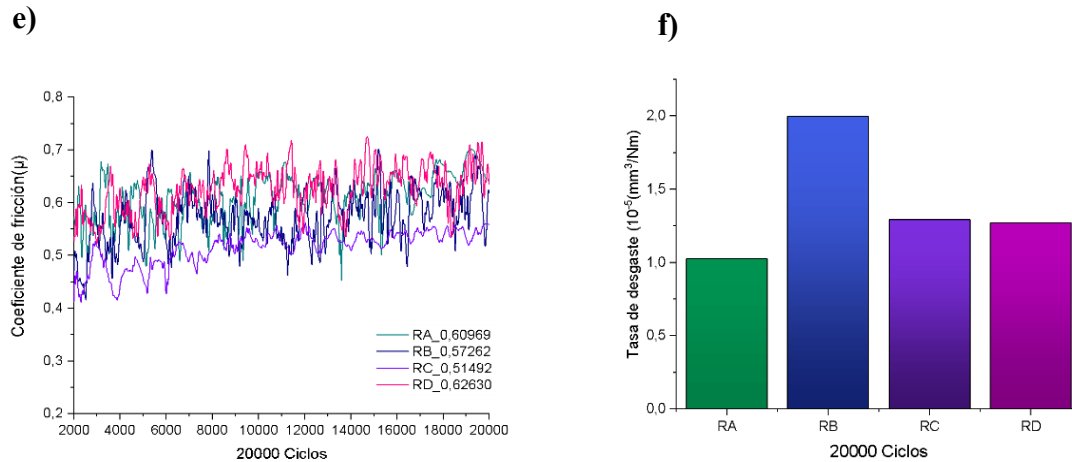


Figura 5. e) COF de 20000 ciclos de rayado para muestras RA, RB, RC, RD ; **f)** Tasa de desgaste de 20000 ciclos para muestras RA, RB, RC, RD.

Tabla 2. Valores de precisión obtenidos con los modelos ML para tasas de desgaste.

Predicción para tasa de desgaste de Stellite 6 con 90% entrenamiento, 5% pruebas, 5% validación			
Método	Métricas estadísticas		
ML	RMSE	MAE	R ²
RF	3,63E-06	6,51E-07	0,8036
MLP	2,89E-06	8,33E-07	0,8759
LGBM	4,31E-06	1,18E-06	0,8858
XGB	4,36E-06	1,04E-06	0,8833

Tabla 3. Valores de precisión obtenidos con los modelos ML para COF.

Predicción para coeficientes de fricción de Stellite 6 con 90% entrenamiento, 5% pruebas, 5% validación			
Método	Métricas estadísticas		
ML	RMSE	MAE	R ²
RF	0,0093	0,0021	0,8486
MLP	0,0072	0,0019	0,9088
LGBM	0,0083	0,0023	0,9207
XGB	0,0086	0,0017	0,9152

4 Conclusiones

Los COF presentan un comportamiento estable independientemente de los diferentes parámetros de proceso y número de ciclos, y están dentro del rango reportado por autores entre 0,4 y 0,8 (Anitesh Kumar et al., 2022), (Teng Wu et al., 2022), (Zhengfei Chen et al., 2019). En el resultado de predicción el algoritmo que mejor resultado da es el de LGBM y XGB valores mayores a 90 % para coeficientes de fricción. Se cumple con la hipótesis señalada en la figura 1 => 85% de precisión de acuerdo con el coeficiente de determinación R^2 .

Para las tasas de desgaste, los parámetros de proceso si muestran variación en los valores de desgaste obtenidos sobre todo para 5000 ciclos, y es debido a esa variación que los datos de entrenamiento que se utilizaron dan predicciones con valores mayores al 85 % de precisión para la tasa de desgaste, pero menores al 90 % de acuerdo con los valores del coeficiente de determinación R^2 a diferencia de los valores obtenidos para COF.

En términos de ciencia e ingeniería de materiales estas predicciones obtenidas contribuyen a identificar con la experimentación que parámetros de proceso de fabricación por DED-LB, variables térmicas y geométricas de la piscina fundida de manera integral permiten mapear las variables de respuesta como porcentaje de dilución y menor porosidad de los recubrimientos, así como el análisis de la microestructura asociadas a las altas temperaturas del proceso DED-LB, definir junto con las pruebas de tribología que variables de calidad deben optimizarse para tener por un lado recubrimientos con ciclos de vida mayores a los que se tienen con piezas convencionales o incluso piezas reparadas que en lugar de ser desechadas puedan seguir cumpliendo una función en piezas críticas, disminuyendo los costos e impactos ambientales por minimizar el reemplazo total de componentes además de reducir la fricción y el desgaste. Además, con el uso de inteligencia artificial, predecir durante el proceso las variables tribológicas permite ahorrar horas de pruebas, costos operativos y de mano de obra, por las pruebas tradicionales que se hacen en la actualidad, ya que puede predecirse con los avances de investigación en esta línea de tribología inteligente.

Es importante que el proceso de fabricación de los recubrimientos sea cuidadosamente ejecutado ya que la información térmica, geométrica y de proceso sean debidamente adquiridos con la fiabilidad y calidad de datos que permitan que los modelos de *machine learning*, sean más eficientes en cada una de sus etapas de entrenamiento, pruebas y validación, considerando que esta información presentada solo fue para pruebas de escritorio y es la base para las validaciones *in-situ*, así como la implementación y control de la tribología inteligente.

Referencias

- 52900:2021(E), I. (2022). Additive Manufacturing-General Principles-Fundamentals and Vocabulary. ©ISO/ASTM International.
- Alamoudi, T. et al. (2024). Machine learning approaches for predicting tribological properties of WAAM coatings: A comparative study. *Tribology International*, 194, 108996. doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.108996>
- Anitesh Kumar et al. (2022). An approach towards energy and material efficient additive manufacturing: Multi-objective optimization of stellite-6 deposition on SS304. (O. a. Technology, Ed.) doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107799>

Blakey-Milner, B. et al. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>

Chen, L. et al. (2019). Self-lubricating Stellite 6/NbC/hBN composite coatings fabricated by laser cladding on Cr12MoV steel. *Tribology International*, 138, 156–166. . *Tribology International*, 138, 156–166. . doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.038>

Cui, Y. et al. (2022). Microstructural evolution and mechanical properties of Stellite 6 coatings fabricated by laser cladding with carbide reinforcements. . *Surface & Coatings Technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128680>

Ilanlou, M. et al. (2023). Effect of carbide reinforcement on microstructure and properties of laser clad Stellite 6 coatings. . *Optics & Laser Technology*, 163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109333>

Li, X et al. (2024). Progress in laser-based directed energy deposition additive manufacturing: Fundamentals and applications. . *Journal of Manufacturing Processes*, 98, 729–746. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.019>

Mahmoud, D. et al. (2021). In-situ monitoring and control in laser powder bed fusion: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1060–1084. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.036>

Manufacturing, America Makes & ANSI Additive. (2017). Standardization Collaborative (AMSC). Version 1.0.

Meng, L. et al. (2020). Machine learning in additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 49, 1–14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.052>

Moradi, M. et al. (2020). Investigation of microstructure and wear resistance of WC reinforced Stellite 6 composite coatings fabricated by laser cladding. . *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3104–3115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.082>

Moradi, M. et al. (2020b). Effect of heat input on the characteristics of WC–Stellite 6 composites produced by laser cladding. . *Optics & Laser Technology*, 126, 106104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.106104>

Nian Yin, Z. X. (2023). Tribo-informatics approaches in tribology research: A review. *Friction*, 11, 1–22. Obtenido de Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0596-7>.

NIST. (2013). Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing. (C. M. Energetics Incorporated, Ed.) U.S.

Paturi, U. M. R. et al. (2023). Big data analytics and machine learning for materials science and engineering: A review. *Materials Today Communications*, 35, 105472. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105472>

Pilehrood, S. H. et al. (2021). Microstructural features and wear behavior of Stellite 6–WC composite coatings produced by laser cladding. . *Surface & Coatings Technology*, 421, 127430.

R. Cázares, et al. (2023). Prediction of coefficient of friction and wear rate of Stellite 6 coatings manufactured by LMD using Machine Learning. En S. b. (in-press), *Artificial Intelligence, Data Science and Applications-ICAISE '2023* (Vol. 1).

S. Hasan, M. Nosonovsky et al. (2022). “Triboinformatics Approach for Friction and Wear Prediction of Al-Graphite Composites Using Machine Learning Methods”. *Journal of Tribology*. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4050525>.

Singh, J. et al. (2022). Microstructure and mechanical properties of Stellite 6 based composite coatings developed by laser cladding: A review. *Surface Review and Letters*, 29(9), 2230006. doi:<https://doi.org/10.1142/S0218625X2>

SmarTech. (2019). La fabricación aditiva de metales compuestos puede alcanzar los 4.500 millones de dólares en 2024. Obtenido de Interempresas.net: <https://additivemanufacturingresearch.com/reports/bound-metal-additive-manufacturing-market/>

Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. . (2013). *Engineering tribology* (4th ed.). . Butterworth-Heinemann.

Svetlizky, D. et al (2022). Directed energy deposition additive manufacturing: Process fundamentals and applications. *Additive Manufacturing*, 54, 102774. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102774>

Tribología Inteligente Aplicada En El Proceso DED-LB, Para Predecir El Desgaste De Recubrimientos Base Cobalto Asociados Al Sector Metalmecánico

Teng Wu et al. (2022). Effect of Preheating Temperature on Geometry and Mechanical Properties of Laser Cladding-Based Stellite 6/WC Coating . (Materials, Ed.) doi:<https://doi.org/10.3390/ma15113952>

Terry Wohlers et al. (2022). Wohlers Report 2022. 3D Printing and Additive Manufacturing, Global State of the Industry. Washington, DC.: Technical Report, Wohlers Associates.

V. Humarán- Sarmiento et al. (2024). Directed energy deposition of stellite 6/WC-12co metal matrix composite. Surface and Coatings Technology. doi:10.1016/j.surfcoat.2024.131021

V. Humarán-Sarmiento et al. (2023). Tribological characterization of laser cladding deposited stellite 6 coatings. En T. BR, In Proceedings of the Fourth International Brazilian Conference on Tribology (págs. 50-51).

Zhengfei Chen et al. (2019). Microstructural evolution and wear behaviors of laser-clad Stellite 6/NbC/hBN self-lubricating coatings. Surface & Coatings Technology. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.083>.

Validación De Sistemas De Manufactura Reales Y Digitales Usando Técnicas Estadísticas

Angel Daniel Elizalde Vega^{1*}, Darío Bringas Posadas², Celso Eduardo Cruz González³, Hansell David Devilet Castellanos².

¹Posgrado interinstitucional CIDESI. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta 702-No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

²CIDESI. Dirección de ingeniería Especializada. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta 702-No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

³CIDESI-CENTA. Tecnologías Aeronáuticas. Aeropuerto Internacional de Querétaro. 76278 Colón, Querétaro

* a.elizalde@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen: El siguiente trabajo presenta la comparación de un robot de cinco grados de libertad (GDL) Dorna® 1 contra su gemelo digital en un ambiente desarrollado en PyBullet con el fin de conocer la exactitud de los movimientos que el robot virtual tiene con respecto al robot real. Con referencia al proceso de comparación se tomaron 2 técnicas estadísticas para determinar la similitud; *t de student* y *regresión Lineal*. Los resultados observados durante el desarrollo, sugieren que existe una concordancia física y virtual entre las 5 juntas del robot físico y su homónimo virtual con muestras virtuales que se asemejan un 98% a las muestras reales, demostrando la calidad de simulación física del ambiente virtual en PyBullet y su capacidad para recrear robots en el ambiente.

Palabras clave: Gemelo Digital, pruebas estadísticas, brazo robot, sistemas físicos robóticos, Simulación en Python

1.0 Introducción.

Los Gemelos Digitales (GD), son representaciones digitales o virtuales de un sistema físico que no necesariamente debe ser un robot. El sistema físico del que se basan, por lo general requiere de una recopilación de datos en tiempo real (8~11ms) para dar una respuesta en el momento, por lo que la representación digital del modelo debe recrear el movimiento del sistema con todo lo que esto implica. En síntesis, un GD es una representación virtual de un sistema u objeto físico que replica, simula, predice y proporciona análisis de datos de pronóstico a lo largo del ciclo de utilidad de la entidad física (Dihan, y otros, 2024).

En estudios recientes, se ha hecho notable la elaboración y creación de un GD dentro de la industria 4.0 (I4.0) como método confiable de configuración, experimentación y validación de componentes secuenciales dentro de Sistemas de Manufactura Reconfigurables (SMR); todo esto sin recurrir a reconfiguraciones de su sistema real promoviendo la configuración flexible del sistema pudiendo encontrar errores o áreas de oportunidad antes de implementarlo en la realidad.

(Artesi Muñoz & Orive Revilas , 2021), presentaron una tesis en que explica la integración de un GD a una línea robotizada. En dicho documento, se presenta de forma amigable la elaboración y programación (con Technomatix) del proceso de control que debe tener el robot y su interfaz HMI. También, en las partes finales del documento se explica que usa otro software de licencia para validar el DG, desarrollado antes de implementarlo en la célula en la que se basa.

(Bringas-Posadas, y otros, 2025), desarrollaron un GD de un sistema de manufactura a escala para fines de investigación a escala laboratorio crenado un ambiente de simulación con ayuda de CoppeliaSim® en el que se simularon las rutinas programadas del sistema de manufactura real para la obtención de datos y hacer un análisis paramétrico mediante técnicas estadísticas en (Bringas-Posadas, Trejo-Morales, Franco-Urquiza, & Cruz-González, 2025).

(Martínez Navarro, y otros, 2025), propusieron un GD incorporando realidad Aumentada (RA) para fines de investigación docente y estudiantil. Lo anterior, mediante el uso de software robusto (Unity o Unreal Engine) como motor gráfico y Robot Studio para efectos de movimientos de un robot ABB. Este trabajo, sugiere que el DG valida los componentes por separado teniendo en cuenta que cada componente (entorno de simulación, herramienta RA y movimiento del robot) son ejecutados en programas diferentes.

Como se puede deducirse de los párrafos anteriores, la validación en estos casos requiere de un programa externo o con licenciamiento para corroborar que su GD sea una representación fidedigna del sistema que desean recrear. En este contexto, este trabajo propone un proceso de validación de un GD mediante técnicas estadísticas. Las técnicas estadísticas propuestas, son la regresión lineal y la t de Student por su fácil acceso. El GD, que se va a validar es un robot de cinco grados de libertad (GDL) marca Dorna 1® tal cómo se expone en la siguiente referencia (DornaCAD, 2025). Cabe mencionar, que el ambiente del GD se programó y desarrollo en su totalidad mediante el uso del módulo de Python PyBullet.

2.0 Metodología para la comparación.

2.1 Configuración de GD de PyBullet.

Con la finalidad de configurar el GD para propiciar la manufactura digital, se digitalizó el brazo Dorna® que se expuso en el trabajo de (Bringas-Posadas, y otros, 2025). Para esto, se generaron los archivos de formato de descripción de robot unificado (URDF) con base en el ensamble que el fabricante proporciona desde su página oficial (DornaCAD, 2025). Con este robot cargado en el PyBullet, se hará una conexión mediante la interfaz gráfica previamente programada. Posteriormente, se carga un solo robot a la escena, luego se fija al espacio que hay dentro de PyBullet, así automáticamente el software lo interpretará y dará acceso a la pestaña de control, a las trayectorias y la visualización de escenario. Por lo que, con base en lo anterior, el GD quedara listo para modificar la trayectoria del robot.

2.2 Programación para obtención de datos.

Una vez conectado el robot, se asignó una trayectoria mediante la pestaña de “Control y Trayectorias” de 20 posiciones asemejando el movimiento a una rutina de Pick & Place, que se ejecutó continuamente durante 20min (sin interrupción externa de ninguna índole). Luego, se creó un script de Python para que registre los valores cada junta del robot real, al mismo tiempo que se estarán obteniendo las juntas que se le están asignando al robot digital. Finalmente, se generará un archivo delimitado por comas para su posterior interpretación. Las trayectorias planteadas en este trabajo se ilustran en la Figura 1.



Figura 1. Imagen de robot virtual que ilustra las 20 posiciones de la trayectoria.

2.3 Análisis de datos para comparación.

Una vez que los datos estuvieron disponibles (para su apertura e interpretación), se llevara a cabo las pruebas estadísticas para corroborar que los modelos real-digital son estadísticamente iguales y se pueda validar el GD con estas técnicas. La regresión lineal, se empleó como una técnica estadística para analizar la relación entre variables dependientes e independientes dentro del estudio. Este método, permitirá ajustar un modelo matemático que representa la tendencia de los datos y facilita la predicción de valores desconocidos a partir de la información disponible (Montgomery & Dauglas, 2022)

Por otro lado, para usar t de student debemos partir de lo siguiente; sean dos tratamientos con medias (μ_F y μ_D) y varianzas (σ_F^2 y σ_D^2), respectivamente para el robot físico y el robot digital. En este caso, interesa investigar si las medias de dichas posiciones pueden considerarse estadísticamente iguales y para ello se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_F = \mu_D \quad (1)$$

$$H_A: \mu_F \neq \mu_D \quad (2)$$

La Ecuación 1, expresa que las medias son iguales y por lo tanto estadísticamente iguales. En contraste, la Ecuación 2 expresa que las medias no son iguales y que se descarta la hipótesis. Para probar H_0 , se tomarán las muestras que la sección 2 describió de tamaño n_F para el robot físico y de tamaño n_D para el digital. Lo anterior, teniendo en cuenta la obtención de datos paralela ($n_F = n_D$), como el proceso sigue una distribución normal. El estadístico de prueba, adecuado para probar la hipótesis de igualdad de medias (Ecuación 1) se expresa en la Ecuación 3.

$$t_0 = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_F} + \frac{1}{n_D}}} \quad (3)$$

El estadístico de prueba, sigue la distribución t de student con $n_x + n_y - 2$ grados de libertad, donde S_p^2 estima la varianza muestra, como no conocemos las varianzas partimos de un supuesto de varianzas desconocidas iguales y la calculamos como (véase ecuación 4).

$$S_p^2 = \frac{(n_F - 1)S_F^2 + (n_D - 1)S_D^2}{n_F + n_D - 2} \quad (4)$$

Con base en el conocimiento de la estadística, es conocido de forma común que bajo el supuesto que $H_0: \mu_F = \mu_D$ se considera correcta. Por lo tanto, la prueba t se distribuye mediante $n - 1$ grados de libertad, generando un $100(1 - \alpha) \%$ de probabilidad que el valor de t_0 caiga entre $-t_{\alpha/2}$ y $t_{\alpha/2}$. En ese sentido, al generar un valor de t_0 fuera de estos límites, se evidencia que la H_0 no es correcta. En contraste, si la t_0 cae entre $-t_{\alpha/2}$ y $t_{\alpha/2}$ es evidencia a favor de la veracidad de H_0 ya que no existe ninguna contradicción (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2008).

3.0 Resultados.

3.1. GD generado por el PyBullet.

La escena de PyBullet para las pruebas de validación del GD, se cargó con un solo robot y se realizó la conexión con la interfaz del software como se muestra en la Figura 2.

Se procedió a enviar a su posición “Home” y se verificó que los sliders se posicionen en los ángulos correctos como nos muestra (Dorna Robotics, 2018) en su recopilatorio base acerca de la configuración del robot Dorna® 1. La Figura 3, muestra la secuencia de “home” del robot Dorna® y su GD.

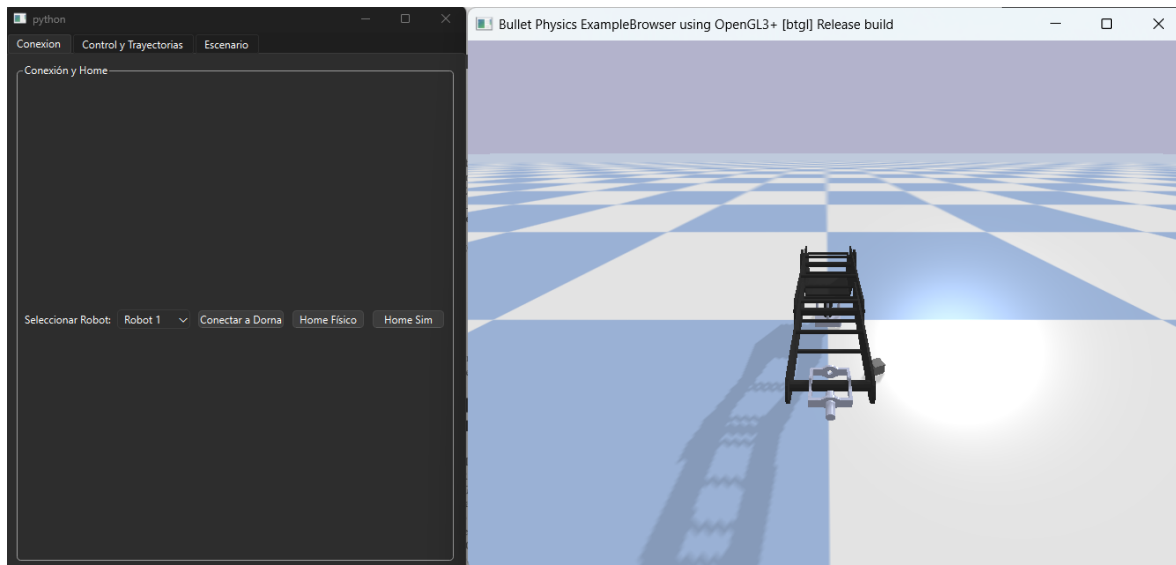


Figura 2. Ambiente virtual para la conexión a robot en PyBullet.

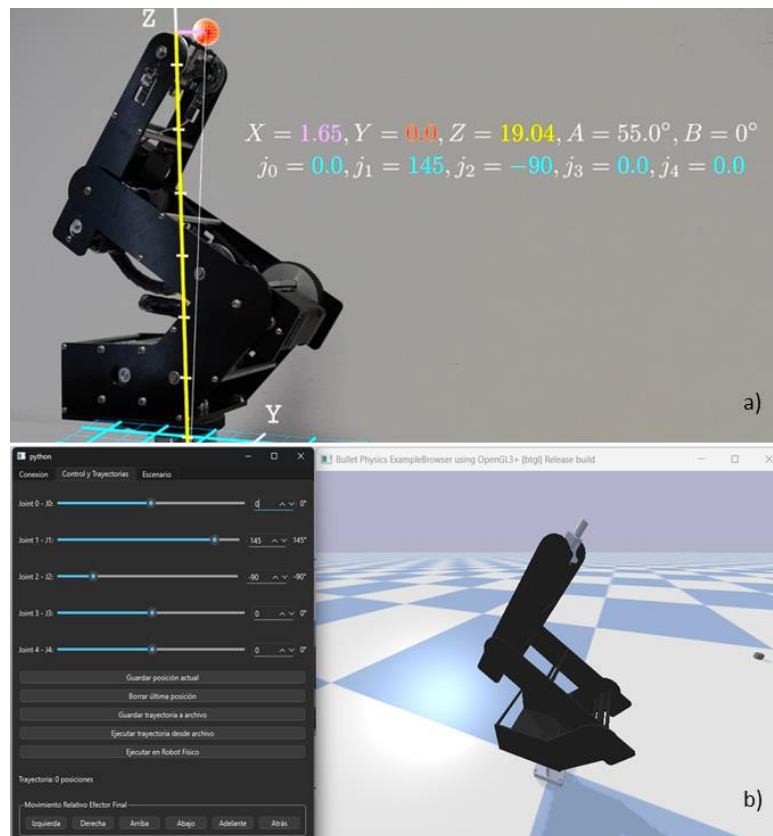


Figura 3. Posición Home del robot a) real proporcionada por Dorna, b) Home de robot Digital.

3.2. Datos obtenidos por trayectoria generada por brazo robot.

Para la programación de la trayectoria, se asignó en la pestaña de “Control y Trayectorias” el valor de los ángulos a cada slider para después ejecutar la trayectoria en ambos robots (Real y Digital). Lo anterior, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 12. Posiciones angulares para trayectoria del GD.

No. Posición	Asignación de ángulos a juntas (°)				
	J0	J1	J2	J3	J4
1	0	144	-90	0	0
2	0	90	-90	0	0
3	0	25	-90	0	0
4	60	71	-90	0	0
5	60	7	-90	0	0
6	59	91	-90	0	0
7	118	91	-29	0	0
8	118	55	-29	0	0
9	118	55	-29	46	0
10	118	28	-29	45	0
11	118	28	-29	71	0
12	118	28	-29	70	186
13	118	28	-29	69	0
14	118	28	-29	-1	0
15	-23	28	-29	-2	0
16	-22	28	-29	57	-138
17	-21	28	-29	0	-136
18	14	55	-55	0	-135
19	14	10	-55	0	-135
20	0	124	-85	0	-133

La trayectoria, se ejecutó devolviendo 6008 datos de posiciones para cada junta; así mismo el script logro recopilar información de como se muestra en el espacio en términos X, Y, Z y rotaciones guardadas en un archivo delimitado por comas (csv). Finalmente, se traspasó a un archivo de Excel para modificación y selección de datos. El esquema del movimiento con base a puntos para estas trayectorias se muestra en la Figura 4.

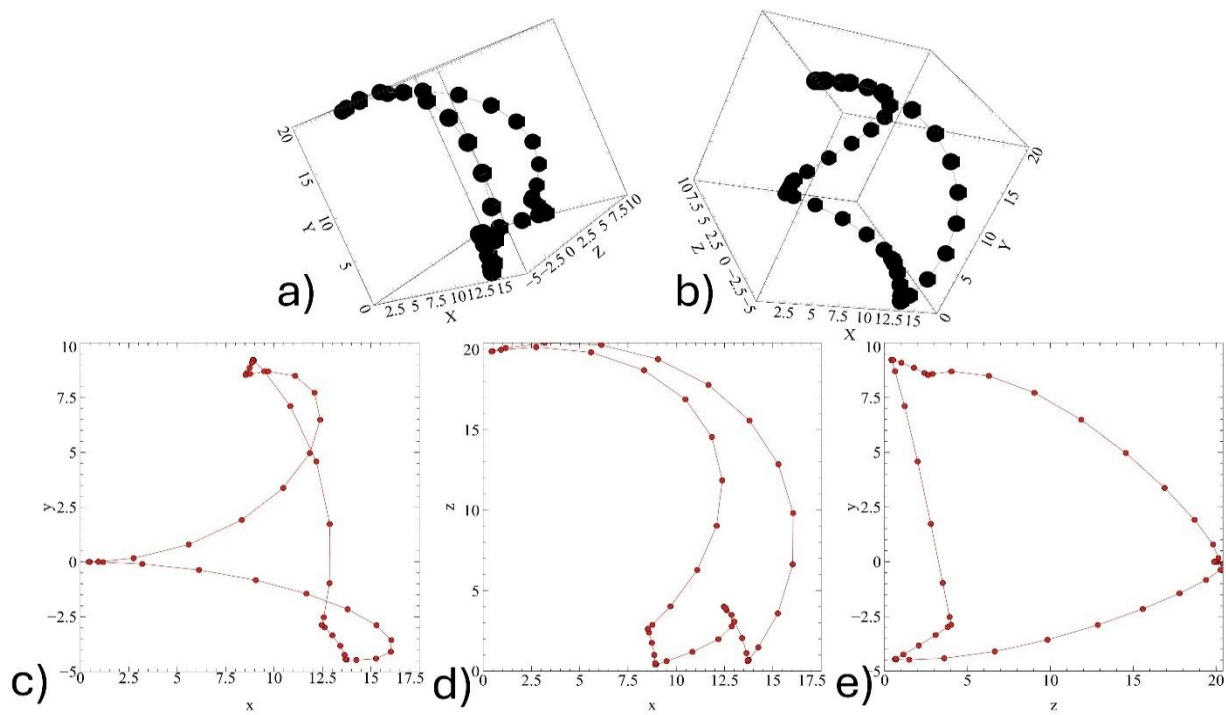


Figura 4. Trayectoria grafica con base a los puntos obtenidos del GD; a) Isométrica XYZ, b) isométrica izq. XYZ, c) plano X-Y, d) Plano X-Z, e) Plano Z-Y.

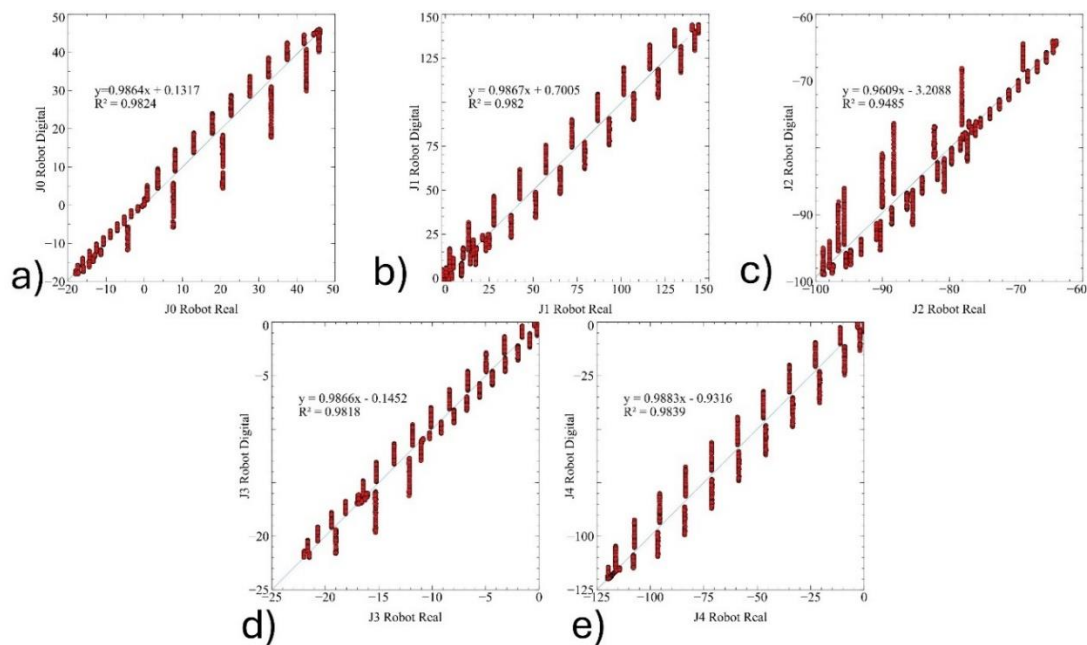


Figura 5. Gráficos de regresión lineal para las juntas que comparan las posiciones de las trayectorias entre el robot real y el digital con 6008 datos.

3.2 Resultados de los análisis de regresión y t de student.

Para la obtención de la regresión lineal, los datos de las trayectorias de la Tabla 1 se graficaron cada par de juntas (real vs digital) considerando para las cinco juntas (Joint). La Figura 5, muestra los gráficos obtenidos para las cinco juntas en para las trayectorias de la Tabla 1.

Como se puede apreciar, el coeficiente de correlación para cada par de juntas va por encima de 0.98, lo que quiere decir que los datos se ajustan un 98% a la línea de tendencia marcada en azul. Sin embargo, se pueden notar ciertos patrones en los datos de segmentos paralelos entre sí por lo que de los 6008 datos se tomaran datos de cada ciclo (loop) que corresponde a una corrida de la trayectoria. En la Figura 6, se muestran las gráficas de la trayectoria acotada a 48 datos (<1% de los datos obtenidos) donde se puede apreciar de mejor manera la linealidad que comparten ambas muestras. Cabe mencionar, que la diferencia entre los resultados es de $\approx 1.5\%$, lo cual se puede considerar poco significativo.

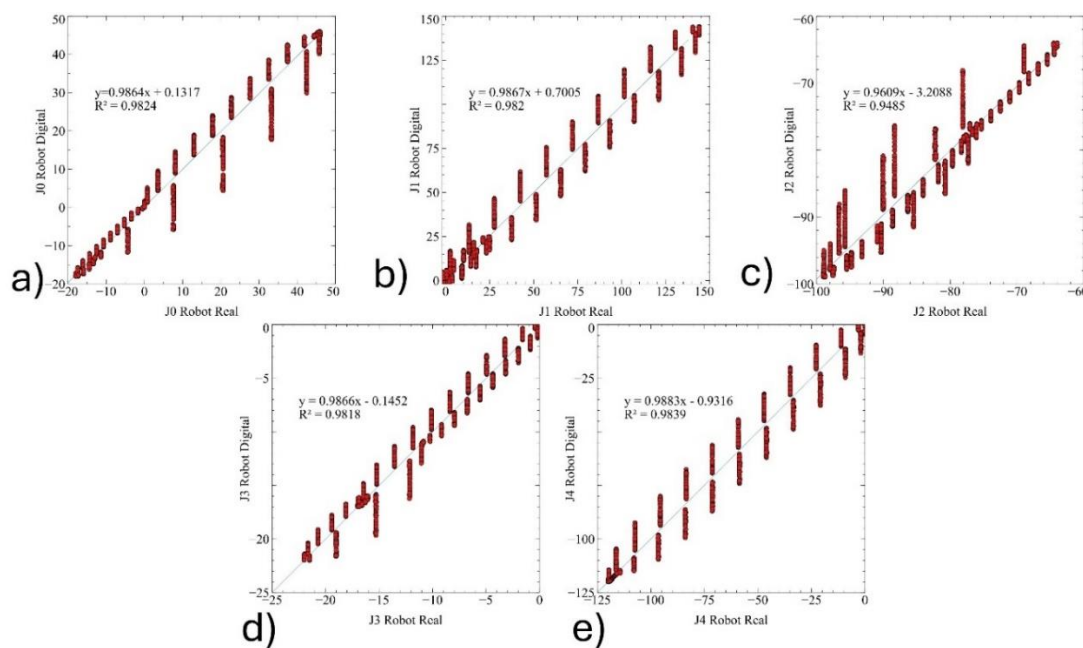


Figura 6. Gráficos de regresión lineal para las juntas que comparan las posiciones de las trayectorias entre el robot real y el digital con 6008 datos.

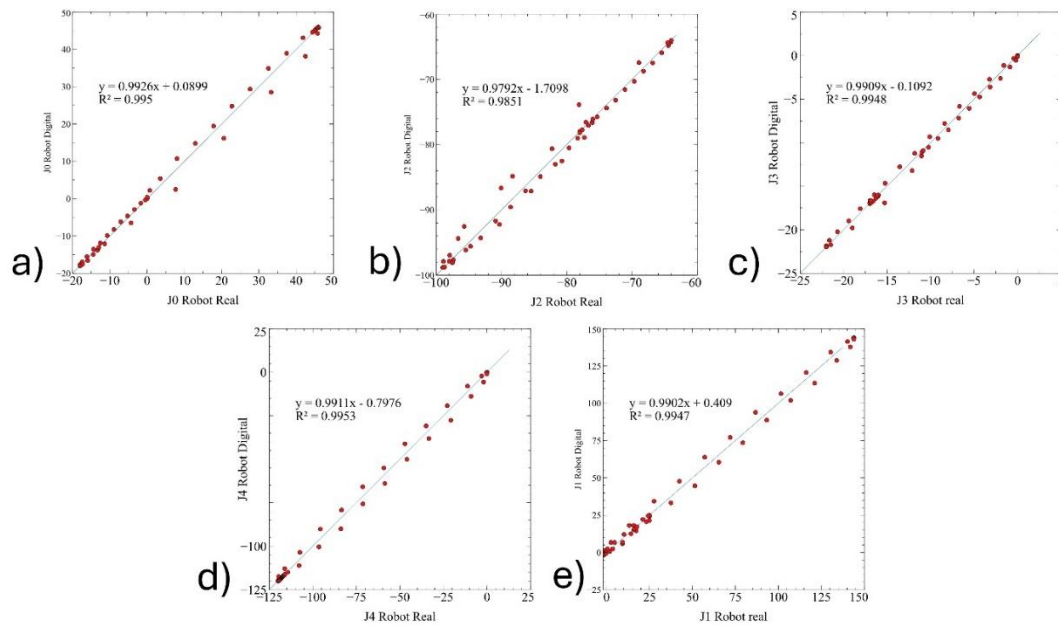


Figura 7. Gráficos de regresión lineal para las juntas que comparan las posiciones de las trayectorias entre el robot real y el digital con 48 datos.

Para la comparación con t de student, los 6008 datos recopilados que mediante las fórmulas explicadas en la sección 2.3 se evaluarán las hipótesis (ver Ecuaciones 1 y 2).

Tabla 13. Prueba t para cada par de muestras suponiendo varianzas desconocidas para todas las juntas.

Datos	Juntas Y valores (°)									
	J0- Real	J0- Digita l	J1- Real	J1- Digital	J2- Real	J2- Digita l	J3- Real	J3- Digit al	J4- Real	J4- Digital
Media	9.55	9.55	49.33	49.38	- 81.88	- 81.88	- 11.3 3	- 11.3 2	-82.67	-82.60
Varianza	560.1 5	554.7 6	2591. 32	2569. 41	121.4 8	118.2 5	48.6 6	48.2 4	1963. 42	1948. 96
Observacio nes	6008	6008	6008	6008	6008	6008	600 8	6008	6008	6008
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0		0		0	
Grados de libertad	12014		12014		12012		12014		12014	
Estadístico t	-0.00347		-0.05036		0.02561		-0.04975		-0.04662	

P(T≤t) dos colas	0.99723	0.95984	0.97957	0.96032	0.96282
Valor crítico de t (dos colas)	1.96016	1.96016	1.96016	1.96016	1.96016

Como se aprecia en la Tabla 2, cada par de juntas se calculó el valor de estadístico de t y las restricciones de la región de aceptación para la H_0 . Como es notorio, el estadístico t cae dentro del valor crítico por lo que se puede considerar una verosimilitud entre las medias de los movimientos. Adicionalmente, la Figura 7 muestra las gráficas de movimiento de las juntas durante la trayectoria de 20min donde se puede apreciar con claridad que la diferencia en movimientos entre el robot digital y el real es mínima.

4.0 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que estadísticamente el GD del robot Dorna 1® está dentro de la región de aceptación calculada $-1.96 \sim 1.96$ para todos los casos. Lo anterior, confirma la H_0 y con un valor P adicional de 0.97 en promedio que significa la probabilidad de obtener un valor t en cualquier caso. Si se considera ejemplo la primera junta ($t = -0.0034$) cuyo valor está dentro del intervalo de $-1.96 - 1.96$ y un valor $p \approx 1$ es posible sugerir una igualdad estadística entre el robot real y su GD. Además, los datos comparados con regresión lineal demuestran un ajuste con valores similares aproximando un promedio de 97.6% con los 6008 datos y 99.3% con 48 datos se puede suponer una diferencia no significativa al ser menor a 1.7%. Por lo tanto, ambas pruebas estadísticas sugieren una verosimilitud entre el robot real y su GD.

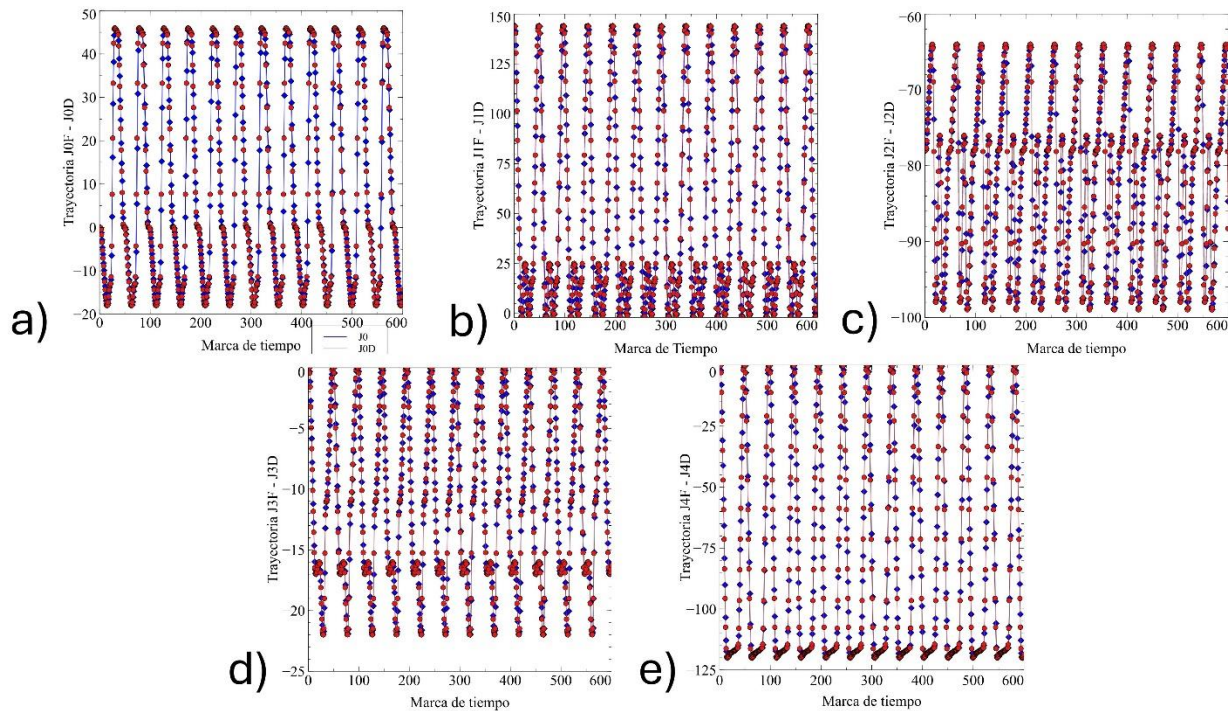


Figura 8. Gráficos comparativos del movimiento de las juntas a lo largo de los 20 min para cada par de juntas (Robot real vs Digital).

Agradecimientos

Agradezco a la SECIHTI por el apoyo recibido en mi beca de maestría, al CIDESI, a mis asesores y colegas por su apoyo.

Referencias.

(INEGI), I. N. (27 de Agosto de 2025). INEGI. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/>

Artesi Muñoz, I., & Orive Revilas, D. (22 de 11 de 2021). Diseño e implementación del gemelo digital de célula robotizada para entorno inteligente y validación con software in the loop (sil) distribuido. Máster Universitario en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica, 1-130. Bikantasun, Euskera, Spain: Universidad del País Vasco.

Bringas-Posadas, D., Devillet-Castellanos, H. D., Cruz-González, C. E., Vargas-Arista, B., Guzmán-Flores, I., & Franco-Urquiza, E. A. (2025). Development of a digital twin and lab-scale manufacturing system for production sequences planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136, 5515–5530.

Bringas-Posadas, D., Trejo-Morales, A., Franco-Urquiza, E. A., & Cruz-González, C. E. (2025). Exploratory statistical analysis for decision-making in a scaled manufacturing system of medical equipment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138, 555–568.

Dihan, M., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M., . . . Hasan, M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *CellPress*, 27.

Dorna Robotics. (7 de Diciembre de 2018). gitHuib. Obtenido de Dorna: <https://github.com/dorna-robotics/dorna/wiki/api>

DornaCAD. (25 de 07 de 2025). Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/19kcPUnuemhYqBeXViNxjs8llj91vV8vv/view>

Gobierno de México. (23 de marzo de 2020). gob. Obtenido de <https://www.gob.mx/salud/documentos/covid19-recomendaciones-para-la-poblacion>

Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). Analisis y Diseño de experimentos 2da Ed. McGrawHill.

Martínez Navarro, A., Cañadas, A. F., Pataro, I. M.-L., Hoyo, Á., Moreno, Ú., & José, C. (2025). Prototipo de gemelo digital de un robot manipulador con fines docentes. CEA, 1-6.

Montgomery, & Dauglas. (2022). Design and Analysis of Experiments, 9th Edition. St, Cahyono.

Declaración de responsabilidad

Las opiniones, análisis, resultados, interpretaciones y conclusiones presentadas en los trabajos incluidos en este volumen son exclusiva responsabilidad de sus autores. Su contenido no refleja necesariamente el punto de vista, posición institucional o política oficial del **Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)**, ni de los organizadores del congreso MIMETI 4.0.

El CIDESI y el comité editorial no asumen responsabilidad alguna por errores, omisiones o por el uso que pueda hacerse de la información contenida en los textos.

ISBN: 978-607-95615-2-9

