

2

Avances
en ingeniería

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería / Ángel Tlatelpa Becerro, Guillermo Raúl Carbajal Pérez, (coordinadores). - - Primera edición. - - México : Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2025.

187 páginas : ilustraciones .- - (Avances en ingeniería ; 2)

ISBN: 978-607-8951-74-1 serie

ISBN: 978-607-2646-32-2 volumen 2

1. Ingeniería – Investigación 2. Procesos de manufactura 3. Innovaciones tecnológicas – Investigación

LCC TA160

DC 620.0072

Esta publicación fue dictaminada por pares académicos bajo la modalidad doble ciego.

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería

Primera edición, agosto de 2025

D.R. 2025, Ángel Tlatelpa Becerro y Guillermo Raúl Carbajal Pérez (coords.).

D.R. 2025, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209.

Cuernavaca, Morelos, México.

publicaciones@uaem.mx

libros.uaem.mx

Colaboradores: Víctor Manuel Zezatti Flores, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Samuel Portillo Contreras, Miguel Ángel Chagolla Aranda, Vicente Noé Rojas Mendoza, Salvador Israel Avilés López, José Ernesto Pliego Sánchez, Judith Samantha García Oliván.

Corrección de textos y formación: Eliezer Cuesta Gómez.

Diseño de portada: Lizbeth Zenteno.

Imagen de portada: Freepick.

ISBN serie Avances en ingeniería: 978-607-8951-74-1

ISBN volumen 2: 978-607-2646-32-2

DOI: 10.30973/2025/avances_ingenieria_2

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Hecho en México

Contenido

Presentación	9
Inmersión del estudiante en la investigación <i>Ángel Tlatelpa Becerro, Judith Samantha García Oliván, Samuel Portillo Contreras, Miriam Navarrete Procopio, Víctor Zezatti Flores</i>	11
Aumento del rendimiento de sistemas fotovoltaicos a través de análisis de sensibilidad <i>Rodrigo José García Barrera, Víctor Cruz Morales</i>	23
Implementación de la metodología TPM en Translog Peninsular para mejorar el mantenimiento y la disponibilidad de vehículos <i>Juan Diego Ibarra Guadron</i>	31
Mejora de la eficiencia de producción en la planta 1 de Leoni Mérida mediante la implementación de un sistema de fabricación flexible para adaptarse a la demanda cambiante de Lucid <i>Enelda Nigenda Asseburg, Isis del Alba Schweminski Hernández</i>	39
Reconocimiento y manipulación de objetos con inteligencia artificial en un brazo robótico <i>Félix David Juárez Olivos, Samuel Contreras Portillo, Immer Custodio Bustamante Morales, Francisco Yael Castillo Tlapale, Isaí Sánchez Solís, José Jesús Venero Rodríguez</i>	45
Desarrollo de un prototipo experimental a escala laboratorio para el proceso de mezclado <i>Bethzayra Flores Silva, Miriam Navarrete Procopio, Erick Omar Castañeda Magadán, Víctor Zezatti Flores, Ángel Tlatelpa Becerro</i>	53

Experiencia y buenas prácticas en el diseño e implementación de tableros didácticos para el aprendizaje automatización y programación de PLC en educación superior	
<i>Samuel Portillo Contreras, María Fernanda Gonzaga Rosendo, Lizbeth Contreras Ortega</i>	63
Simulación de paneles fotovoltaicos: análisis térmico y eléctrico basado en techos fríos	
<i>H. Coello-Sánchez, M. A. Chagolla-Aranda, M. A. Solano-Maya, E. J. Moreno-Carpintero, E. Simá-Moo, S. López-Salazar</i>	73
Instrumentación y control de un intercambiador de tubos concéntricos para flujo paralelo y a contracorriente	
<i>Mauricio Mejía Zamora, Víctor Zezatti Flores, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Ángel Tlatelpa Becerro</i>	83
Sistema de navegación autónoma de robots móviles terrestres basado en visión computacional aérea	
<i>Antonio Isaías Martínez Santos, Héctor Miguel Buenabad Arias, Roberto Alan Beltrán Vargas, Miguel Ángel Basurto Pensado, José Antonio Marbán Salgado, Jorge Arturo Sandoval Espino, Diego Hernández Cabrera</i>	93
Evaluación termodinámica de un ciclo Rankine orgánico acoplado a colectores Fresnel para producción de 1 kW de electricidad y de calor para procesos	
<i>O. A. Jaramillo, Laura Castro, J. C. García, Agustín Moisés Alcaraz-Calderón</i>	103
Análisis de parámetros operativos para la demostración de cavitación en un equipo experimental	
<i>Alan Gonzales Ramos, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Víctor Zezatti Flores, Ángel Tlatelpa Becerro</i>	115

Experiencias en el desarrollo, programación y construcción de un cortador láser	
<i>Grecia Minerva Barona Paz, Jimena Castrejon Neri, Ángel David Díaz Damián, Samuel Portillo Contreras</i>	127
Adquisición y clasificación de señales	
<i>José Ernesto Pliego Sánchez, Demian Flores Sánchez, Misael Méndez Garnelo</i>	139
El papel fundamental de las matemáticas en la formación del ingeniero: aplicaciones y beneficios desde la perspectiva del estudiante	
<i>Hannie Valeria Ramírez Salazar, Eros Arturo García Acosta, Samuel Portillo Contreras</i>	147
Implementation of a proportional-integral control system for a hybrid solar-biomass food dryer with thermal energy storage, evaluating Thermodynamic variables	
<i>Arly Darío Rincón Quintero, Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez, Omar Lengerke Pérez</i>	155
Electromyographic signal analysis for classifying wrist movements: a cepstrum and case-based reasoning approach	
<i>Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez, Diana María Reyes Bravo, Omar Lengerke, Arly Darío Rincón Quintero, Andrés Felipe Jiménez Quezada</i>	173
Conclusión	187

Agradecimientos

A la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EES-Yecapixtla), que ha creado de manera consecutiva espacios mediante congresos (2022, 2023, 2024) en el ámbito de la ingeniería para conocer los avances científicos y tecnológicos, así como para fomentar el intercambio de experiencias entre la comunidad estudiantil, académicos y científicos. Estas experiencias refuerzan, con un enfoque práctico, a la EES-Yecapixtla, ofreciendo importantes actividades para toda la comunidad, como la realización del presente libro, que ha sido elaborado a partir del Cuarto Congreso de Ingeniería llevado a cabo en abril de 2025.

Presentación

Para la comunidad científica y tecnológica es importante mantenerse actualizados de los avances en cada una de las ramas de la ingeniería. Desde el sector académico hasta el sector industrial se reportan los avances tecnológicos a través de escritos especializados. Con este libro se pretende fomentar las vocaciones científicas y tecnológicas de los estudiantes de ingeniería, quienes podrán ver las aplicaciones multidisciplinarias en los sistemas y procesos industriales, además de que los investigadores y tecnólogos accederán a nuevos paradigmas en el ámbito de la ciencia y de la ingeniería.

En estos tiempos, un paradigma en ingeniería es diseñar y optimizar soluciones tecnológicas con enfoque sustentable. La enseñanza de la ingeniería tiene que contar con esta trazabilidad de desarrollos sustentables. Este libro presenta diecisiete trabajos de investigación, enfocados en el diseño, instrumentación, control, automatización, programación, optimización y análisis de datos para diferentes equipos, sistemas y procesos. Se presentan estudios de casos reales, construcción de prototipos y detalles para la implementación de las tecnologías.

Inmersión del estudiante en la investigación

Ángel Tlatelpa Becerro,^{a*} Judith Samantha García
Oliván,^a Samuel Portillo Contreras,^a Miriam
Navarrete Procopio,^b Víctor Zezatti Flores^c

Resumen

Este trabajo presenta la importancia de la investigación como parte de la inmersión de los estudiantes del programa educativo (PE) de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla-UAEM. La investigación ha sido parte fundamental en la formación del estudiante a lo largo de su carrera académica para desarrollar los tres tipos de competencias básicas, genéricas y laborales. El profesorado ha jugado un papel crucial en este proceso, actuando como asesores de residencias profesionales y directores de tesis. Han guiado a los estudiantes en la identificación de temas de investigación y el desarrollo colaborativo de proyectos. Como resultado, los estudiantes han cultivado con éxito un perfil caracterizado por la capacidad de diseñar, modelar y construir dentro de su dominio de ingeniería. Esto ha llevado a la creación de carteles y artículos de investigación, que han sido presentados y publicados en actas de congresos nacionales e internacionales, además de en capítulos de libros. Este modelo puede ser extendido a otras unidades académicas de la UAEM para incentivar a los estudiantes de ingeniería de nivel superior a involucrarse en proyectos de investigación, potenciando así sus competencias y habilidades acordes a sus perfiles.

Palabras clave: rol del docente, rol del estudiante, investigación académica.

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.

^c Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

* Autor de correspondencia: angel.tlatelpa@uaem.mx

Abstract

This work presents the importance of research as part of the immersion of students in the Educational Program of Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla-UAEM. Research has been a fundamental part of the student's training throughout their academic career to develop the three types of basic, generic, and labor competencies. The faculty has played a crucial role in this process, serving as advisors for Professional Residencies and Thesis directors. They have guided students in identifying research topics and collaboratively developing projects. As a result, students have successfully cultivated a profile characterized by the ability to design, model, and construct within their engineering domain. This has led to creating posters and research articles, which have been presented and published in national and international conference proceedings and book chapters. This model can be extended to other academic units of UAEM, encouraging higher-level engineering students to engage in research projects, thereby enhancing their competencies and skills according to their profiles.

Keywords: Role of the teacher, role of the student, academic research.

Introducción

En la actualidad, hablar de investigación ha sido un tema muy importante e interesante en la comunidad universitaria de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EES-Yecapixtla) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) desde que vivimos la situación de pandemia en 2020. Hoy, más que nunca, al contar con una cultura científica sólida, estudiantes y docentes profesionales para hacer frente a cualquier situación académica, este tópico resulta de gran importancia. La investigación es una herramienta didáctica y muy valiosa para el fortalecimiento en el proceso de aprendizaje; esta tiene como objetivo la búsqueda y generación del conocimiento y la solución de problemas prácticos; se puede definir como el conjunto de procesos empíricos, críticos y sistémicos para el estudio y análisis de un problema o fenómeno y

dar solución a estos (Sampieri et al., 2014). Sin embargo, en el proceso se debe tomar en consideración y rigurosamente las diferentes etapas, sin prescindir de ninguna de ellas.

Por otro lado, el propósito de la investigación en la educación es mejorar el proceso educativo que promueve la posibilidad de nuevos caminos en el aula con un aprendizaje integral para la “persona en formación” (Modelo universitario [MU]). El cual le permite a dicha persona obtener información de varias fuentes para la comprensión del mundo, con orientación durante su formación académica, que les posibilitará construir criterios y argumentos en el conocimiento (Aparicio-Gómez & Abadía-García, 2019). Además, al aplicar la investigación en el proceso de enseñanza-aprendizaje, docentes y estudiantes adquieren beneficios, competencias y habilidades organizacionales al percibir con facilidad sus conocimientos, contar con recursos didácticos y la producción académica. En efecto, la importancia del docente en la investigación es de suma importancia, puesto que, si la usa en su práctica educativa, mejora el proceso de enseñanza-aprendizaje. De lo contrario, cuando no se cuente con el interés de implementar en el aula la investigación, encaminará a interrumpir y obstaculizar un aprendizaje integral para la comunidad estudiantil.

En este trabajo de investigación, se presenta cómo las personas en formación del programa educativo (PE) de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial han logrado incursionar y sumergirse en el área de la investigación, tener éxito al colaborar o publicar sus trabajos de investigación, como parte de su proceso de formación; además que han fortalecido sus habilidades y competencias que, día tras día, contribuyen en su formación académica.

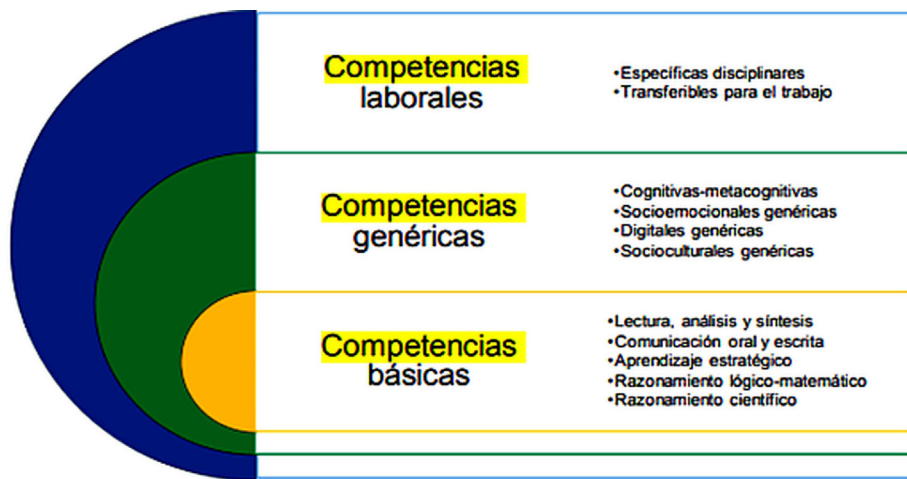
Desarrollo

El estudiante ha participado en actividades de formación integral y académicas dentro del PE en los tres ciclos, básico, profesional y especializado. Sin embargo, una de estas actividades es el servicio social, en el cual el estudiante tiene la oportunidad de desenvolverse con actividades propias, tal como la elaboración

de reportes e informes, organización de la información y apoyo al profesorado en proyectos propios del área profesional.

En cambio, el área académica, sin demeritar la formación integral, juega un papel importante en el desarrollo profesional del estudiante debido a las múltiples actividades que permiten a la persona en formación desarrollar temas de investigación, tal como lo establece el MU. Cada una de las estrategias son propuestas por el profesorado en las planeaciones de cada una de las unidades de aprendizaje para los tres ciclos antes descritos en la trayectoria del estudiante o, en su caso, por el asesor de residencia profesional, como parte de las habilidades y aprendizajes que deben adquirir de acuerdo con el PE (Programa educativo: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, 2017; Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, 2024). Por tal motivo y según el MU, el profesorado contribuye a desarrollar las competencias del estudiante (Figura 1), desde las básicas y genéricas hasta laborales, mismas que han brindado fortaleza al proceso de investigación donde el estudiante ha participado, en estudios de caso, desarrollo de prototipos y modelos matemáticos planteados desde las aulas a través del modelo basado en problemas (MU, 2022). Con todo, se genera conocimiento y producción científica.

Figura 1. Competencias en el MU (2022, p. 44)



De este modo, la importancia de la investigación ha sido sustantiva (Figura 2) dentro de las funciones universitarias, como lo marca el MU (2022), además que de gran relevancia como generadora de conocimientos en la que, el estudiante universitario, desde las aulas, se hace preguntas problematizadas, generadoras o detonadoras de incógnitas a las que, con todo entusiasmo y con la guía del profesorado, buscan estrategias para la solución de problemas.

Figura 2. Dimensiones del MU (2022)



En este contexto, el estudiante hace la búsqueda de información entre distintas fuentes para extraer información verídica y sustancial que le permita comprender, analizar y sintetizar conceptos, leyes y teoremas en ciencia de las matemáticas y de la física; así como técnicas y métodos para la solución de problemas ingenieriles tanto teóricos como de aplicación. Así, el estudiante ha iniciado con la generación del conocimiento con base en la investigación para su proceso de formación.

Las actividades que el estudiante desarrolla son prácticas de laboratorio y proyectos de investigación. Las prácticas de laboratorio se llevan a cabo para ejecutar los conocimientos adquiridos con la guía de un manual y del profesorado. Sin embargo, en proyectos de investigación, el profesorado o asesor proponen temas relevantes para que se desenvuelvan de manera teórica o, en su caso, con el desarrollo de prototipos como aplicaciones dentro del campo de la ingeniería; además del uso en conjunto de técnicas y métodos, materiales, dispositivos, equipos o máquinas para lograr el objetivo. Cada uno de los proyectos que desarrollan los estudiantes se obtienen en el aula, en la residencia profesional,

a través de un proyecto ejecutivo o de investigación que puede culminar en el desarrollo de una tesis. Dichos proyectos se elaboran con una estructura definida por la Academia de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial con los siguientes rasgos: el problema a resolver; la justificación; objetivos; métodos y materiales; resultados, conclusiones, bibliografía y anexos. Como consecuencia, elaboran carteles y artículos de investigación que se publican en congresos nacionales e internacionales, o en capítulos de libros, tal como se muestra en la sección de resultados.

Resultados

La investigación ha sido parte fundamental en PE de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, puesto que ha contribuido en la generación del conocimiento a través del desarrollo de proyectos. Estos han surgido en el aula o en la residencia profesional con temas propuestos por el profesorado, la industria, en alguna otra institución y centros de investigación; incluso temas por el estudiante que proponen soluciones y hasta el desarrollo de prototipos.

A continuación, se mencionan algunos trabajos que van desde tesis, presentación de carteles, hasta capítulos en libros o artículos de investigación, que los estudiantes han desarrollado en conjunto con profesores de la institución. Uno de los casos de éxito son los desarrollos de proyectos por residencia profesional que fueron parte para el desarrollo de las tesis de Amaro Barranco (2022), Barrera Díaz (2002), Castro Alcantar (2022) y García Luna (2022). Los temas constituyeron los siguientes: “Secado de nanche y guaje usando un secador solar indirecto de flujo forzado”, “Cinética de secado de cecina usando un secador solar indirecto”, Instrumentación electrónica de una chimenea solar y Modelación matemática de una chimenea solar para el análisis del rendimiento térmico”. Estas investigaciones contribuyeron en la solución de trabajos inéditos.

Asimismo, se puede dar a conocer que otros autores han publicado artículos en memorias de congresos internacionales de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Los estudiantes han colaborado en el desarrollo de proyectos, incluso en la escritura de estos, tal como se presentan las siguientes publicaciones:

“Simulación numérica de una chimenea solar vertical con tres canales de flujo de aire” (Tlatelpa-Becerro, Rico-Martínez, Reynoso-Jardón et al. 2019), “Predicción de temperatura y humedad usando redes neuronales artificiales en un secador solar indirecto experimental” (Tlatelpa-Becerro, Rico-Martínez, Urquiza et al., 2020) y “Simulación numérica computacional del cilindro de una extrusora” (Tlatelpa-Becerro, Alarcón-Hernández et al., 2021). Cabe mencionar que algunos estudiantes involucrados en estas actividades de investigación han sido ponentes. También han participado en otros congresos, como en el Primer Encuentro Nacional de Secado y Cocción Solar de Alimentos, con la elaboración de un cartel de investigación del tema *Secador solar con redes neuronales artificiales* (Tlatelpa-Becerro, Calderón et al., 2019), con el artículo *Cinética de secado de capa fina para un secador solar indirecto* (Luyando et al., 2020) y la *Aplicación de las redes neuronales artificiales para la predicción de temperaturas y humedades en un secador solar* (Tlatelpa-Becerro, Alarcón-Hernández et al., 2021); así como en el 3er Congreso Nacional de Secado, Cocción y Refrigeración Solar de Alimentos con la presentación del tema *Cinética de secado de cecina con flujo forzado de aire*. Igualmente, se destaca la participación del estudiantado con el capítulo “Simulación numérica computacional de una habitación con fines de confort térmico con tuberías de verano” (pp. 70-82) del libro *Compilación de investigaciones de ingeniería, humanidades y ciencias de la conducta*.

Por otro lado, y como parte fundamental, en los últimos tres años, la EES-Yecapixtla ha incursionado en la organización de congresos de ingeniería con el objetivo de crear un espacio para compartir experiencias y dar a conocer el avance científico, tecnológico e innovador en esta área a través de ponentes de la industria e investigación, así como la interacción de estudiantes de ingeniería con profesionistas de sus diferentes disciplinas. Esto ha permitido que el profesorado, en colaboración con las personas en formación, continúe desarrollando proyectos y, por ende, la obtención de una productividad académica reflejada en artículos y carteles. Algunos carteles de investigación son *Cálculo de la efectividad de un intercambiador de calor utilizando redes neuronales artificiales* (López, Castañeda & Castro, 2024), *Cálculo de la eficiencia de una bomba hidráulica utilizando redes neuronales* (Rocha, Castro & Castañeda, 2023) e

Invernadero autómatas (Flores, Delgado & Méndez, 2023), los cuales fueron presentados en el Segundo Congreso de Ingeniería que la EES-Yecapixtla realizó en 2023. Mientras que para el caso de capítulos dos ya han sido publicados en el primer volumen titulado *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico de la serie Avances en ingeniería*; estos son: “Aplicación web para préstamo de material sustentada en una base de datos (ARE)” (González Lezama et al., 2024) y “Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 SIEMENS” (Portillo Contreras et al., 2024).

Como resultado de la participación del estudiante en actividades de investigación antes descritas, han logrado desarrollar tres tipos de competencias (Portillo Contreras et al., 2024). En una de estas, se agrupan las básicas que abarcan la capacidad de abstracción, análisis y síntesis, comunicación oral y escrita, aprendizaje de forma autónoma, la elaboración de modelos matemáticos para la simulación de sistemas y la investigación. Asimismo, las competencias genéricas que comprenden la capacidad para identificar, plantear y resolver problemas, creatividad, el trabajo en equipo, la apertura a la experiencia, las relaciones con otros, la resolución de problemas técnicos y la comunicación en un segundo idioma. Por último, las competencias laborales que contiene el desarrollar prototipos físicos con base en modelos matemáticos y diseño asistido por computadora, además de habilidades lingüísticas. Cada una de estas competencias ha contribuido a que el estudiante cuente con conocimientos sólidos con capacidad de diseñar, modelar y de construcción en el campo de la automatización y en la robótica industrial, además de los proyectos afines al área y la capacidad de comunicación en un segundo idioma.

Por otro lado, los proyectos que el profesorado desarrolla pueden parecer triviales ante la comunidad estudiantil, y esto suele ser así debido al cúmulo de actividades que desempeña como la impartición de clases en horarios diversos, proyectos personales y laborales, sin dejar de lado situaciones personales, de conducta y socio-afectivas. Por tal motivo, quien debe estar mucho más fortalecido y comprometido para guiar al estudiante en la investigación hasta donde sea posible es la figura del docente. Desde su planeación didáctica, crea una serie de estrategias de mediación para la generación y aplicación

innovadora del conocimiento y la producción cultural (GAIC + PC) (MU, 2022) como parte de su vocación. Estas no deben quedar solo en el documento, sino también en la búsqueda de talentos para iniciar una selección de investigadores y brindar seguimiento continuo con revisiones de sus avances en tanto se vean limitados en tecnología o equipamiento; al pedir ayuda a otros investigadores en caso de alguna actualización de *software*; incluso al revisar investigaciones alternas para que, con el tiempo, los estudiantes realicen su servicio social o residencias que deriven en la elaboración de una tesis u otra forma de titulación. Sin la correcta orientación, y en cualquier momento de este largo andar, algunos estudiantes, por no decir la mayoría, dejan de lado los procesos de investigación, ya sea por falta de tiempo, gusto o placer, o por el descubrimiento de esas respuestas a sus incógnitas, de lo que, en su momento, era su objetivo primordial: la investigación.

Conclusiones

La investigación ha sido fundamental en el proceso de formación del estudiante en el PE de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial en la EES-Yecapixtla para el desarrollo de proyectos de investigación. La colaboración y guía del profesorado han sido pieza clave para lograr desarrollar las competencias necesarias para cumplir con un perfil de egreso donde el estudiante sea capaz de diseñar, modelar y construir en su área de ingeniería.

El estudiante ha logrado desarrollar proyectos que están encaminados a la elaboración de carteles y artículos de investigación, mismos que han sido presentados y publicados en memorias de congresos nacionales e internacionales y en libros.

Se recomienda considerar la necesidad de formar a los docentes en teorías, métodos y técnicas de investigación para que puedan mejorar su práctica docente en el aula. Esto se ha conseguido con la gestión de la administración de la EES-Yecapixtla, ya que ha buscado diferentes cursos de formación y actualización docente, y al mismo tiempo dichos cursos o talleres se transmiten a los estudiantes interesados en el proceso de investigación.

En el marco de las necesidades de transición curricular de nuestra universidad y sin perder el enfoque de mejora y exigencias de calidad para bien de los estudiantes, egresados, personal docente y administrativo del PE, este se reestructuró para integrar el eje de formación para la generación y aplicación innovadora del conocimiento y producción cultural, en donde el área de investigación se fortalece con tres unidades de aprendizaje que son: 1) proyecto de investigación, 2) diseño de proyectos y 3) proyecto de innovación y transferencia de tecnología. Asimismo, se atienden algunas observaciones de oportunidad de mejora realizadas por los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior, para que los estudiantes y docentes efectúen actividades sustantivas de investigación.

Referencias

- Amaro Barranco, B. (2022). *Modelación matemática de una chimenea solar para el análisis del rendimiento térmico*. Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2998>
- Aparicio-Gómez, O. Y., & Abadía-García, C. (2019). La investigación en la educación. *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*, 12(1), 229-251. <https://doi.org/10.15332/s1657-107X.2019.0001.03>
- Barrera Díaz, J. de J. (2022). *Secado de nanche y guaje usando un secador solar indirecto de flujo forzado*. Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2904>
- Castro Alcantar, I. Y. (2022). *Cinética de secado de cecina usando un secador solar indirecto*. Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2874>
- Flores, D., Delgado, M. A., & Méndez, M. (2023). Invernadero automático [Cartel]. En *Memorias de carteles del 2.º Congreso de Ingeniería (CI-2023)*. Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla.
- García Luna, A. (2022). *Instrumentación electrónica de una chimenea solar*. Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2825>

- González Lezama, L. F., López Leal, B., Portillo Contreras, S., Acevedo Contreras, G., & Gómez Díaz, K. (2024). Aplicación web para préstamo de material sustentada en una base de datos (ARE). En *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico: Vol. 1. Avances en ingeniería* (pp. 103-113). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- López, Castañeda, E., & Castro, L. (2024). Cálculo de la efectividad de un intercambiador de calor utilizando redes neuronales artificiales [Cartel]. En *Memorias de carteles del 2.º Congreso de Ingeniería (CI-2023)*. Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla.
- Luyando, J., Salas, J., Tlatelpa-Becerro, Á., & Rico-Martínez, R. (2020). Cinética de secado de capa fina para un secador solar indirecto. En *Memorias del 1.º Congreso Nacional de Secado y Cocción Solar de Alimentos*. <https://consyca.aseerca.org/memorias>
- Modelo universitario. (2022, 7 octubre). En *Órgano Informativo Universitario*, 27(128). Universidad Autónoma del Estado de Morelos. https://www.uaem.mx/organizacion-institucional/organo-informativo-universitario/Menendez_Samara_No_128c.pdf
- Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. (2024). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Portillo Contreras, S., Gallardo, H. D., Yáñez, A., Gonzaga Rosendo, M. F., & Sánchez Vargas, Ó. (2024). Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 Siemens. En *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico: Vol. 1. Avances en ingeniería* (pp. 115-123). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Programa educativo: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. (2017). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Rocha, J., Castro, L., & Castañeda, E. (2023). Cálculo de la eficiencia de una bomba hidráulica utilizando redes neuronales [Cartel]. En *Memorias de carteles del 2.º Congreso de Ingeniería (CI-2023)*. Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Tlatelpa-Becerro, Á., Alarcón-Hernández, F. B., Fuentes-Albarran, M. C., Gadea-Pacheco, J. L., Ciprian-Rosario, M., Reynoso-Jardón, E. L., Cortes, S., Salgado, A., Parrilla, L., Villanueva, G., & Guzmán, F. (2021). Simulación numérica computacional del cilindro de una extrusora. En *Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM: 22 al 24 de septiembre de 2021 Pachuca, Hidalgo, México*. https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A4_90.pdf
- Tlatelpa-Becerro, Á., Calderón, M., Rico, R., Avilés, S., Villegas, B., & Hernández, A. (2019). *Instrumentación y control automático aplicando redes neuronales artificiales a un secador solar indirecto* [Diapositivas]. Primer Encuentro Nacional de Secado y Cocción Solar de Alimentos ENSyCSA, Guadalajara, Jalisco, México.
- Tlatelpa-Becerro, Á., Rico-Martínez, R., Reynoso-Jardón, E., Urquiza, G., Castro-Gómez, L., Sánchez, E., Ojeda, A., García, A., Sosa, A., & Luyando, U. (2019). Simulación numérica de una Chimenea Solar Vertical con Tres Canales de Flujo de Aire. En *Memorias del XXV Congreso Internacional Anual de la SOMIM: 18 al 20 de septiembre de 2019 Mazatlán, Sinaloa, México*. https://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A4_8.pdf
- Tlatelpa-Becerro, Á., Rico-Martínez, R., Urquiza, G., Castro-Gómez, L., Villegas, B., Hernández, A., García, A., Luyando, J., & Salas, J. (2020). Predicción de temperatura y humedad usando redes neuronales artificiales en un secador solar indirecto experimental. En *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM: 21 al 23 de octubre de 2020 Morelia, Michoacán, México*. https://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A4_6.pdf

Aumento del rendimiento de sistemas fotovoltaicos a través de análisis de sensibilidad

Rodrigo José García Barrera,^{a*} Víctor Cruz Morales^b

Resumen

En este trabajo se evaluaron dos alternativas para la instalación de módulos fotovoltaicos en Mérida (México) mediante el análisis de sensibilidad energética y económica, utilizando el *software* Helioscope. Se compararon instalaciones óptimas con estructura de herrería contra instalaciones convencionales con el objetivo de identificar las situaciones en las que es más conveniente instalar estructuras de herrería. Los resultados muestran que el acceso solar es la variable energética más influyente, mientras que el CAPEX (costos iniciales) es la variable económica más sensible. La instalación óptima es la alternativa más rentable si la instalación convencional tiene un TSRF (fracción total de recurso solar, por sus siglas en inglés) menor al 93.4 % o cuando la instalación óptima reduce su OPEX (costos de operación).

Palabras clave: análisis de sensibilidad, Helioscope, acceso solar, CAPEX, OPEX.

Abstract

In this work, two alternatives for the installation of photovoltaic modules in Mérida (Mexico) were evaluated through energetic and economic sensitivity analyses using Helioscope software. Optimal installations with an ironwork structure were compared to conventional installations with the aim of identifying situations where it's more convenient to install ironwork structures.

^a Estudiante de la Ingeniería en Energías Sustentables, Universidad Anáhuac Mayab.

^b Profesor de asignatura, Universidad Anáhuac Mayab.

* Autor de correspondencia: 00408144@anahuac.mx

The results show that Solar access is the most influential energy variable, while CAPEX (initial costs) is the most sensitive economic variable. The optimal installation is the most profitable alternative if the conventional installation has a TSRF (Total Solar Resource Fraction) lower than 93.4 % or when the optimal alternative reduces its OPEX (operating costs).

Keywords: sensitivity analysis, Helioscope, solar access, CAPEX, OPEX.

Introducción

Los proyectos de energía renovable necesitan ser evaluados en circunstancias complicadas e inexploradas. El análisis de sensibilidad es una metodología utilizada para investigar cómo los cambios en parámetros de entrada afectan los resultados del sistema (Hernández Galvez et al., 2017). El análisis de sensibilidad energética se enfoca en el impacto de las modificaciones en las variables físicas en la capacidad de un sistema fotovoltaico para producir electricidad (Sumarno & Kinasih, 2024), mientras que el análisis de sensibilidad económica evidencia la manera en que las modificaciones en las variables financieras inciden en la rentabilidad de un sistema fotovoltaico (Hernández Galvez et al., 2017).

Se han realizado análisis de sensibilidad energética para averiguar cómo los ángulos de inclinación y azimut de los módulos fotovoltaicos afectan la producción de electricidad (Sumarno & Kinasih, 2024). Asimismo, se han realizado análisis de sensibilidad económica para evaluar la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos en distintos escenarios económicos (Hernández Galvez et al., 2017). Con base en estos estudios, en este trabajo se realizaron análisis de sensibilidad energética y económica de instalaciones fotovoltaicas de una empresa de paneles solares en Mérida, México, mediante el uso del *software* Helioscope. Todo ello fue con el objetivo de determinar los escenarios en donde es más conveniente instalar una estructura de herrería, en la cual los módulos fotovoltaicos se coloquen con la orientación e inclinación que maximice su producción energética (alternativa óptima) en oposición a solamente colocarlos orientados a las fachadas de las casas (alternativa convencional).

Materiales y metodología

Análisis de sensibilidad energética

Se simularon las dos alternativas de instalación en diez casos de estudio ubicados en diferentes partes de Mérida en el *software* Helioscope para calcular su producción energética anual y sus indicadores energéticos: factor de orientación e inclinación (TOF), acceso solar y fracción total de recurso solar (TSRF) (Sumarno & Kinasih, 2024; Habib et al., 2023). Se compararon los resultados entre la alternativa óptima y la convencional en cada caso de estudio, además de que se determinaron las diferencias de producción energética por módulo fotovoltaico (Hernández Galvez et al., 2017). Asimismo, se halló la variable que más impacta en la generación de energía entre alternativas a través de los indicadores TOF y acceso solar (Habib et al., 2023).

Análisis de sensibilidad económica

Se calculó el valor presente neto o VPN (suma de ahorros anuales descontados por inflación durante la vida útil) de cada alternativa en cada caso de estudio. En todos los casos donde la instalación óptima no resultara ser la de mayor VPN, se modificaron los costos iniciales (CAPEX) y costos operativos (OPEX) por separado de la alternativa óptima hasta alcanzar un VPN mayor a la convencional (Coria & Tascheret, 2014).

Resultados

Análisis de sensibilidad energética

Se obtuvieron las producciones anuales de energía eléctrica de las dos alternativas y se calculó la diferencia por módulo entre alternativas en cada caso de estudio, como se observa en la Figura 1.

Después de encontrar las instalaciones convencionales con mejor rendimiento, se halló que el indicador acceso solar es la variable con mayor impacto en la generación de energía al descubrirse una relación inversamente

proporcional entre este indicador y la diferencia de producción energética por módulo fotovoltaico: mayor acceso solar en instalaciones convencionales, menor diferencia de producción energética anual por módulo fotovoltaico entre alternativas, como se puede ver en la Figura 2.

Figura 1. Diferencia de producción energética anual por módulo fotovoltaico entre alternativas

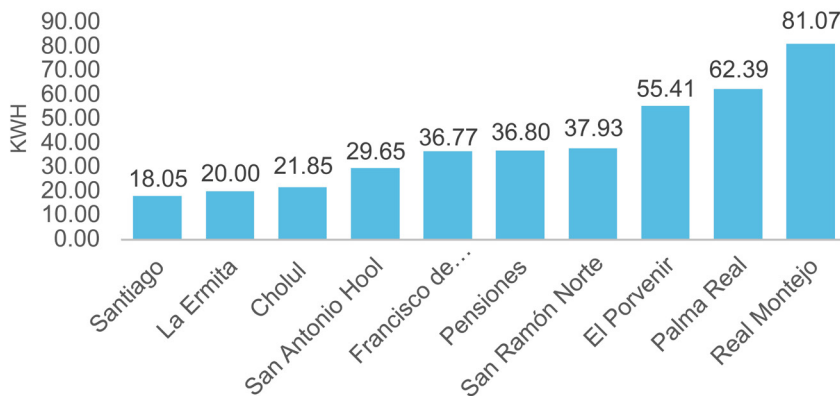


Figura 2. Porcentaje de acceso solar



El TOF es una variable que también afecta la producción energética y junto con el acceso solar (indicador de sombreado) forman el TSRF (TOF x acceso solar); sin embargo, esta no es tan determinante, sino más bien complementaria. La Tabla 1 muestra los indicadores energéticos de las instalaciones convencionales (las instalaciones óptimas siempre tendrán indicadores energéticos al 100 %).

Tabla 1. Indicadores energéticos de las instalaciones convencionales

Colonia	Acceso solar	TOF	TSRF
Real Montejo	95.3 %	98 %	93.394 %
Palma Real	96.2 %	98.2 %	94.468 %
El Porvenir	97.1 %	98.3 %	95.449 %
San Ramón Norte	98.7 %	98 %	96.726 %
Francisco de Montejo 2	99.2 %	97.6 %	96.819 %
Pensiones	98.6 %	98.4 %	97.022 %
San Antonio Hool	99 %	98.4 %	97.416 %
Cholul	99.8 %	98.4 %	98.203 %
La Ermita	100 %	98.3 %	98.300 %
Santiago	99.7 %	98.7 %	98.404 %

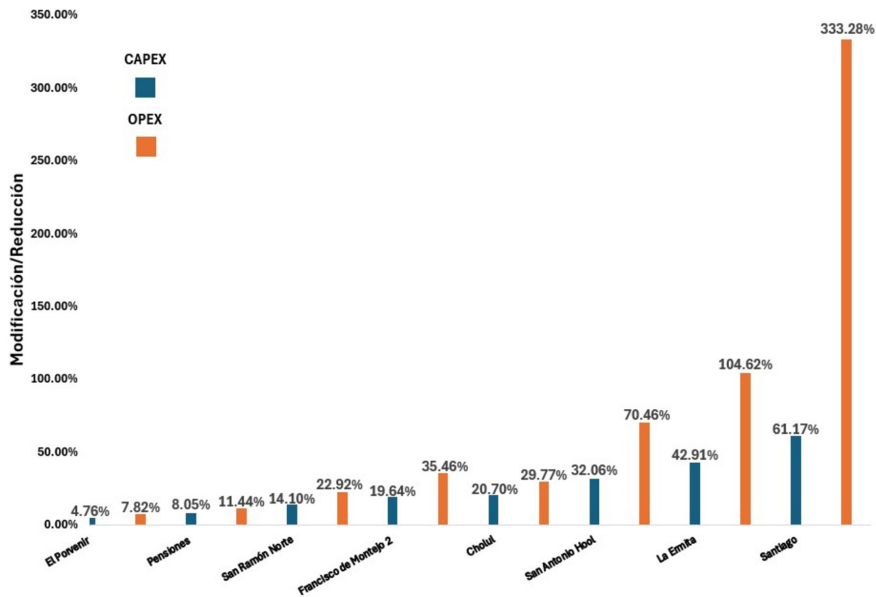
Análisis de sensibilidad económica

Solamente en el caso de Real Montejo la instalación óptima tuvo un VPN mayor a la convencional. Por ende, los valores de los CAPEX y OPEX de los demás casos de estudio fueron alterados por separado hasta que la instalación óptima fuera la alternativa más rentable. El porcentaje de modificación (reducción) de los CAPEX y OPEX de los demás casos de estudio se aprecia en la Figura 3 (las modificaciones de Palma Real fueron despreciadas porque indicaron reducciones menores a 0.2 %).

En la Figura 3 se aprecia que la variable CAPEX es la variable económica más sensible porque pequeñas alteraciones modifican la rentabilidad de los sistemas

fotovoltaicos. El OPEX tiene que modificarse más que el CAPEX, pero es más factible reducir los costos operativos que los iniciales.

Figura 3. Porcentaje de alteración de CAPEX y OPEX para rentabilizar instalación óptima



Conclusiones

El acceso solar es el indicador energético que más influye en la generación de electricidad y la variable económica más sensible de los sistemas fotovoltaicos es el CAPEX. La instalación óptima es más rentable que la convencional cuando esta última tiene un TSRF menor a 93.4 %; no obstante, instalar una estructura de herrería (alternativa óptima), reduciendo viablemente su OPEX, generará un mayor VPN que la alternativa convencional si el TSRF de la instalación convencional es menor a 98.3 %.

Con los resultados de este estudio, se determinaron los escenarios donde es más rentable instalar la alternativa óptima. Por lo tanto, se espera que esta información sirva para que los ingenieros, en el futuro, al momento de utilizar

Helioscope, puedan tomar decisiones rápidas respecto a cómo colocar los módulos fotovoltaicos en edificios donde es complicado instalarlos.

Referencias

- Coria, G. E., & Tascheret, C. (2014). Evaluación económica y análisis de sensibilidad en base a datos reales de un sistema de generación solar fotovoltaico conectado a la red de distribución. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 18, 43-51. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/139172>
- Habib, S., Tamoor, M., Zaka, M. A., & Jia, Y. (2023). Assessment and optimization of carport structures for photovoltaic systems: A path to sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*, 295, 117617. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117617>
- Hernández Galvez, G., Rivera Martínez, M. A., Sarracino Martínez, O., Ixtlilco Cortés, L., Juantorena Ugás, A., Batalla Nolasco, U. I., & Becerra García, D. (2017). Análisis de sensibilidad de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Caso de estudio en Guerrero, México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(3), 293-305. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.026>
- Sumarno, R. N., & Kinasih, K. (2024). Optimization of The Azimuth Direction and Tilt of The Campus Cafe Rooftop Solar Panels. *Advances in Engineering Research*, 97-107. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-480-8_8

Implementación de la metodología TPM en Translog Peninsular para mejorar el mantenimiento y la disponibilidad de vehículos

Juan Diego Ibarra Guadron^a

Resumen

El artículo narra la experiencia práctica de un alumno de Ingeniería Industrial de la Universidad Anáhuac Mayab durante la materia de practicum en la empresa Translog Peninsular. El proyecto se centró en implementar el mantenimiento productivo total (TPM) y la gestión de inventarios mediante el modelo ABC para resolver desafíos operativos en el sector logístico. Con una dedicación diaria de aproximadamente cinco horas, el estudiante aplicó herramientas y conceptos de diversas asignaturas —como estadística, simulación de sistemas, física aplicada y control de calidad— para identificar fallas críticas y diseñar un plan de mantenimiento preventivo. La iniciativa incluyó la elaboración de *checklists*, la capacitación del personal para fomentar el mantenimiento autónomo y el seguimiento de indicadores clave (MTBF y MTTR). Los resultados evidenciaron mejoras significativas, como una reducción del 8 % en los costos operativos, un 95 % de disponibilidad de piezas críticas y una disminución del 12 % en los tiempos de inactividad, lo que fortaleció la competitividad y eficiencia operativa de la empresa. En resumen, la experiencia demuestra que la aplicación de metodologías avanzadas y un enfoque interdisciplinario no solo optimiza los procesos internos, sino que también refuerza la sinergia entre la academia y la industria, consolidando el rol transformador del ingeniero en entornos reales.

Palabras clave: experiencia práctica del alumno, mantenimiento productivo total, modelo ABC.

^a Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Anáhuac Mayab.

* Autor de correspondencia: 00405405@anahuac.mx

Abstract

The article narrates the practical experience of an Industrial Engineering student from Anáhuac Mayab University during the practicum course at Translog Peninsular. The project focused on implementing Total Productive Maintenance (TPM) and inventory management using the ABC model to address operational challenges in the logistics sector. With a daily commitment of approximately five hours, the student applied tools and concepts from various subjects—such as statistics, system simulation, applied physics, and quality control—to identify critical failures and design a preventive maintenance plan. The initiative included the creation of checklists, staff training to promote autonomous maintenance, and the monitoring of key indicators (MTBF and MTTR). The results showed significant improvements, such as an 8 % reduction in operating costs, 95 % availability of critical parts, and a 12 % decrease in downtime, which strengthened the company's competitiveness and operational efficiency. In summary, the experience demonstrates that the application of advanced methodologies and an interdisciplinary approach not only optimizes internal processes but also strengthens the synergy between academia and industry, consolidating the transformative role of the engineer in real-world environments.

Keywords: student practical experience, total productive maintenance, ABC model.

Introducción

Como estudiante de Ingeniería Industrial en la Universidad Anáhuac Mayab, la materia de Practicum ha sido crucial para aplicar los conocimientos teóricos al mundo real. Desde agosto del año pasado, he trabajado en Translog Peninsular, donde he implementado metodologías como el mantenimiento productivo total (TPM) y la gestión de inventarios, mejorando las operaciones y reduciendo costos.

Al trabajar aproximadamente cinco horas diarias, he podido profundizar en las actividades de la empresa mientras estudiaba, además de innovar en el

proyecto con soluciones prácticas a problemas reales. La vinculación entre la empresa y la universidad se hace mediante el portal de la universidad y esto me ha permitido reforzar esta conexión.

Esta materia ha sido esencial en mi desarrollo profesional, al permitirme trabajar en un entorno real y mejorar mis habilidades en inglés, ya que muchas presentaciones y documentos se realizaron en ese idioma. La combinación de conocimientos académicos y experiencia práctica ha sido fundamental para mi formación como ingeniero, preparándome mejor para los retos profesionales futuros.

Translog Peninsular enfrenta desafíos operativos debido a la ausencia de un programa de mantenimiento preventivo eficiente y una gestión inadecuada de inventarios. Durante los últimos seis meses, estas deficiencias han incrementado los costos operativos en un 10 % y han reducido la productividad en un 15 %, afectando la eficiencia y la capacidad de respuesta de la empresa. Además, la disponibilidad de piezas críticas ha sido insuficiente en el 20 % de las ocasiones necesarias, ocasionando retrasos en reparaciones y tiempos de inactividad imprevistos.

Actualmente, la estrategia de mantenimiento se basa en inspecciones realizadas un día antes de los viajes programados, abordando los problemas de forma reactiva. Esta práctica genera altos costos de reparaciones urgentes y la necesidad de contratar mecánicos externos cuando las unidades se averían fuera de Mérida. Los sistemas de frenos, en particular las bolsas de aire y los compresores, han sido identificados como componentes críticos debido a su alta tasa de desgaste y su impacto directo en la seguridad de la flota.

Para abordar esta problemática, se implementó el mantenimiento productivo total (TPM) junto con la gestión de inventarios ABC. Estas metodologías han sido ampliamente adoptadas en la industria para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. La implementación se sustenta en conocimientos adquiridos en disciplinas como gestión de operaciones, métodos cuantitativos y mantenimiento industrial, que proporcionan un enfoque integral para la optimización del mantenimiento en Translog Peninsular.

Metodología

El estudio se desarrolló con el objetivo de optimizar las operaciones de mantenimiento en la empresa, al implementar TPM en conjunto con un sistema de gestión de inventarios ABC. Este enfoque busca reducir costos operativos, aumentar la disponibilidad de piezas críticas y minimizar tiempos de inactividad de la flota.

Diseño del estudio

Se llevó a cabo un diagnóstico inicial para identificar las fallas más recurrentes en los tractocamiones y lowboys. Posteriormente, se implementaron medidas correctivas y preventivas basadas en los siguientes pilares del TPM:

- Mantenimiento autónomo: capacitación de operadores para inspección y mantenimiento básico, permitiendo la detección temprana de fallas y reducción del desgaste.
- Mantenimiento planificado: creación de un cronograma estructurado para inspecciones, limpieza, ajustes y reemplazo de componentes en intervalos programados.
- Gestión de equipos: recopilación de datos históricos de fallas y reparaciones para identificar patrones recurrentes y definir estrategias de mejora.

Herramientas y procedimientos

Para la ejecución de este estudio, se utilizó el *software* CMMS Fiix, una plataforma digital que permite el monitoreo de fallas y la planificación de mantenimiento preventivo. Este *software* facilitó la recopilación de datos históricos, la programación de inspecciones y el control de inventarios en tiempo real.

Se analizaron cien registros de mantenimiento de los últimos doce meses para establecer frecuencias de fallas y tiempos de reparación promedio. Además, se implementó la metodología ABC categorizando las piezas en función

de su criticidad y consumo. Los componentes de frenos se clasificaron en la categoría “A” por su impacto en la operatividad y seguridad. Se realizó un seguimiento semanal de inventario para evaluar variaciones en disponibilidad y tiempos de reposición.

El desarrollo del proyecto comenzó con un diagnóstico inicial, en el que se identificaron las fallas más comunes en los equipos, específicamente en los tractocamiones y remolques que conforman la flota de la empresa. Los camiones analizados incluyeron modelos como el Freightliner Columbia 120 (2008), el Freightliner Cascadia 113 (2015), el International ProStar 122 (2016) y los remolques Lowboy Trailing (2002). A partir de este análisis, se determinó que las bolsas de aire y los compresores del sistema de frenos eran los componentes más propensos al desgaste, lo que representaba un riesgo operativo y un alto costo económico debido a la necesidad de reemplazos frecuentes. Finalmente, para evaluar la efectividad del proyecto, se implementaron indicadores clave de desempeño (KPI) que midieron factores como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio para reparar (MTTR) y la disponibilidad de piezas críticas en el almacén. Estas métricas proporcionaron una visión clara del impacto del proyecto en la reducción de costos y la mejora de la eficiencia operativa.

Figura 1. Porcentaje en las fallas más comunes



Resultados

El impacto del proyecto fue significativo, evidenciando mejoras en diversas áreas clave para la operación de Translog Peninsular:

- Reducción de costos operativos: se logró disminuir un 8 % de los costos operativos en un periodo de tres meses, eliminando la necesidad de adquisiciones de emergencia y optimizando los recursos disponibles.
- Incremento en la disponibilidad de piezas críticas: la implementación de la gestión de inventarios ABC permitió alcanzar un 95 % de disponibilidad de componentes esenciales, minimizando retrasos en reparaciones y asegurando tiempos de respuesta más rápidos.
- Reducción de tiempos de inactividad: los tiempos de inactividad de los equipos disminuyeron en un 12 %, mejorando la eficiencia y productividad de las operaciones logísticas.
- Capacitación efectiva: el personal operativo adoptó prácticas de mantenimiento autónomo, fortaleciendo su capacidad para identificar y solucionar problemas antes de que se conviertan en fallas críticas.
- Optimización de inventarios: se logró reducir un 20 % los costos de almacenamiento al eliminar artículos obsoletos y priorizar la adquisición de piezas de alta rotación y criticidad.

Tabla 1. Estudio ABC 2

Categoría	Partes	Criterios
A	Pastillas de freno, compresores de aire, alternadores	Alta frecuencia de consumo, alta criticidad
B	Filtros (aceite, aire), bandas, baterías	Consumo moderado, criticidad moderada
C	Tornillos, tuercas, empaques no críticos	Bajo consumo, no críticos para la operación

Comparando estos resultados con estudios previos en empresas de transporte, se observa una tendencia similar en la reducción de costos y optimización

de inventarios. Sin embargo, se identificó la necesidad de fortalecer la capacitación del personal para mejorar la eficiencia del mantenimiento autónomo.

Conclusiones

La implementación de TPM y la gestión de inventarios ABC en Translog Peninsular permitió abordar de manera eficaz los desafíos operativos asociados con los costos elevados y la falta de disponibilidad de piezas críticas. Los resultados obtenidos confirman que las metodologías de ingeniería industrial pueden ser herramientas clave para resolver problemáticas complejas en la industria logística.

Se logró responder a las preguntas de investigación planteadas al inicio del proyecto, demostrando que la aplicación sistemática de estrategias como el mantenimiento preventivo y la clasificación ABC mejora significativamente la eficiencia operativa. Además, se cumplieron los objetivos establecidos, particularmente en la reducción de costos operativos, el aumento de la disponibilidad de piezas críticas y la optimización de los tiempos de inactividad.

Entre las implicaciones de la investigación, se destaca la importancia de involucrar al personal operativo en procesos de capacitación, ya que esto fomenta el mantenimiento autónomo y asegura la sostenibilidad de las mejoras. Asimismo, la implementación de estas metodologías sienta un precedente replicable para otras empresas del sector que enfrentan problemas similares, contribuyendo a la optimización de sus operaciones logísticas.

Se recomienda que futuras investigaciones amplíen el alcance de este tipo de proyectos, evaluando el impacto a largo plazo de las mejoras implementadas y explorando la integración de tecnologías avanzadas, como sistemas de monitoreo en tiempo real o el análisis predictivo. Estas herramientas podrían complementar las metodologías aplicadas y ofrecer un nivel adicional de control y eficiencia operativa.

Finalmente, este proyecto refuerza la importancia de vincular la formación académica con las necesidades reales del sector empresarial, resaltando cómo

los conocimientos teóricos, cuando se integran con aplicaciones prácticas, pueden generar resultados tangibles y sostenibles en el ámbito profesional.

Referencias

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Evaluación de las iniciativas de implementación de TPM en una empresa de manufactura india. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 338-352.
- Bamber, C. J., Sharp, J. M., & Hides, M. T. (1999). Factores que influyen en la implementación exitosa del TPM. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(5), 494-509.
- Borris, S. (2006). *Mantenimiento Productivo Total: Estrategias y técnicas probadas para mantener el equipo funcionando con máxima eficiencia*. McGraw-Hill.
- Chiarini, A. (2017). *Lean Organization: de las herramientas del sistema de producción Toyota a la oficina Lean*. Springer.
- Hanel González, M., López Ontiveros, M. Á., & Loyo Quijada, J. (2016). Impacto de la formación del ingeniero industrial en la práctica: Laboratorio integral de ingeniería industrial. *Revista Electrónica ANFEI Digital*, 2(4). <https://www.anfei.mx/revista/index.php/revista/article/view/139>
- Huang, S. H., et al. (2002). Análisis de desempeño de la programación de mantenimiento basado en el mantenimiento productivo total. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(4), 316-338.
- Jeong, K. Y., & Phillips, D. T. (2001). Medidas de eficiencia y efectividad operativa. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 4(1), 33-45.
- Maynard, Z., & Zandin, K. (2005). *Manual del ingeniero industrial* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- Nakajima, S. (1988). *Introducción al TPM: mantenimiento productivo total*. Productivity Press.
- Suzuki, T. (2001). *TPM en las industrias de proceso*. Productivity Press.
- Wireman, T. (2004). *Mantenimiento productivo total*. Industrial Press Inc.

Mejora de la eficiencia de producción en la planta 1 de Leoni Mérida mediante la implementación de un sistema de fabricación flexible para adaptarse a la demanda cambiante de Lucid

Enelda Nigenda Asseburg,^{a*} Isis del
Alba Schweminski Hernández^a

Resumen

El presente documento analiza la problemática de eficiencia en la producción de la planta 1 de Leoni en Mérida, Yucatán, derivada del incremento en la demanda por parte de su cliente Lucid, una empresa de vehículos eléctricos. Leoni, reconocida por la fabricación y suministro de cables y arneses, enfrenta el desafío de ajustar su producción a las variaciones en la demanda sin comprometer la calidad. La transición a la manufactura en masa de arneses para Lucid ha generado una disminución en la eficiencia operativa, afectando el cumplimiento de los objetivos mensuales y aumentando los costos. La principal causa de esta problemática es la rigidez del sistema de manufactura vigente en agosto de 2024, el cual requiere ajustes en la línea de producción ante cualquier modificación en el diseño o en la cantidad solicitada por el cliente, lo que impacta negativamente la eficiencia y eleva los costos operativos.

Palabras clave: sistema de manufactura flexible, arneses automotrices, eficiencia operativa, adaptabilidad industrial, optimización de costos.

^a Ingeniería Industrial para la Dirección, Universidad Anáhuac Mayab.

* Autor de correspondencia: 00409680@anahuac.mx

Abstract

The document discusses the issue of production efficiency at Plant 1 of Leoni in Mérida, Yucatán, due to the growing demand from its client Lucid, an electric vehicle company. Leoni, renowned for its supply of cables and harnesses, faces the challenge of adapting its production to fluctuating demand without compromising quality. The transition to mass production of harnesses for Lucid has led to a decrease in the plant's efficiency, impacting monthly targets and increasing costs. The lack of flexibility in the manufacturing system in place as of August 2024 is the main cause of the problem since any modification in the design or the quantity requested by the customer requires adjustments to the production line, which reduces efficiency and increases costs.

Keywords: Flexible manufacturing system, automotive harnesses, operational efficiency, industrial adaptability, cost optimization.

Introducción

El estado del arte en los sistemas de manufactura flexible (FMS, por sus siglas en inglés) destaca su adopción en sectores como el automotriz y el aeroespacial, donde la capacidad para manejar múltiples configuraciones de producción es esencial. Investigaciones recientes subrayan que los principales beneficios de los FMS incluyen una disminución en los tiempos de ajuste, mejoras en la gestión de inventarios y una mayor capacidad para satisfacer demandas específicas del cliente (Groover, 2015). A pesar de estos avances, la implementación efectiva de un FMS requiere una planificación rigurosa, incluyendo el análisis de flujos de trabajo y la capacitación del personal (Slack, Chambers & Johnston, 2010; Manu et al., 2018).

En este trabajo, se presenta un caso práctico de implementación de un sistema de manufactura flexible en la planta 1 de Leoni Mérida, con el objetivo de mejorar la eficiencia de producción y adaptarse a las demandas cambiantes de Lucid, un cliente clave en expansión. El objetivo principal es incrementar en al menos un 10 % el cumplimiento del plan de producción para mayo de 2025,

mediante la optimización del flujo de trabajo, la actualización tecnológica y la capacitación del personal. Este estudio busca no solo validar la eficacia del FMS, sino también proporcionar una metodología replicable para otros procesos dentro de la planta.

Materiales y metodología

El proyecto se enfoca en la línea de producción de arneses para Lucid en la planta de Leoni en Mérida. De acuerdo con investigaciones previas y procedimientos estándar de la industria, se aplicó el sistema FMS de manera sistemática, garantizando efectividad y flexibilidad. El sistema se implementó de la siguiente manera:

- 1) **Análisis del flujo actual:** se realizó un análisis detallado del flujo de producción con el propósito de identificar ineficiencias y adaptar los métodos a las variaciones en la demanda de Lucid, garantizando así la precisión y eficiencia en la gestión de datos. Para este análisis, se empleó el mapeo de flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés), para poder visualizar el estado actual del flujo de producción, e identificar cuellos de botella y oportunidades de mejora.
- 2) **Identificación de cuellos de botella:** se determinaron áreas de ineficiencia en la preparación de materiales, actualizaciones de etiquetas, capacidad de estaciones y transportadores, disponibilidad de equipos, gestión de inventarios y capacitación del personal.
- 3) **Análisis de los tipos de arneses:** se revisaron las secuencias de fabricación y se identificaron similitudes en procesos y materiales. Se identificaron nueve tipos de arneses que se fabrican con los mismos materiales y métodos, variando solo en etiquetado.
- 4) **Implementación de un KPI de cambio de tiempo** (Martins, 2024): El KPI evalúa la eficiencia en el cambio de producto y la flexibilidad del sistema, con el objetivo de alcanzar al menos un 80 % de flexibilidad mensual en el transportador, optimizando así la adaptación a las variaciones en la producción. La fórmula utilizada es:

$$\text{Flexible of Conveyor} = (\text{Changeover Efficiency} - \text{Flexible Efficiency})/2 \quad (1)$$

$$\text{Changeover Efficiency} = (\text{Changeover Target}/\text{Changeover Real Time})*100 \quad (2)$$

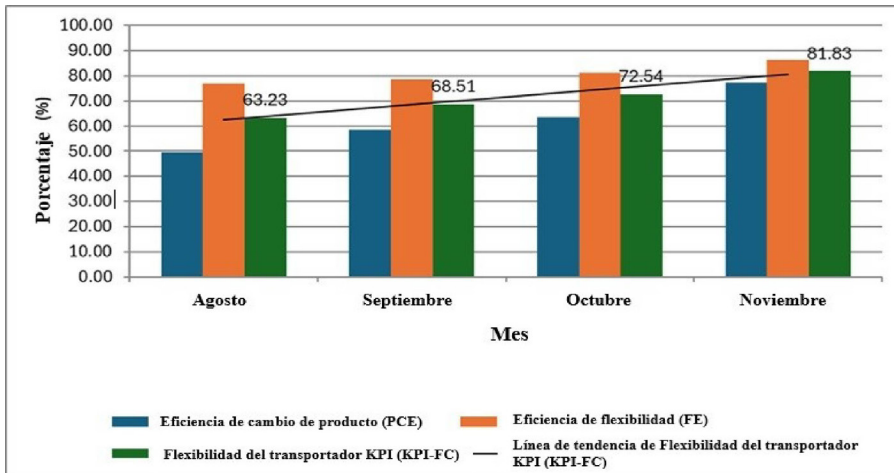
$$\text{Flexible Efficiency} = (\text{Produced}/\text{Planned})*100 \quad (3)$$

- 5) Diseño del layout con metodología ALDEP: esta metodología ayudó a determinar la ubicación del transportador principal cerca del área de recepción de materiales (İnce & Taşdemir, 2024), facilitando la transferencia rápida y eficiente de los insumos a la zona de producción. Para optimizar la disposición de estaciones de trabajo y sistemas de manejo de materiales, priorizando la proximidad entre equipos clave.

Resultados

A continuación, en el Gráfico 1 se muestran los resultados mensuales del KPI de flexibilidad del transportador (KPI-FC), desglosado por los indicadores clave de eficiencia de cambio de producto (PCE) y eficiencia de flexibilidad (FE):

Gráfico 1. Resultados del KPI de flexibilidad del transportador



El análisis del Gráfico 1 muestra una mejora constante en el KPI-FC, alcanzando en noviembre el rendimiento esperado según los estándares de un FMS. La optimización de los cambios y la planificación de la producción han sido determinantes en este logro.

La Tabla 1 evalúa la eficiencia mensual, pérdidas económicas y mejoras financieras de agosto a noviembre, proporcionando información clave para fortalecer las estrategias de mejora continua.

Tabla 1. Resultados de las pérdidas económicas en pesos mexicanos

Mes	Eficiencia (%)	Pérdida en MXN	Mejora en MXN
Agosto	63.23	32,535.93	0.00
Septiembre	68.51	27,863.93	4,672.00
Octubre	72.54	24,297.98	3,565.95
Noviembre	81.83	16,077.72	8,220.26

El análisis de los datos evidencia una mejora continua en la eficiencia de la línea de producción, la cual alcanzó un 81.83 % en noviembre, superando así la meta establecida por la empresa del 80 %. Este logro permitió una reducción significativa en las pérdidas económicas derivadas de las penalizaciones impuestas tanto por el cliente como por la empresa, disminuyendo de \$32,535.93 en agosto a \$16,077.72 en noviembre, lo que representa una mejora financiera acumulada de \$16,458.21. Estos resultados destacan el impacto positivo de las estrategias implementadas y subrayan la relevancia de las iniciativas en curso orientadas a la optimización de los procesos y la mejora de la eficiencia operativa.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a lo largo del proceso de implantación del sistema de manufactura flexible en la planta de Leoni Mérida han demostrado mejoras significativas en términos de eficiencia y adaptabilidad a las fluctuaciones de la demanda. Gracias a la implementación de un sistema flexible, la planta ha podido responder con mayor rapidez a los cambios en la demanda de los clientes,

especialmente en lo que respecta a los arneses para Lucid, sin comprometer la calidad ni los plazos de entrega. Esto ha sido esencial para cumplir con los estrictos requisitos de los clientes y mantener una relación comercial sólida y fiable, algo especialmente importante en el sector de la automoción, donde la puntualidad y la precisión son fundamentales.

A pesar de estos avances, el objetivo es alcanzar un 90 % de eficiencia para optimizar costos y capacidad productiva. Aunque se ha superado el 80 % de flexibilidad, la eficiencia global sigue por debajo de la meta. Es crucial seguir monitoreando tiempos de cambio y respuesta a la demanda, además de abordar desafíos en capacitación, disponibilidad de equipos y gestión de inventarios.

Referencias

- Groover, M. P. (2015). *Automation Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*. Pearson.
- İnce, M. N., & Taşdemir, Ç. (2024). Facility layout planning through the ALDEP Method in the wooden cable reels industry. *Turkish Journal of Forestry*, 25(1), 71-80. <https://doi.org/10.18182/tjf.1339018>
- Manu, G., Vijay Kumar, M., Nagesh, H., Jagadeesh, G., & Gowtham, M. B. (2018). Flexible Manufacturing Systems (FMS): A Review. *TransStellar*, 8(2).
- Martins, J. (2024, 16 de agosto). *Qué es un KPI, para qué sirve y cómo utilizarlo en tu proyecto*. Asana. <https://asana.com/es/resources/key-performance-indicator-kpi>
- Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2010). *Operations Management*. Financial Times Prentice Hall.

Reconocimiento y manipulación de objetos con inteligencia artificial en un brazo robótico

Félix David Juárez Olivos,^a Samuel Contreras Portillo,^a Immer Custodio Bustamante Morales,^{a*} Francisco Yael Castillo Tlapale,^a Isaí Sánchez Solís,^a José Jesús Venero Rodríguez^a

Resumen

El presente estudio se enfocó en la clasificación y manipulación de objetos mediante inteligencia artificial, utilizando un brazo robótico con un sistema de visión basado en redes neuronales. Se desarrolló un modelo de detección de objetos empleando transferencia de aprendizaje sobre un Jetson Nano, con un conjunto de datos compuestos por imágenes de esferas y cubos. El sistema fue evaluado en un entorno controlado, midiendo su precisión en la detección, la tasa de errores y el tiempo promedio de traslado del objeto. Los resultados mostraron una precisión del 94.8 % en la clasificación de esferas, con una tasa de falsos positivos del 2.3 %. Además, se observará que el brazo robótico optimizó sus trayectorias mediante la regulación dinámica de la velocidad de los motores. Estos hallazgos confirman que el reentrenamiento de redes neuronales para la clasificación de objetos mejora la eficiencia del sistema robótico y permite su adaptación a nuevas tareas. Las aplicaciones de esta tecnología pueden extenderse a diversas industrias, como la automatización industrial y la agricultura de precisión (Alepez Jerez, 2023).

Palabras clave: inteligencia artificial, visión artificial, brazo robótico, clasificación de objetos, automatización.

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: bustamantecustodio73@gmail.com

Abstract

The present study focused on the classification and manipulation of objects through artificial intelligence, using a robotic arm with a vision system based on neural networks. An object detection model was developed using transfer learning on a Jetson Nano, with a data set composed of images of spheres and cubes. The system was evaluated in a controlled environment, measuring its detection accuracy, error rate, and average object transfer time. The results showed an accuracy of 94.8 % in sphere classification, with a false positive rate of 2.3 %. Furthermore, it will be observed that the robotic arm optimized its trajectories by dynamically regulating the speed of the motors. These findings confirm that retraining neural networks for object classification improves the efficiency of the robotic system and allows its adaptation to new tasks. The applications of this technology can be extended to various industries, such as industrial automation and precision agriculture.

Keywords: artificial intelligence, computer vision, robotic arm, object classification, automation.

Introducción

En un mundo donde la inteligencia artificial (IA) se expande rápidamente, es crucial profundizar en su estudio para maximizar su potencial. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras como el presupuesto, la accesibilidad y la falta de capacitación (Icarte Ahumada, 2016; Wilman Giovanny, 2015), dificultando su adopción en la práctica.

Esta investigación busca integrar un sistema de IA en un brazo robótico para clasificar objetos según sus características, aprovechando las ventajas de la visión artificial en robots colaborativos que optimizan tareas repetitivas o peligrosas (Ocaña-Fernández, Valenzuela-Fernández & Garro-Aburto, 2019). Para ello, se requiere conocimiento en redes neuronales y programación en Python.

Un brazo robótico, inspirado en la movilidad humana, emplea IA para mejorar precisión y repetitividad en la manipulación de objetos, además de permitir

análisis y toma de decisiones autónomas en tiempo real. Así, esta investigación busca desarrollar una solución eficiente y práctica para la clasificación de objetos mediante IA.

Materiales y metodología

Este estudio empleó el método deductivo para analizar los datos recolectados, que fueron obtenidos de artículos seleccionados en repositorios en línea, asegurando su relevancia con el tema (Pacanchique Quilaguy & Rodríguez Olaya, 2021).

El robot AI-CROB-C cuenta con seis motores y está construido con PLA y componentes metálicos. Sus articulaciones utilizan motores paso a paso. La pinza es accionada por un servomotor, cuyas características se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de motores

Motor	Peso	Torque	Dimensiones
Nema 17 17HS19-2004S1	0.88 lb	59 Nm	49.91 x 49.91 mm
Nema 23HS45-4204S	3.96832 lb	3 Nm	57 x 57 mm
Servomotor MG955	0.121254 lb	0.980665 Nm	168 x 94 mm

Los componentes del robot fueron diseñados con un ensamblaje simple sin herramientas complejas. Las dimensiones se verificaron con un pie de rey digital y los planos del robot, optimizando su movimiento ante defectos de impresión o manipulación inadecuada.

Para el control, se utilizó una Jetson Nano (945-13450-0000-100) con Linux Ubuntu 18.04. Se instaló JetPack R32.7.5 junto con los paquetes necesarios. Dado que la Jetson Nano cuenta con solo 4 GB de RAM, se añadió una extensión de 4 GB de memoria SWAP para incrementar la capacidad de procesamiento durante el reentrenamiento del modelo, lo cual fue crucial para manejar el tamaño de lote (batch-size=4) durante el proceso de entrenamiento sin sobrecargar los recursos disponibles. Además, se configuraron Jetson Inference y Jetson Utils,

herramientas clave para la programación en Python. Para monitorear los recursos, se instaló Jetson Stats (Pardiñas Remeseiro, 2020).

La red neuronal utilizada provino de un modelo preentrenado del repositorio de Dustin Franklin, desarrollador de Nvidia, empleando transferencia de aprendizaje para adaptarlo al nuevo conjunto de datos. El *dataset* utilizado fue Open Images V7, descargándose aproximadamente 3000 imágenes por clase. El proceso de reentrenamiento se llevó a cabo con la ejecución del siguiente comando en Python, utilizando torch y torchvision:

bash

Copiar

Editar

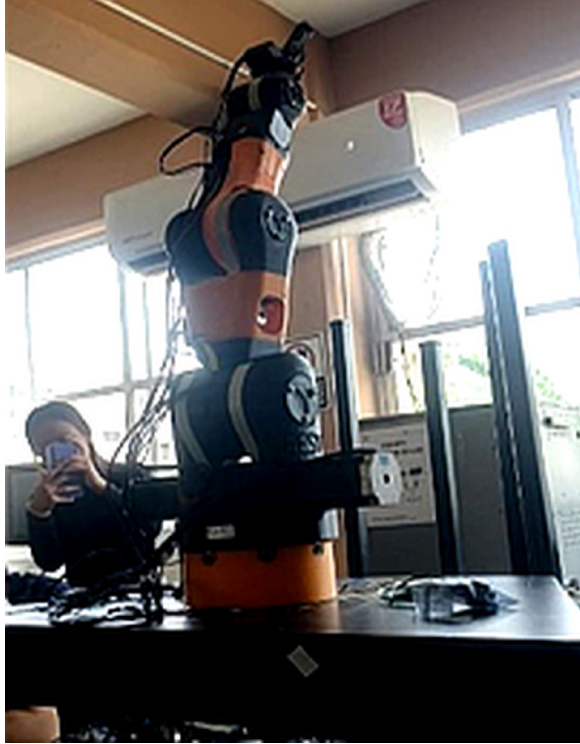
```
python3 train_ssd.py --data=data/fruit --model-dir=models/fruit  
--batch-size=4 --epochs=30
```

El parámetro batch-size=4 especifica que se procesan cuatro muestras por iteración, mientras que epochs=30 define el número de ciclos de entrenamiento. Debido a las limitaciones de la memoria, la configuración de la SWAP fue determinante para evitar cuellos de botella en el procesamiento. Finalmente, el modelo fue exportado a formato ONNX, para permitir la detección de objetos a través de TensorFlow con el script tensor.py (López, 2018).

Resultados

El sistema desarrollado fue evaluado en un entorno controlado, centrándose en la clasificación y traslado de una esfera. El modelo de visión basado en YOLOv5 alcanzó una precisión del 94.8 %, con una variabilidad en la precisión de ± 1.5 %, dependiendo de las condiciones de iluminación y el ángulo de detección.

Figura 1. Ruta del brazo con el primer objeto



Cabe destacar que el robot no sigue una trayectoria lineal fija, sino que emplea una serie de trayectorias segmentadas. Este enfoque le permite ajustar dinámicamente su velocidad y dirección en función de las condiciones del entorno y los objetos a manipular. Como resultado, se optimiza el desempeño y se garantiza un movimiento preciso y continuo, especialmente cuando el robot interactúa con objetos en tiempo real (Siciliano & Khatib 2016; Martínez et al., 2021).

Cabe destacar que el robot no sigue una trayectoria lineal fija, sino que emplea una serie de trayectorias segmentadas. Este enfoque le permite ajustar dinámicamente su velocidad y dirección en función de las condiciones del entorno y los objetos a manipular. Como resultado, se optimiza el desempeño y se garantiza un movimiento preciso y continuo, especialmente cuando el robot interactúa con objetos en tiempo real (Siciliano & Khatib 2016; Martínez et al., 2021).

Conclusiones

El reentrenamiento de redes neuronales para la clasificación de objetos en brazos robóticos ha demostrado ser una estrategia eficiente para mejorar la precisión y adaptabilidad del sistema. A través de la transferencia de aprendizaje y el ajuste fino de modelos preentrenados, es posible optimizar el rendimiento sin la necesidad de entrenar una red desde cero, reduciendo así el tiempo y los recursos computacionales requeridos. Los resultados obtenidos evidencian que esta metodología permite alcanzar altos niveles de precisión en la clasificación de objetos, lo que impacta positivamente en la eficiencia operativa del brazo robótico. Además, este enfoque posibilita un aprendizaje incremental, permitiendo que el sistema se adapte a nuevas tareas o modificaciones en los objetos a clasificar. Sin embargo, el desempeño del reentrenamiento está condicionado por la complejidad de la aplicación y la velocidad de inferencia requerida, lo que influye en su capacidad de generalización a escenarios no previamente vistos (Pérez, 2022; Sánchez & Romero, 2019; Rodríguez, 2023).

Referencias

- Alepuz Jerez, Á. (2023). *Aprendizaje por refuerzo aplicado al control de un robot manipulador*. Trabajo de fin de grado, Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/124654/1/Aprendizaje_por_refuerzo_aplicado_al_control_de_un_robot__Alepuz_Jerez_Angel.pdf
- Icarte Ahumada, G. A. (2016). Aplicaciones de inteligencia artificial en procesos de cadenas de suministros: una revisión sistemática. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 663-679. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000400011>
- López, A. (2018). Inteligencia Artificial aplicada a la robótica. *Revista de Robótica y Automatización*, 15(3), 50-62.
- Martínez, J., et al. (2021). Optimización de procesos industriales mediante inteligencia artificial. *Revista de Ingeniería Industrial*, 19(2), 112-118.

- Ocaña-Fernández, Y., Valenzuela-Fernández, L. A., & Garro-Aburto, L. L., (2019). Inteligencia artificial y sus implicaciones en la educación superior. *Propósitos y Representaciones*, 7(2). <http://dx.doi.org/10.20511/pyr2019.v7n2.274>
- Pacanchique Quilaguy, N. C., & Rodríguez Olaya, R. C. (2021). *El impacto de la inteligencia artificial en el trabajo*. Trabajo de especialidad, Universidad Libre de Bogotá. <https://hdl.handle.net/10901/20588>
- Pardiñas Remeseiro, S. (2020). *Inteligencia artificial: un estudio de su impacto en la sociedad*. Trabajo de fin de grado, Universidade da Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/28479>
- Pérez, C. (2022). Fundamentos de visión artificial y su integración con sistemas robóticos. *Revista Internacional de Robótica*, 30(1), 22-30.
- Rodríguez, J. (2023). Implementación de IA en sistemas robóticos para el sector agrícola. *Tecnología Avanzada*, 6(1), 77-84.
- Sánchez, D., & Romero, M. (2019). Desarrollo de un brazo robótico con visión artificial. *Revista Tecnológica*, 9(4), 88-99.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). En B. Siciliano & O. Khatib (Eds.), *Springer Handbook of Robotics* (pp. 109-131). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
- Suarez Prieto, J. E. (2018). *Los beneficios de la inteligencia artificial en el sector empresarial*. Proyecto de grado: monografía, Universidad Santo Tomás, Bogotá. <http://dx.doi.org/10.15332/tg.pre.2020.00091>
- Wilman Giovanny, S. P. (2015). *Diseño de una Interfaz de usuario y control cinemático de un brazo robótico de 6 grados de libertad para la planificación de trayectorias en software Matlab y Simulink*. Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10380>

Desarrollo de un prototipo experimental a escala laboratorio para el proceso de mezclado

Bethzayra Flores Silva,^a Miriam Navarrete Procopio,^{a*} Erick Omar Castañeda Magadán,^a Víctor Zezatti Flores,^b Ángel Tlatelpa Becerro^c

Resumen

En el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos se desarrollan prácticas de laboratorio para reforzar los conocimientos teóricos de los estudiantes del programa educativo de Ingeniería Química. Durante el verano de investigación se propuso y se construyó un prototipo a escala laboratorio de un proceso de mezclado para el desarrollo de prácticas de balance de materia. El prototipo construido fue validado con el desarrollo de una práctica de mezclado, dando un error absoluto entre el valor experimental y el valor calculado con balance de materia del 0.03 %, con lo cual se proporcionó confiabilidad al prototipo construido.

Palabras clave: proceso de mezclado, rotámetro, concentración, instrumentación, control.

Abstract

In the unit operations laboratory of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos, laboratory practices are developed to reinforce the theoretical knowledge of the students of the Chemical Engineering educational program. In this

^a Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: miriam.navarrete@uaem.mx

work, a laboratory-scale prototype of a mixing process was designed and built for the development of material balance practices. The constructed prototype was validated with the development of a mixing practice giving an absolute error between the experimental value and the calculated value of the material balance of 0.03 %, which translated to reliability to the constructed prototype.

Keywords: mixing process, rotameter, concentration, instrumentation, control.

Introducción

Un proceso es cualquier operación o serie de operaciones por las cuales se logra un objetivo en específico, las cuales provocan cambios físicos o químicos en una mezcla de sustancias o sustancia. Cuando el material entra en un proceso se llama alimentación y el que sale se denomina producto. A menudo los procesos constan de múltiples pasos y cada uno de ellos se lleva a cabo en una unidad de proceso; cada una de las cuales están asociadas a un conjunto de corrientes de procesos de entrada y salidas. El tamaño de los reactores depende del flujo de producción requerido y del tiempo de resistencia requerido para obtener la conversión en el mismo. La variable de diseño utilizada es el tiempo de retardo (relación entre el volumen del reactor y el flujo de alimentación volumétrico), que corresponde al tiempo de la resistencia media; cuando la densidad de la mezcla permanece constante, la disposición puede ser de reactor único o un sistema múltiple de reactores en serie o en paralelo. Una solución concentrada se refiere a una solución donde el soluto está presente en una cantidad relativamente alta en comparación con el solvente.

En el contexto de los artículos de investigación proporcionados, las soluciones concentradas se discuten en varios procesos como los sistemas de secado y los productos farmacéuticos (Kuzmin, Morozov & Sokoreva, 2022; Majeedullah & Khalid, 2023; Semenov et al., 2021; Seán, 2017; Hayashi et al., 2020a). Una solución diluida se refiere a una mezcla donde una pequeña cantidad de una sustancia (soluto) se disuelve en una cantidad mayor de otra sustancia (disolvente). La producción de soluciones diluidas implica controlar la presión para agregar un segundo líquido a un primero, ajustando la concentración del componente a un valor específico basado en la velocidad de flujo y las mediciones de

concentración (Hayashi et al., 2020b; Takdeshi et al., 2012; Galletti & Nicoziani 2020). El control, en un proceso de mezcla, implica varios aspectos como la automatización, el monitoreo y el ajuste para garantizar los resultados deseados. Esto incluye la implementación de unidades de control y comando para procesar datos relacionados con la formulación de la mezcla (Parra-Camacho, Rodríguez-Bayona & Carreño-Zagarra, 2023), el diseño de controladores de temperatura y nivel para un control preciso del proceso (Fan et al., 2018) y la utilización de métodos de control para regular las proporciones de los ingredientes, mejorar la eficiencia de la mezcla y la precisión de la dosificación en las estaciones de mezcla de hormigón (Cullen, Bakalis & Sullivan, 2017).

En este trabajo, se construyó un prototipo a escala laboratorio del proceso de mezclado para analizar la variable de proceso composición química. El prototipo fue validado al desarrollar una práctica de laboratorio, en donde la concentración de la solución mezclada alcanzó el estado estacionario. La concentración final fue comparada con el resultado del cálculo analítico dando un error absoluto del 0.03 %.

Materiales y metodología

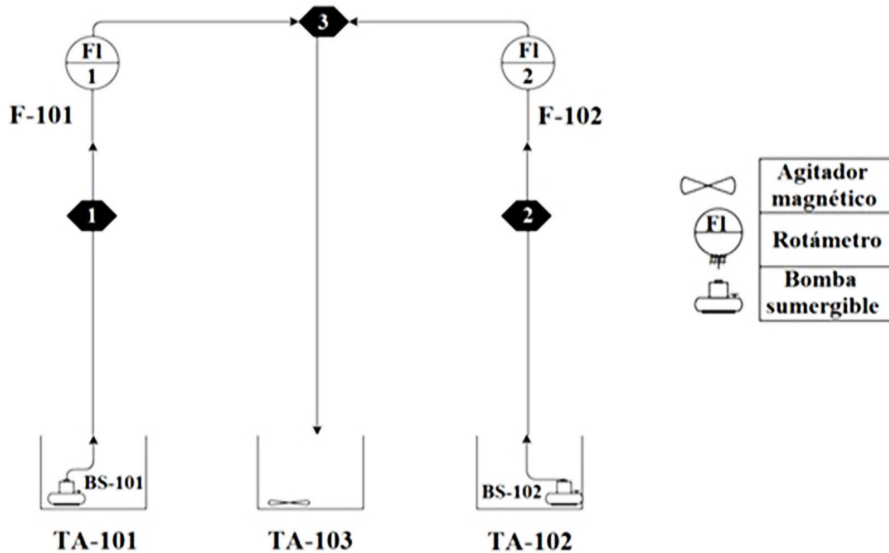
En esta sección se detalla el diseño y la construcción del prototipo experimental del proceso de mezclado.

Descripción del sistema

La Figura 1 muestra el diagrama del sistema de mezclado que fue construido en el laboratorio de transferencia de masa del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UAEM. El prototipo cuenta con tres tanques de almacenamiento, dos de capacidad de 3 L y el tercero de 6 L, además de dos rotámetros manuales y una parrilla para la agitación magnética. El tanque de almacenamiento TA-101 contiene la solución diluida y el tanque de almacenamiento TA-102, la solución concentrada. Las soluciones son extraídas con dos bombas sumergibles BS-101 y BS-102 de la siguiente forma:

- Corriente 1: el fluido almacenado de “mezcla diluida” en el tanque de almacenamiento TA-101 es succionado por la bomba sumergible BS-101 y controlado por el rotámetro F-101 para ser descargada al tanque de almacenamiento TA-103.
- Corriente 2: el fluido almacenado de “mezcla concentrada” en el tanque de almacenamiento TA-102 es succionado por la bomba sumergible BS-102 y controlado por el rotámetro F-102 para ser descargada al tanque de almacenamiento TA-103.
- Corriente 3: es la unión de las corrientes 1 y 2 para alimentar el TA-103.

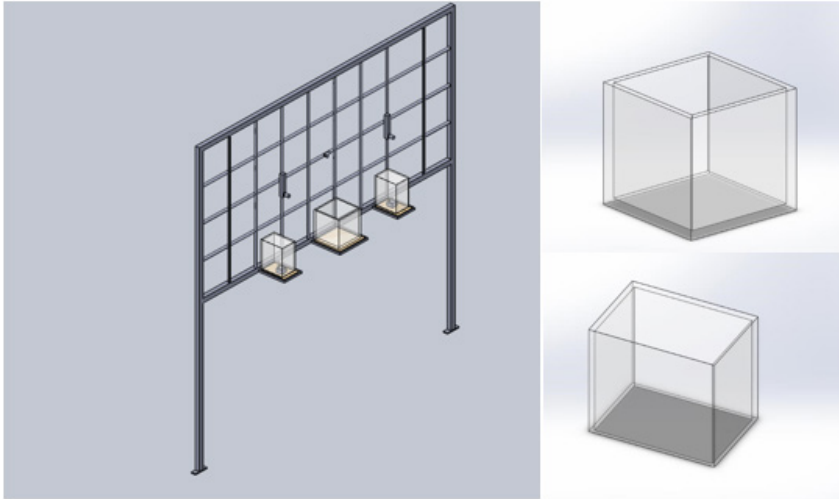
Figura 1. Diagrama del sistema de mezclado del laboratorio de operaciones unitarias (UAEM-FCQel)



Construcción del prototipo experimental

La Figura 2 muestra el diseño CAD del prototipo experimental y de los contenedores construidos para el sistema de mezclado. Se construyeron tres depósitos de acrílico de 5 mm de espesor, de los cuales dos son de capacidad de 3 L y uno de 6 L.

Figura 2. Diseño CAD del prototipo de mezclado y de los contenedores de acrílico de 3 L y 6 L



En la estructura metálica se construyeron bases de herrería para los contenedores de 3 L de 20 cm x 14.5 cm y para el contenedor de 6 L, de 24 cm x 24.6 cm. La Figura 3 muestra el prototipo del proceso de mezclado construido en el laboratorio de transferencia de masa.

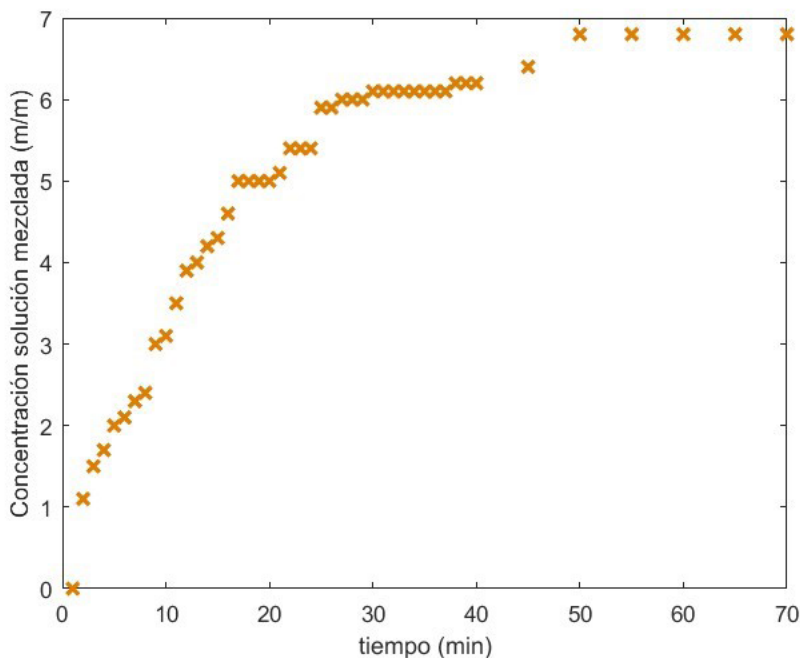
Figura 3. Prototipo del sistema de mezclado



Resultados

Se prepararon 1.5 litros de dos soluciones de agua con azúcar, una concentrada y otra diluida. La solución concentrada fue preparada al 9 % m/m y la diluida al 5 % m/m. Las cuales fueron verificadas con un refractómetro de grados Brix. Las soluciones se colocaron en los contenedores de acrílico para iniciar la prueba de mezclado a flujos volumétricos controlados. La solución diluida se suministró a 15 mL/min y la solución concentrada a 12 mL/min. Se realizó el monitoreo de la solución mezclada tomando muestras cada minuto del contenedor de mezclado. La Figura 4 presenta los resultados del monitoreo de la solución mezclada, los datos señalan que la concentración de la mezcla alcanza el estado estacionario a los 45 minutos de la experimentación.

Figura 4. Monitoreo del proceso de mezclado



Los resultados experimentales en el sistema de mezclado construido fueron verificados con un balance de materia. A continuación, se muestra el balance global y el cálculo de la composición de la solución mezclada. Donde F es el flujo másico y x es la composición química en fracción masa.

$$F_1x_C F_2x_D = F_3x_M \quad (1)$$

$$x_M = 6.777\%m / m$$

Conclusiones

La variable analizada durante el proceso de mezclado es la composición química. Al mezclar una solución diluida con una concentración alta a flujos volumétricos controlados se obtiene una concentración de mezclado final. La concentración de mezclado tiene que alcanzar el estado estacionario para poder ser comparada con la que se obtendría de un balance de materia. La concentración alcanzada de manera experimental con el prototipo construido fue comparada con la que resultó del balance de materia, dando un error absoluto entre ambos valores del 0.3 %, lo cual proporciona confiabilidad al prototipo desarrollado. Durante la experimentación se alcanzó el estado estacionario, como se mostró en la Figura 4, durante el monitoreo de la concentración mezclada mediante índice refracción. Dicho resultado fue comparado con el cálculo analítico, resultado del balance de materia, resolviendo la ecuación 1 para la concentración mezclada.

Referencias

Bansal, K., & Jindal, A. (2023). Mixing. En A. Jindal (Ed.), *Pharmaceutical Process Engineering and Scale-up Principles. AAPS Introductions in the Pharmaceutical Sciences*, Vol. 13 (pp. 25-39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31380-6_2

- Cullen, P., Bakalis, S., & Sullivan, C. (2017). Advances in control of food mixing operations. *Current Opinion in Food Science*, 17, 89-93 <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.11.002>
- Fan, D., Zhao, C., Meng, Q., Liu, M., Gao, J., Wang, Z., Liu, H., Wu, C., He, F., & Li, Y. (2018). *Control method of concrete construction process* (U.S. Patent No. 10,875,811). U.S. Patent and Trademark Office.
- Galletti, L., & Nicoziani, M. (2020). *Method to control a mixer, and corresponding mixer* (U.S. Patent No. 11,257,739 B2). Oficina de Patentes y Marcas de EE. UU.
- Kuzmin, K. A., Morozov, S. M., & Sokoreva, E. V. (2022). Simulation of the liquid mixing process. *The Agrarian Cientific Journal*, (9), <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i9pp108-111>
- Majeedullah, & Khalid, G.-e-R. (2023). Mixing. En S. A. Khan (Ed.), *Pharmaceutical Process Engineering and Scale-up Principles. AAPS Introductions in the Pharmaceutical Sciences*, Vol. 46 (pp. 15-25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84977-1_2
- Navarrete Procopio, M., & Velázquez Flores, V. (2021). *Laboratorio de Ingeniería Química 1*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Parra-Camacho, L. C., Rodriguez-Bayona, A. F., & Carreño-Zagarra, J. J. (2023). Automation and control of the thermal mixing process. *Systems Science & Control Engineering*, 11(1), 2177769. <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2177769>
- Seán, M. (2017). Chapter 25 - Mixers. En *Process Plant Layout* (2.^a ed., pp. 369-376). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803355-5.00025-1>
- Semenov, E. V., Slavyanskii, A. A., Nikitin, I. A., Klokonos, M. V., & Mitroshina, D. P. (2021). Calculation of bulk materials mixing process. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56, 779-786. <https://doi.org/10.1007/S10556-021-00842-Y>
- T. Takdeshi, T. Sakai, C. Miyamoto, A. Takeshi, T. Kamata, T. Yotani, & T. Oka. (2012). Diluted solution for preparing analytical sample. *Analytical Sciences*, 28(12), 1125-1130. <https://doi.org/10.2116/analsci.28.1125>

- Y. Hayashi, Y. Yamashita, K. Yamanaka, & D. Yano. (2020a, 8 de diciembre). *Diluted solution production method and diluted solution production apparatus*. Patente No. US10,857,512.
- Y. Hayashi, Y. Yamashita, K. Yamanaka, & D. Yano. (2020b, 26 de septiembre). *Method and apparatus for producing dilute solution*. Patente No. US16/969827.

Experiencia y buenas prácticas en el diseño e implementación de tableros didácticos para el aprendizaje automatización y programación de PLC en educación superior

Samuel Portillo Contreras,^{a*} María Fernanda Gonzaga Rosendo,^b Lizbeth Contreras Ortega^a

Resumen

El presente artículo describe el diseño, construcción e implementación de tableros didácticos como herramientas para la enseñanza de la automatización y programación de PLC en educación superior. Los tableros fueron desarrollados utilizando dispositivos de la serie SIMATIC de Siemens y están diseñados para proporcionar una experiencia educativa que simula escenarios industriales reales. La metodología incluyó planificación, diseño con herramientas CAD, montaje, cableado, programación y pruebas. Se realizaron encuestas a estudiantes egresados para evaluar la eficacia de los tableros, obteniendo un 92.2 % de satisfacción. Los resultados reflejan que estos tableros son herramientas efectivas para desarrollar habilidades prácticas en automatización, aunque se identificaron áreas de mejora como la inclusión de PLC de diferentes marcas y *switches* para redes. Este proyecto contribuye al fortalecimiento de las competencias técnicas de los estudiantes en el ámbito industrial.

Palabras clave: PLC, automatización, Siemens, tableros didácticos, programación.

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

^b Ingeniero de automatización de nuevos proyectos, Saint-Gobain Sekurit.

* Autor de correspondencia: samuel.portillo@uaem.mx

Abstract

This article presents the design, construction, and implementation of educational boards as tools for teaching PLC automation and programming in higher education. The panels were developed using Siemens SIMATIC series devices and are designed to provide an educational experience that simulates real industrial scenarios. The methodology included planning, CAD-based design, assembly, wiring, programming, and testing. Surveys of alumni were conducted to assess the panels' effectiveness, with 92.2 % satisfaction reported. Results show that these panels are effective tools for developing practical skills in automation, although areas for improvement, such as incorporating PLCs from different brands and network switches, were identified. This project strengthens students' technical competencies in the industrial field.

Keywords: PLC, automation, Siemens, educational panels, programming.

Introducción

En la automatización industrial, actualmente los controladores lógicos programables (PLC) son esenciales para la optimización y control de procesos. En los sistemas de producción actuales es necesario mantener un alto nivel competitivo para dar respuesta a las exigencias del mercado con efectividad. Con el avance de la tecnología, la demanda de PLC eficientes y confiables ha aumentado, trayendo como resultado una amplia variedad de marcas y modelo en el mercado. Entre las más destacadas se encuentran Siemens, Allen-Bradley, Mitsubishi Electric, Schneider Electric, Omron y ABB (Tabla 1). Según un informe de Mordor Intelligence, el tamaño del mercado de PLC se estima en 12.83 mil millones de dólares en 2024, y se espera que alcance los 15.07 mil millones de dólares en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 4.23 % (Mordor Intelligence, 2025). Según un informe de KWoco-PLC, estas marcas lideran el mercado debido a su fiabilidad, innovación y soporte técnico. Siemens es conocida por su serie SIMATIC; Allen-Bradley, por sus sistemas ControlLogix y CompactLogix;

Mitsubishi Electric, por su serie MELSEC; Schneider Electric, por su Modicon PLC, y Omron, por su serie SYSMAC (kwoco, 2024).

Tabla 1. Uso de las marcas de controladores en el mercado

Marca PLC	Mercado (%)	Productos destacados
Siemens	30	PLC SIMATIC
Automatización Rockwell	22	PLC de Allen-Bradley
Schneider Electric	18	PLC Modicon
Mitsubishi Eléctrico	12	PLC MELSEC
Omron	8	PLC SYSMAC
TEJIDO	5	PLC AC500
Keyence	3	PLC de la serie KV
Otros	2	Varios

En el ámbito de la educación técnica y la formación profesional, la práctica con equipos reales es fundamental para el desarrollo de habilidades y competencias (Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, 2024). Con este objetivo en mente, se desarrolló un proyecto centrado en la creación de tableros didácticos para prácticas con PLC Siemens. Estos tableros didácticos están diseñados para proporcionar a los estudiantes una experiencia práctica y realista en el manejo y programación de PLC (Agotegaray, Pinzón Montes & Prado Iratchet, 2018), específicamente de la serie SIMATIC de Siemens. A través de este proyecto, se busca no solo mejorar la comprensión teórica de los estudiantes, sino también fortalecer sus capacidades prácticas, preparándolos para enfrentar los desafíos del entorno industrial moderno. Los tableros didácticos incluyen componentes y escenarios de automatización que simulan situaciones reales, permitiendo a los estudiantes aplicar sus conocimientos en un entorno controlado y seguro (Portillo Contreras et al., 2024; Tableros didácticos, s. f.).

Materiales y metodología

Para la construcción de los tableros se utilizaron materiales, herramientas y equipos iguales a los que se pueden encontrar dentro del ámbito profesional (Mordor Intelligence, 2025) de la automatización. Con base en la experiencia previa de la utilización de equipo didáctico de la misma índole, además de la investigación de otros dispositivos similares para el entrenamiento y enseñanza de la programación de PLC y técnicas de automatización, se decidió utilizar controladores o autómatas de la marca Siemens. Para este efecto, se empleó toda la gama vigente, desde el Logo V8 de la familia más básica de estos controladores hasta los S7-1500, pasando por los S7-300, 400 y 1200, e incluso siendo complementados con los HMI y fuentes de alimentación reguladas de la misma marca. El fundamento de la metodología es que el estudiantado se familiarice con estos elementos y, al incrustarse en el campo profesional y laboral, presente una ventaja y oportunidad destacable en la realización de estancias y residencias profesionales. Por esta razón, se eligieron materiales y marcas de los equipos industriales más demandados en México (Figura 1).

Para la construcción de los tableros didácticos se utilizaron los siguientes materiales y equipos, todos ellos comúnmente empleados en la industria:

- PLC Siemens: toda la gama vigente.
- Fuente de alimentación: fuente de alimentación de 24V.
- Módulos de expansión: incluyen módulos de entradas y salidas digitales y analógicas.
- HMI: Siemens KTP 400.
- Relés y contactores: manejador de relevadores de 24v, contactores AC y DC.
- Pulsadores e indicadores: botones NC y NO, paros de emergencia, selectores, indicadores led de 120 v y 24v, conexiones tipo banana.
- Cables y conectores: cable de diferentes calibres tipo automotriz, borneras y clemas varias. Panel de montaje: trovicel y MDF.
- Perfiles y rieles: perfiles de aluminio 20 mm x 20 mm y rieles din para el armado de estructura y colocación de componentes.

Figura 1. Sistemas de control industrial (ICS) líderes en México

Principales líderes del mercado de automatización industrial y controles industriales (ICS) en México

Empresa	Descripción
Honeywell International Inc.	Especialista en soluciones de control y automatización para diversos sectores, incluyendo manufactura, petróleo y gas, y energía.
General Electric Co. (GE)	Ofrece soluciones en automatización, <i>software</i> industrial, control de procesos y sistemas de monitoreo.
ABB Ltd.	Destacado por sus soluciones en robótica, automatización industrial y digitalización en fábricas.
Emerson Electric Company	Proveedor líder en automatización de procesos y sistemas de control para industrias como la química, farmacéutica y de energía.
Siemens AG	Ofrece sistemas avanzados de automatización, controladores lógicos programables (PLC), <i>software</i> industrial y soluciones de digitalización.

Nota: Esta lista no está en orden de importancia y representa solo algunos de los principales jugadores en el mercado mexicano.

Fuente: *Mordor Intelligence*

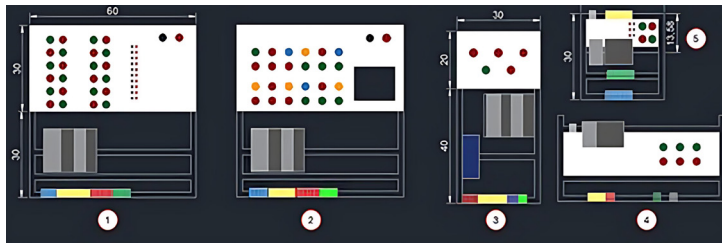
- Herramienta manual: pinzas de punta, corte, crimpadoras y pelacable, así como ferrules, pinzas ponchadoras, llaves allen, desarmadores, dados, tornillería de precisión.
- Programación y configuración del PLC Siemens: *software* TIA Portal, LOGO Soft Comfort.

El proceso de ensamblaje de los tableros didácticos se llevó a cabo mediante una serie de etapas planificadas y ejecutadas, las cuales se describen a continuación:

- 1) Planificación y diseño: en esta fase inicial, se realizó un análisis exhaustivo de los requisitos del proyecto, seguido de la elaboración de un diseño detallado del tablero didáctico. Se consideraron aspectos como la disposición de los componentes, la accesibilidad para los usuarios.

Se utilizaron herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para crear planos precisos (Figura 2). El primer diseño se desarrolló en AutoCAD, en el cual se modeló de manera simple la disposición de los elementos que conforman cada tablero, posteriormente se modelaron en un software de diseño 3D, SolidWorks, esto con el fin de ya tener una visión más clara del resultado final de cada tablero.

Figura 2. Diseños 2D en AutoCAD: 1-S7-300, 2- S7-1500, 3-S7-1500,4- S7-LOGO,5-S7-1200

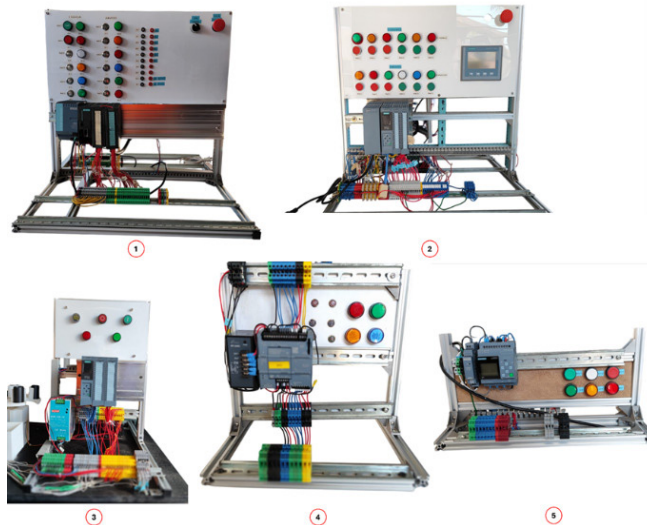


- 2) Selección de materiales y componentes: con los diseños definidos, se procedió a la selección de los materiales y componentes necesarios para la construcción del tablero. Esto incluyó la adquisición de dispositivos de entrada y salida, componentes eléctricos y electrónicos. Para este punto se priorizó la calidad y la compatibilidad de los componentes para garantizar el correcto funcionamiento del tablero.
- 3) Preparación del área de trabajo: se acondicionó el taller de electrónica como área de trabajo para asegurar un entorno seguro y eficiente. Esto implicó la organización de las herramientas y equipos necesarios.
- 4) Montaje de la estructura: se inició el montaje de la estructura del tablero didáctico, utilizando perfiles de aluminio de 20 mm x 20 mm, ángulos de metal y tornillería para este tipo de perfil. Una vez teniendo la estructura, se marcaron y cortaron los espacios en los que irían los elementos en el panel. Este se fijó posteriormente a la estructura. Se siguieron los planos y esquemas previamente elaborados.
- 5) Instalación de componentes eléctricos y electrónicos: en esta etapa, se procedió a la instalación de los componentes eléctricos y electrónicos

de control y potencia en la estructura del tablero. Se conectaron los dispositivos de entrada y salida.

- 6) Cableado y conexiones: se realizó el cableado de potencia y control del tablero, asegurando una distribución ordenada y segura de los cables. Se utilizaron borneras y canaletas para facilitar las conexiones y garantizar la accesibilidad para futuras modificaciones o mantenimientos. Se etiquetaron los cables y conexiones para una identificación clara y rápida.
- 7) Programación del PLC: se desarrollaron programas de control utilizando el *software* TIA Portal para la gama 1500 y 300 (Portillo Contreras et al., 2024). Para el LOGO, se utilizó el *software* LOGO! Soft Comfort. Estos programas posteriormente fueron cargados en los PLC para realizar las pruebas iniciales.
- 8) Pruebas y verificación: una vez completado el montaje y conexión, se realizaron pruebas de continuidad y funcionamiento de los componentes en conjunto. Se documentaron los resultados de las pruebas y se realizaron ajustes necesarios para corregir cualquier anomalía detectada.

Figura 3. Tableros de control 1-S7-300, 2- S7-1500, 3-S7-1500, 4- S7-1200, LOGO



- 9) Recurso humano: para esta labor se contó con la colaboración del estudiantado de servicio social de la carrera de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, a quienes se les capacitó y preparó en la utilización de los dispositivos, materiales y herramientas. Esto también significó una plataforma para desarrollar nuevas habilidades y conocimientos, la aplicación de lo aprendido, ya que el área de manufactura, la electrónica, circuitos eléctricos y la automatización y control se conjugan para el desarrollo de cada prototipo. Para conocer la efectividad de los tableros se diseñó y aplicó una encuesta de satisfacción (Tableros didácticos, s. f.).

Resultados

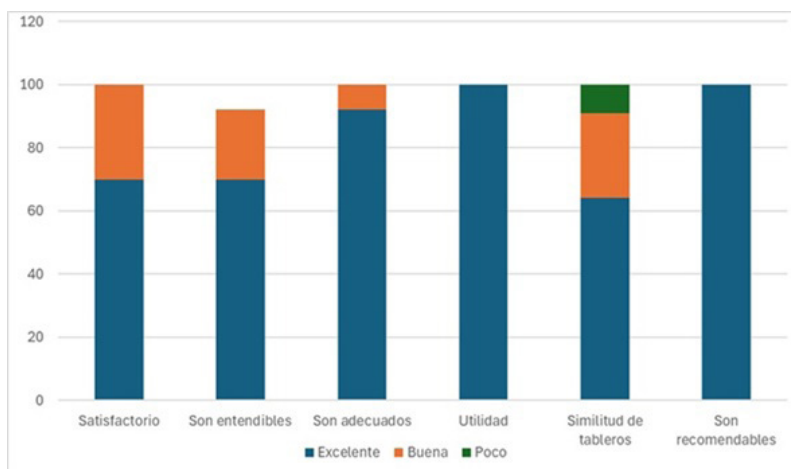
Tras la realización de los tableros didácticos para aprendizaje de automatización y control industrial (Figura 3), se aplicó una encuesta a tres generaciones egresadas de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla para conocer la satisfacción, utilidad, entre otras funciones. Se incluyen los resultados de dicha encuesta en la Figura 4.

Se elaboraron varios tableros didácticos con el objetivo de implementarse en las materias de automatización industrial, incluyendo control. La encuesta realizada tuvo como objetivo evaluar la utilidad, satisfacción y las áreas de mejora a los tableros. Para el 71 % de los estudiantes esta práctica les fue satisfactoria y el 92.2 % consideran que los tableros son una herramienta esencial para aprender automatización y familiarizarse con los equipos que se encuentran en el campo laboral (Tableros didácticos, s. f.).

Conclusiones

Los tableros didácticos han demostrado ser aptos para prácticas de automatización industrial. Asimismo, demostraron ser una herramienta efectiva para desarrollar las habilidades de programación. El 100 % de los alumnos recomiendan

Figura 4. Resultados de la encuesta a estudiantes y egresados



el uso de los tableros para practicar. Sin embargo, se han dado varios puntos de vista a mejorar, como el tener PLC de varias marcas, así como un *switch* para una red, los cuales se tomarán en cuenta para los proyectos presentes y futuros. Como tal, este es un proceso de mejora continua, donde las recomendaciones y observaciones son valiosas. Actualmente se está trabajando en el diseño de un tablero para el aprendizaje del control de motores eléctricos. En este, se seguirá utilizando controladores lógicos programables y otras mejoras, como el montaje en una base móvil y un diseño más ergonómico de la estructura.

Agradecimientos

Se agradece a la administración y dirección de la unidad académica de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla el apoyo para brindar los espacios y recursos oportunos para el desarrollo de las actividades.

Referencias

- Agotegaray, J. C., Pinzón Montes, A., & Prado Iratchet, S. (2018). *Experiencia formativa de estudiantes en prácticas de automatización*. En II Jornadas sobre las Prácticas Docentes en la Universidad Pública, La Plata.
- kwoco. (2024, 2 diciembre). *¿Qué PLC se utiliza más en la industria? Explicación de los principales PLC*. <https://kwoco-plc.com/es/most-used-plc-in-industry/>
- Mordor Intelligence. (2025). *Análisis de participación y tamaño del mercado de PLC tendencias y pronósticos de crecimiento (2024-2029)*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/programmable-logic-controller-plc-market>
- Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. (2024). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Portillo Contreras, S., Gallardo, H. D., Yáñez, A., Gonzaga Rosendo, M. F., Sánchez Vargas, Ó. (2024). Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 SIEMENS. En Á. Tlatelpa Becerro & G. R. Carbajal Pérez (Eds.), *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico: Vol. 1. Avances en ingeniería* (pp. 115-123). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Tableros didácticos. (S. f.). Google Forms. https://docs.google.com/forms/d/14JRE84YamvfrI-Fj9GqnZ_jemFJ2MesY6nBwavZ1Wls/edit#responses

Simulación de paneles fotovoltaicos: análisis térmico y eléctrico basado en techos fríos

H. Coello-Sánchez,^{a*} M. A. Chagolla-Aranda,^a
M. A. Solano-Maya,^a E. J. Moreno-Carpintero,^b
E. Simá-Moo,^a S. López-Salazar^a

Resumen

Este estudio analiza el impacto de la temperatura en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en Zacatepec, Morelos, utilizando el *software* TRNSYS. Se evaluaron recubrimientos de techos fríos (blanco, gris y amarillo) para reducir la temperatura y mejorar la generación de energía. Los resultados mostraron que el recubrimiento blanco fue el más eficaz, logrando una reducción de 8 °C y una generación de entre 36 kWh y 47 kWh. Estos hallazgos destacan la importancia del control térmico en climas cálidos y su relevancia para futuras investigaciones en sostenibilidad.

Palabras clave: techos fríos, fotovoltaico, eficiencia, TRNSYS, rendimiento eléctrico, recubrimiento.

Abstract

This study analyzes the impact of temperature on the efficiency of photovoltaic panels in Zacatepec, Morelos, using the TRNSYS software. Cool roof coatings (white, gray, and yellow) were evaluated to reduce temperature and improve energy generation. The results showed that the white coating was the most effective, achieving an 8 °C reduction and generating between 36 kWh and 47 kWh.

^a TecNM/CENIDET, Departamento de Ingeniería Mecánica, Campus Apatzingán.

^b TecNM / I.T. Zacatepec, Departamento de Ingeniería Electromecánica, Zacatepec.

* Autor de correspondencia: m23ce140@cenidet.tecnm.mx

These findings highlight the importance of thermal control in hot climates and its relevance for future sustainability research.

Keywords: cool roofs, photovoltaic, efficiency, TRNSYS, electrical performance, coating.

Introducción

La búsqueda de soluciones sostenibles para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles es una prioridad global. Uno de los principales retos es la alta intensidad energética de los edificios, que se ha mantenido en 150 kWh/m² en los últimos años (Rosyid et al., 2025). Para alcanzar la neutralidad de carbono, la Agencia Internacional de la Energía plantea reducir esta intensidad en un 35 %, hasta 95 kWh/m² (Hernández-Pérez et al., 2018). En este contexto, las energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica, destaca por la disponibilidad global. La tecnología fotovoltaica convierte directamente la radiación solar en electricidad, un proceso que ha experimentado avances notables en términos de eficiencia y reducción de costos en las últimas décadas (Jamal et al., 2024). Hoy en día, más de dos tercios de la población mundial vive en países donde la energía solar y eólica son las fuentes más competitivas, con una disminución del 94 % en el costo de los paneles en los últimos diez años (Acciona: Business as unusual, 2024). Sin embargo, la eficiencia de estas tecnologías se ve afectada por la temperatura de operación, esto por el aumento de un grado Celsius puede reducir la eficiencia de conversión entre un 0.5 % y un 0.7 %, impactando el rendimiento y vida útil (Valencia-Caballero et al., 2023). Ante este desafío, la instalación de paneles fotovoltaicos sobre techos fríos ha surgido como una alternativa prometedora.

Estudios recientes demuestran que los techos fríos en viviendas pueden generar un ahorro energético entre el 20 % y el 70 % al incrementar el albedo de la superficie (Besir & Cuce, 2018). Asimismo, un estudio sobre los techos verdes ha mostrado reducir el consumo energético entre un 2.2 % y un 16.7 %, con variaciones térmicas de hasta 4 °C en invierno y 12 °C en verano (Rosyid et al., 2025). Investigaciones como la de Rawat & Singh (2022) han evidenciado que

los techos con recubrimiento blanco reducen la temperatura de operación de los paneles fotovoltaicos de 5 % a 7 %, mejorando su desempeño energético (Rawat & Singh, 2022). Para evaluar estrategias de mitigación del sobrecalentamiento de los paneles fotovoltaicos, el *software* TRNSYS permite modelar el comportamiento térmico y eléctrico de estas tecnologías con datos climáticos reales. Este estudio tiene como objetivo simular el comportamiento eléctrico y térmico de un panel fotovoltaico con base en algunas configuraciones de los techos fríos reportados en la literatura. Asimismo, se evalúa la potencia dada, comparando la potencia promedio mensual y la energía producida. Este análisis fomenta al desarrollo sostenible de una de las fuentes de energía más limpias y abundantes disponibles.

Metodología

En esta sección se analizan e interpretan datos climáticos, como temperatura, humedad y radiación solar horizontal, obtenidos de una estación meteorológica. Para las simulaciones, se utiliza el *software* TRNSYS, que modela el comportamiento térmico y eléctrico del sistema. Además, se realiza la validación del modelo comparado con datos experimentales. Finalmente, se ejecutan las simulaciones considerando el efecto de los techos fríos en los paneles fotovoltaicos.

Consideraciones de los techos fríos para las simulaciones

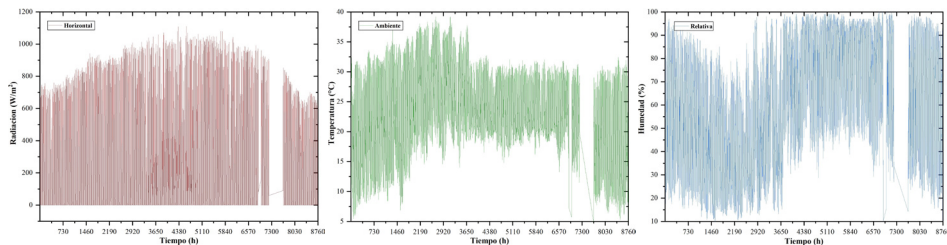
Los techos fríos desempeñan un papel crucial en el control térmico y la protección de los espacios interiores frente a condiciones climáticas adversas. La aplicación de revestimientos en los techos fríos mejora significativamente el desempeño energético y térmico al reflejar la luz solar y mantener temperaturas superficiales más bajas, reduciendo así la carga de refrigeración en los edificios. Estudios como el de Hernández-Pérez et al. (2018) demostraron que techos reflectantes (gris y blanco) redujeron las temperaturas superficiales en 8 °C y 6 °C, respectivamente. Por su parte, Han et al. (2014) analizaron recubrimientos basados en pigmentos de Fe^{3+} dopados con $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$, logrando un color amarillo

brillante con alta reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y una reducción de 4.5 °C en comparación con recubrimientos tradicionales. Esta información sirve como base para la simulación en TRNSYS, al utilizar datos climáticos con el objetivo de evaluar la correlación entre la temperatura operativa del panel fotovoltaico y la potencia generada.

Datos climáticos

En la simulación, se utilizaron datos anuales obtenidos de la estación meteorológica Vaisala MAWS110 instalada en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. La Figura 1 muestra el comportamiento horario de la radiación solar horizontal, temperatura y humedad relativa durante el año 2023. Los picos de radiación solar (900-1100 W/m²) y temperatura (hasta 35 °C) ocurren entre mayo y junio, mientras que de julio a diciembre las temperaturas oscilan entre 15 °C y 20 °C. La humedad relativa se mantiene alta (85 %-96 %) de junio a diciembre, pero disminuye (50 %-80 %) entre febrero y marzo.

Figura 1. Interpretación de datos climáticos: radiación solar horizontal (a), temperatura ambiente (b) y humedad relativa (c)



Estos parámetros son esenciales para modelar el rendimiento del sistema en TRNSYS y evaluar su desempeño en función de la potencia simulada.

Configuración técnica del modelo en TRNSYS

Dentro de la simulación, se consideran variables de entrada, procesamiento de datos y generación de resultados para la interpretación de los mismos. Los datos

climáticos se integran en el Type9a a través de un archivo en formato TXT. Dicho archivo ha sido modificado en la reducción de la temperatura ambiente con base en los datos reportados en trabajos sobre techos fríos. Además, la Tabla 1 muestra las especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico, las cuales se incorporan al Type103b.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico JA Solar JAP60S01-275/sc

Especificación	Valores
Área	1.63 m
Vmax	31.34
Imax	8.77 A
Voc	38.38 V
Isc	9.29 A
α	+0.058 %/ °C
β	-0.330 %/ °C

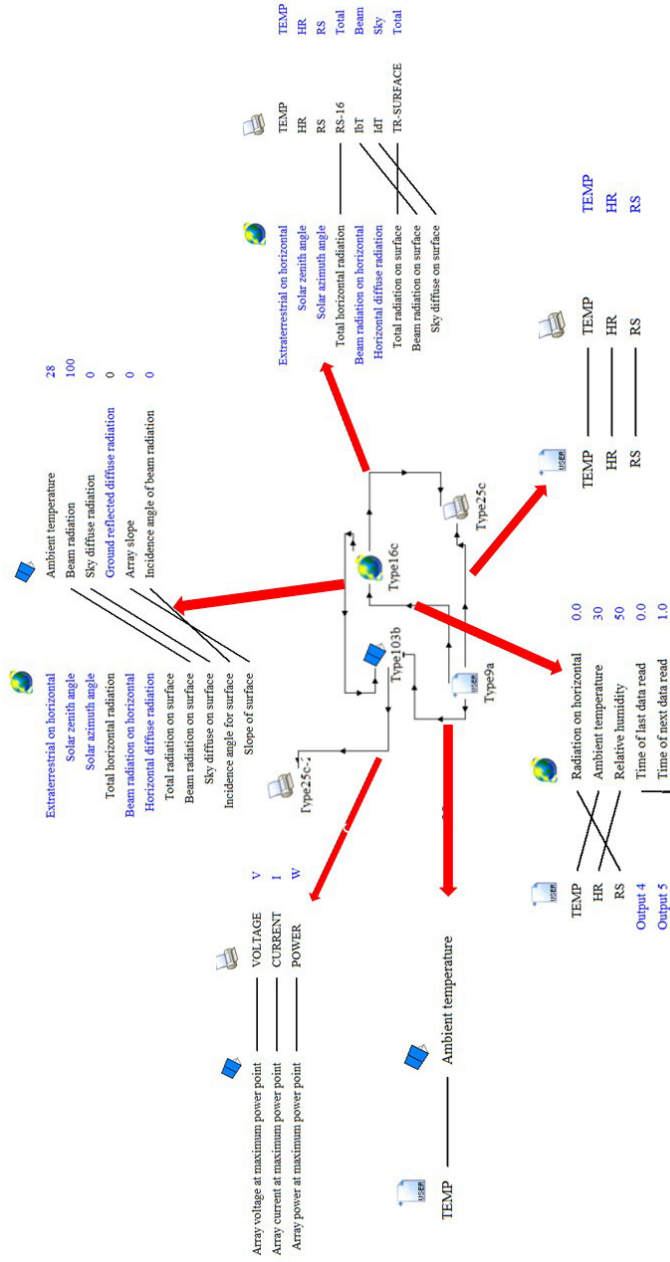
La Figura 2 muestra la configuración de cada uno de los Type. En el procesamiento de datos, el Type16c calcula la radiación incidente sobre el panel en función del ángulo de inclinación, mientras que el Type103b determina parámetros de salida clave, como voltaje, corriente y potencia máxima generada por el panel. Finalmente, el Type25c registra y almacena las variables del sistema a intervalos de tiempo de una hora en un archivo separado por comas (CSV).

Para evaluar la precisión de la simulación, se realizó una validación entre la potencia generada en condiciones reales y la potencia estimada mediante el modelo. Se encontró un buen ajuste entre los datos experimentales y los simulados (Coello-Sánchez et al., 2024).

Resultados

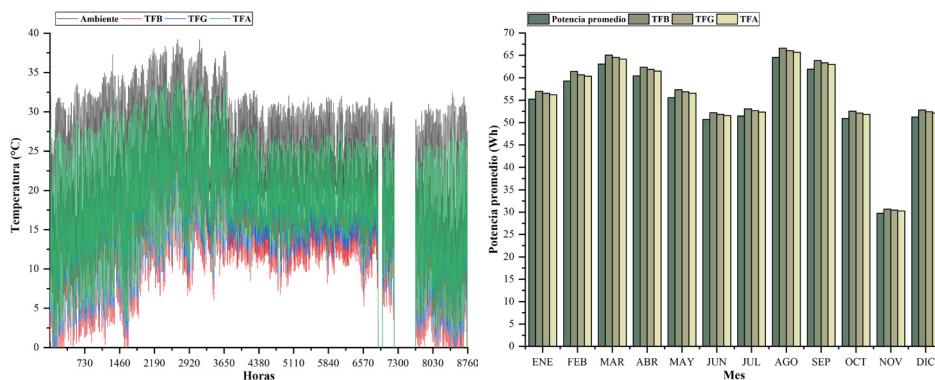
Las simulaciones bajo las configuraciones establecidas en la literatura muestran que la reducción de la temperatura ambiente influye directamente en

Figura 2. Configuración de los diferentes Type



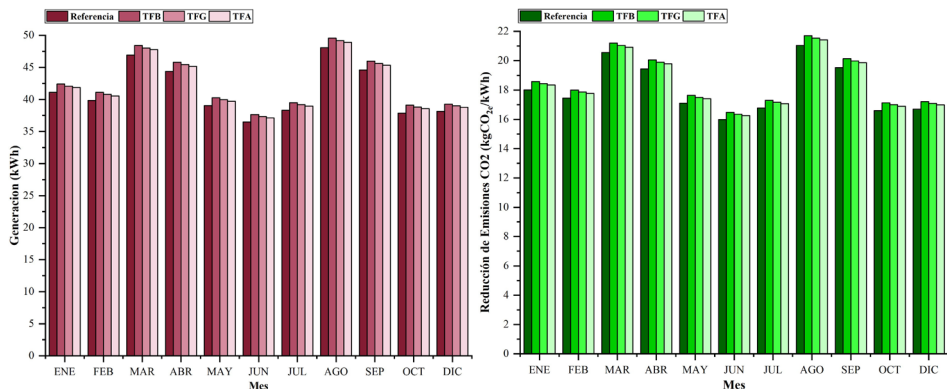
el aumento de la potencia de los paneles fotovoltaicos. La Figura 3 ilustra la variación de la temperatura de referencia y las asociadas a techos fríos con recubrimientos blanco (TFB), gris (TFG) y amarillo (TFA), junto con el análisis comparativo de la potencia promedio mensual durante un año. Entre las metodologías evaluadas, el enfoque TFB destaca por su eficacia, logrando un incremento de potencia entre 55.3 Wh y 63.1 Wh durante el periodo anual de simulación.

Figura 3. Comparación de la temperatura reducida (a) y comparación de la potencia promedio mensual (b)



De igual forma, la Figura 4, sección a, muestra la comparación de la generación eléctrica mensual dada por el panel fotovoltaico. Cabe resaltar que, en los meses de marzo, abril, agosto y septiembre, la generación eléctrica se mantiene entre 45 kWh y 48 kWh, mientras que en los meses restantes existe menor generación, la cual oscila entre 37 kWh y 42 kWh. Asimismo, se realizó el cálculo de toneladas de CO₂ evitadas con respecto al factor de emisión reportado por la CRE (2023) que es de 0.438 tCO₂e/MWh. La sección b presenta la comparativa de la reducción de emisiones de CO₂ calculadas en función de la generación de energía eléctrica: en los meses de enero, febrero, mayo, junio, julio, octubre y diciembre, las emisiones se encuentran entre 17 kgCO₂e/kWh y 18.2 kgCO₂e/kWh, mientras que en los meses restantes oscilan entre 20 kgCO₂e/kWh y 23 kgCO₂e/kWh.

Figura 4. Comparación de la energía eléctrica generada (a) y reducción de emisiones de CO₂ durante las simulaciones (b)



Conclusiones

Los sistemas TFB demostraron un incremento en la potencia eléctrica, alcanzando valores entre 55.3 Wh y 63.1 Wh. De manera similar, los sistemas TFG y TFA registraron rangos de potencia de 52.1 Wh a 60.3 Wh, aproximadamente. La producción eléctrica mensual osciló entre 32 kWh y 48 kWh durante los meses de marzo, abril, agosto y septiembre en los tres casos de estudio. Asimismo, se observó una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero, con valores comprendidos entre 17 kgCO₂e/kWh y 23 kgCO₂e/kWh. Estos resultados evidencian el potencial de los sistemas fotovoltaicos para optimizar la eficiencia energética, disminuir las emisiones de carbono y respaldar políticas sostenibles dirigidas a la mitigación del cambio climático.

Referencias

- Acciona: Business as unusual. (2024). Página principal. <https://www.acciona-mx.com>
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915-939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>

- Coello-Sánchez, H., Chagolla-Aranda, M. A., Chagolla-Gaona, M. A., Moreno-Carpintero, E. J., Simá-Moo, E., & López Salazar, S. (2024). Comparative thermoelectric analysis of photovoltaic panels in warm climates with a focus on cooling techniques. *Tecnología y Ciencia Aplicada*, 7(2), 43-48.
- Han, A., Ye, M., Liu, L., Feng, W., & Zhao, M. (2014). Estimating thermal performance of cool coatings colored with high near-infrared reflective inorganic pigments: Iron doped La₂Mo₂O₇ compounds. *Energy and Buildings*, 84, 698-703. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.024>
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., & Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158, 569-579. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>
- Jamal, J., Mansur, I., Rasid, A., Mulyadi, M., Dihyah Marwan, M., & Marwan, M. (2024). Evaluating the shading effect of photovoltaic panels to optimize the performance ratio of a solar power system. *Results in Engineering*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101878>
- Rawat, M., & Singh, R. N. (2022). A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*, 3(3), 327-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>
- Rosyid, O. A., Sibagariang, Y. P., Sudrajat, A., Hasan, M., Lande, N. M., Priyadi, A., Faradilla, A., Hartadhi, Sunarna, S., & Ambarita, H. (2025). Effects of cleaning interval of PV module and pyranometer on PV system performances in tropical climate of Indonesia. *Results in Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103959>
- Valencia-Caballero, D., Bouchakour, S., Luna, A., Garcia-Marco, B., Huidobro, A., Flores-Abascal, I., Sanz, A., & Román, E. (2023). Experimental energy performance assessment of a bifacial photovoltaic system and effect of cool roof coating. *Journal of Building Engineering*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108009>

Instrumentación y control de un intercambiador de tubos concéntricos para flujo paralelo y a contracorriente

Mauricio Mejía Zamora,^a Víctor Zezatti Flores,^{b*}

Erick Omar Castañeda Magadán,^a Miriam

Navarrete Procopio,^a Ángel Tlatelpa Becerro^c

Resumen

El presente proyecto se desarrolló con el fin de estudiar las variables de proceso que influyen para generar la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Las pruebas experimentales de este equipo térmico se realizaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos con una configuración de flujo paralelo y a contracorriente instrumentando y controlando las principales variables de proceso flujo y temperatura. Se incorporaron sistemas de adquisición de datos y *software* para su monitoreo en tiempo real.

Palabras clave: intercambiador de calor, termodinámica, mecanismo de transferencia de calor, contraflujo, flujo paralelo.

Abstract

This project was developed to study the process variables that influence the generation of heat transfer in a concentric tube heat exchanger. The experimental tests of this thermal equipment took place in the Laboratory of Unit Operations at the Autonomous University of the State of Morelos with a parallel

^a Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: zezatti@uaem.mx

and countercurrent flow configuration, instrumenting and controlling the main process variables flow and temperature. Data acquisition systems and software for real-time monitoring were incorporated.

Keywords: heat exchanger, thermodynamics, heat transfer mechanism, counterflow, parallel flow.

Introducción

La transferencia de calor es uno de los campos de la ingeniería mecánica de mayor aplicación en la industria, el cual es implementado en diferentes áreas mediante el uso de varios equipos térmicos (Thulukkanam, 2024), en especial intercambiadores de calor. En estos, dos fluidos separados por una barrera intercambian energía en forma de calor en un determinado proceso (Ciarffarafa & Stickland, 2019).

Existen varios tipos de intercambiadores de calor, los cuales varían dependiendo la configuración geométrica del flujo y su tipo de construcción. Algunos son intercambiadores de tubos concéntricos, de carcasa y tubos, de placas, de tubo espiral, entre otros (Bandeira, Pachekoski & Mikowski, 2020; Martínez, 2011). Para el estudio termodinámico de este trabajo se utilizó un intercambiador de tubos concéntricos (ICTC). En este tipo de dispositivo, el fluido caliente pierde calor al entrar en el intercambiador por el tubo interno, y el fluido frío adquiere calor pasando por la sección anular, comúnmente conocida como encamisado. Para este diseño de intercambiador existen dos posibles configuraciones de flujos que se pueden utilizar: en paralelo y en contracorriente o contraflujo (Guillén Cruz, 2014; León Morales & Zurita Moncada, 2021). Los intercambiadores de tubos concéntricos representan una configuración sencilla y efectiva que es ampliamente utilizada tanto en aplicaciones industriales como en la enseñanza de la termodinámica (Rivera, Bravo & Hernández, 2005).

Planteamiento del problema

El presente proyecto se desarrolló con el fin de estudiar las variables de proceso que influyen para generar la transferencia de calor en un intercambiador

de calor de tubos concéntricos. Se realizaron pruebas experimentales en este equipo térmico en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Se empleó una configuración de flujo paralelo y a contracorriente, además que se implementaron dispositivos electrónicos para instrumentar y mantener un control preciso sobre las variables independientes que interactúan en este mecanismo de calor.

Uno de los desafíos más comunes en el ámbito educativo es lograr que los estudiantes comprendan cómo los principios teóricos de la transferencia de calor se aplican en situaciones prácticas. Muchas veces, la enseñanza de estos conceptos se limita a explicaciones teóricas o simulaciones virtuales, lo que puede dificultar la comprensión profunda de los fenómenos. La falta de herramientas didácticas que permitan experimentar de manera tangible con estos procesos genera un vacío en la formación de los estudiantes, limitando su capacidad para aplicar los conocimientos adquiridos a problemas reales. Un intercambiador de tubos concéntricos a escala laboratorio representa una solución potencial para este problema. Este equipo no solo es accesible en términos de diseño y costo, sino que también permite estudiar de manera directa los principios fundamentales de la transferencia de calor, como el flujo paralelo y el contraflujo, el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor y la eficiencia del intercambio térmico. Además, este tipo de dispositivo puede adaptarse fácilmente a diferentes condiciones operativas, facilitando un aprendizaje más dinámico y personalizado.

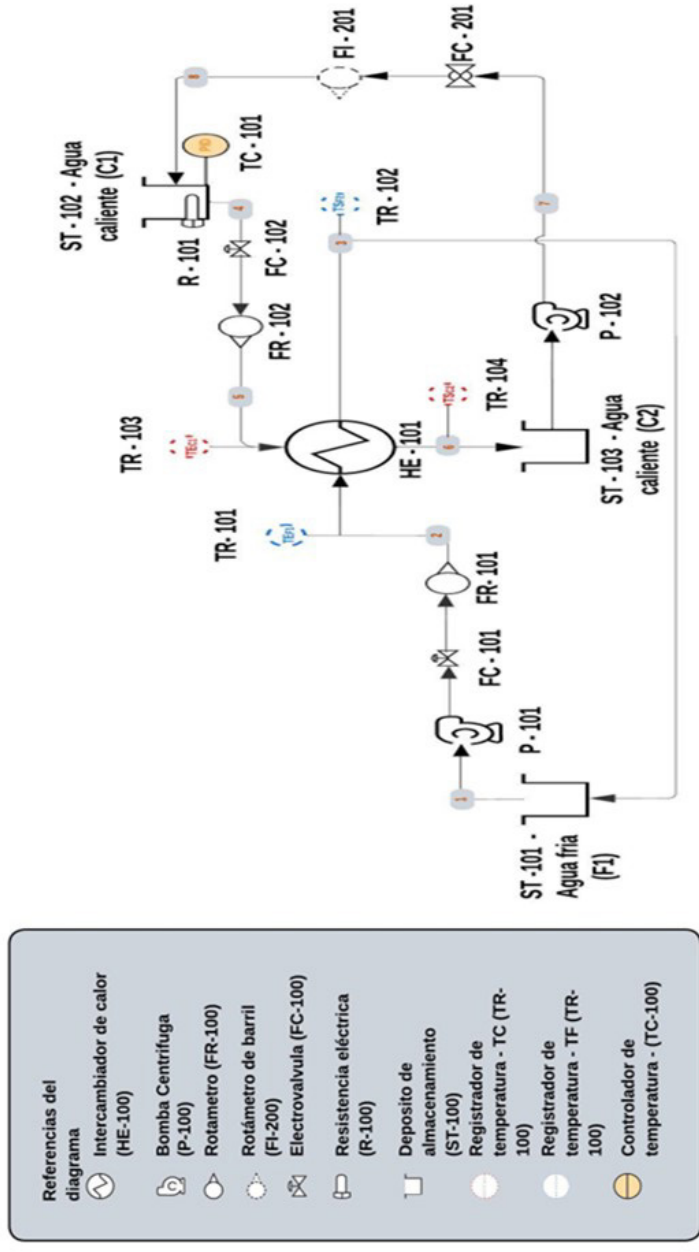
Materiales y metodología

Descripción del sistema

En el diagrama de tuberías e instrumentación (Figura 1) se observa el mecanismo de transferencia de calor del equipo térmico (ICTC).

Este proceso comienza con la distribución de los fluidos de trabajo al ICTC. Para ello, ambos fluidos se almacenan en depósitos de acrílico. Para los fluidos, se optó por utilizar agua tanto para el fluido frío como para el fluido caliente.

Figura. 1 Diagrama de tubería e instrumentación del mecanismo de transferencia de calor en un ICTC con una configuración de flujos a contracorriente



Para el fluido caliente la temperatura de entrada al ICTC es programada y controlada por un controlador PID (proporcional, integral y derivativo), por lo que su temperatura puede ser configurada según se requiera. Y para el fluido frío la temperatura de entrada al ICTC corresponde a la temperatura ambiente del agua que es suministrada de la red hidráulica al laboratorio.

El proceso inicia con la circulación del fluido frío desde el depósito (ST – 101) hacia la tubería que lo dirige a través de la sección anular (tubo exterior) del ICTC. Para este propósito, se emplea una bomba centrífuga de ½ HP (P – 101). Antes de ingresar al tubo exterior del IC, el fluido pasa por una electroválvula (FC – 101), cuya apertura es controlada por el usuario mediante la variación de un voltaje, lo que permite un control preciso del caudal de entrada. Para verificar que el caudal establecido por el usuario es correcto, el fluido atraviesa un rotámetro (FR – 101), encargado de medir y registrar el valor numérico del caudal.

Antes de la entrada del fluido frío al ICTC, un sensor de temperatura (TR – 101) registra su temperatura inicial. Posteriormente, al salir de la sección anular, otro sensor de temperatura (TR – 102) realiza un nuevo registro. Este proceso es fundamental para monitorear las temperaturas de entrada y salida, asegurando un adecuado intercambio térmico dentro del equipo. Finalmente, el fluido frío recircula a su depósito de almacenamiento (ST – 101).

Para el fluido caliente, la secuencia del proceso es similar. Se inicia con la circulación del fluido almacenado en un depósito de acrílico elevado (ST – 102) hacia la tubería que lo dirige a la entrada del tubo interno del ICTC. A diferencia del fluido frío, el caliente se desplaza aprovechando la fuerza de gravedad, sin necesidad de una bomba centrífuga.

Para lograr un control eficiente en el mecanismo de transferencia de calor de este equipo térmico, es crucial establecer con precisión la temperatura de entrada del fluido caliente. Este control se obtiene mediante una resistencia eléctrica (R – 101) y un controlador de temperatura PID (TC – 101). Este sistema funciona utilizando un sensor (como un termopar) para medir la temperatura y un algoritmo PID (proporcional, integral, derivativo) para ajustar la salida, el cual controla la resistencia eléctrica.

Una vez que el fluido caliente circula por la tubería, al igual que el fluido frío, el usuario debe regular el caudal antes de su ingreso al ICTC. Para ello, se utilizó una electroválvula (FC – 102). Además, el flujo del fluido caliente se monitorea con un rotámetro (FR – 102), encargado de medir y registrar el caudal antes de su entrada al tubo interno del ICTC

El control de temperatura del fluido caliente también se lleva a cabo con sensores de temperatura (TR – 103, TR - 104) ubicados en la entrada y salida del ICTC. Finalmente, el fluido caliente se almacena en un tercer depósito (ST – 103) y, con la ayuda de una válvula esférica (FC – 201), un rotámetro de barril (FI – 201) y una bomba centrífuga de ½ HP (P – 102), el fluido caliente recircula al depósito elevado.

Materiales

Para controlar y monitorear las distintas variables independientes del ICTC, se utilizaron instrumentos electrónicos con la capacidad necesaria para verificar que se cumplan las condiciones establecidas por el usuario al operar el equipo térmico en el laboratorio (Figura 2).

Asimismo, para hacer un control preciso de la variable de temperatura de entrada del fluido caliente en el equipo térmico (ICTC) se utilizó un controlador PID (Figura 3).

Resultados

El producto final obtenido fue un sistema funcional de un intercambiador de calor de tubos concéntricos, diseñado a escala de laboratorio, que permitió analizar y evaluar su desempeño térmico en diversas condiciones operativas. Las contribuciones principales del estudio incluyeron la implementación de un sistema de instrumentación correctamente calibrado para mediciones más precisas, el cual permitió monitorear parámetros claves como temperaturas de entrada y salida y el monitoreo y regulación de caudales. También se implementó el uso de un controlador PID para controlar la temperatura de entrada del fluido

Figura. 2 Diagrama de cableado de todos los instrumentos implementados en el control y monitoreo de las variables de flujo y temperatura que intervienen en el mecanismo de transferencia de calor del ICTC

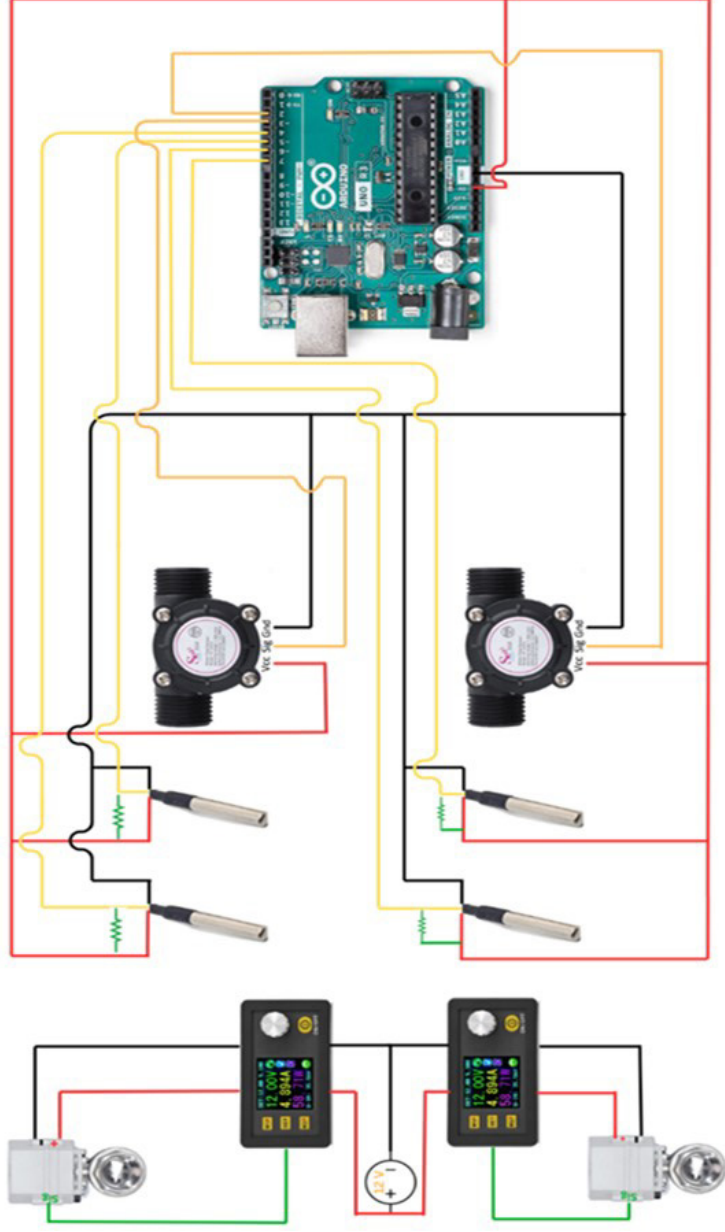
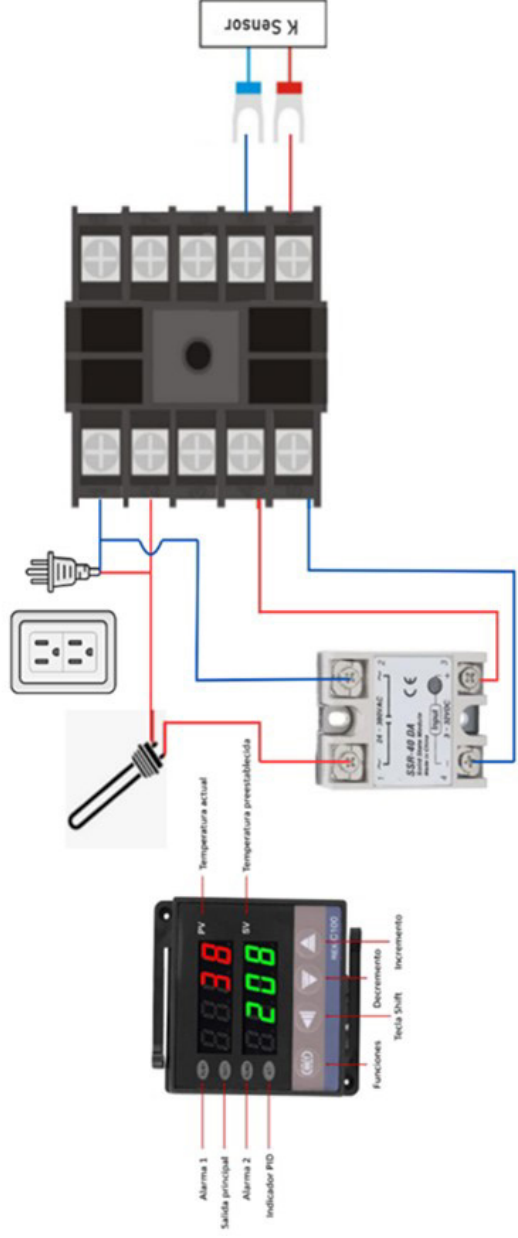
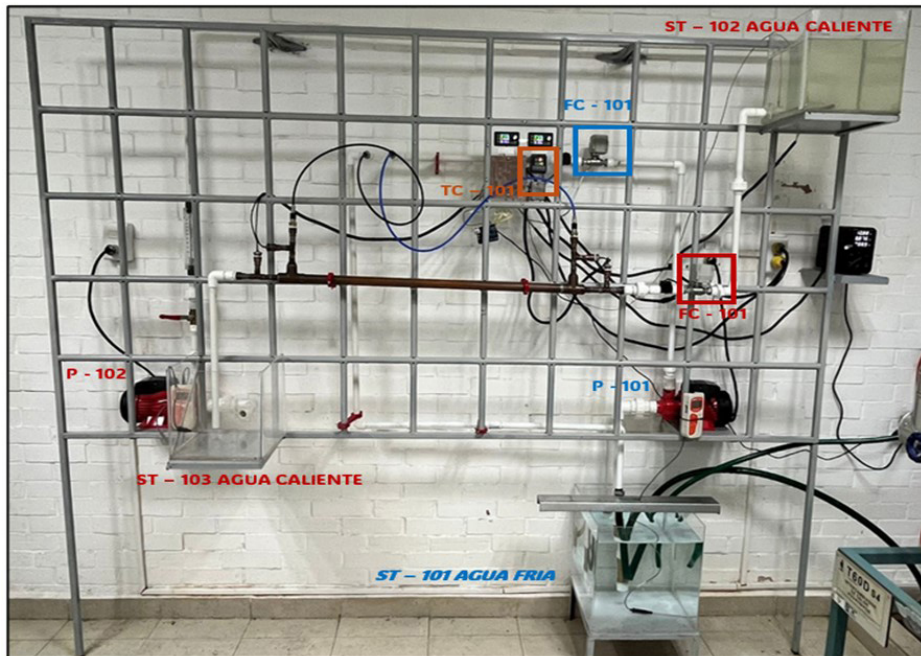


Figura. 3 Diagrama de cableado, sistema de control de temperatura de entrada del fluido caliente del ICTC



caliente según lo requiera el usuario del equipo térmico (Figura 4). Además, el estudio proporcionó una herramienta educativa y de investigación que podrá facilitar la comprensión de los principios termodinámicos aplicados a sistemas de transferencia de calor.

Figura. 4 Sistema completo del banco de pruebas del ICTC a escala laboratorio



Conclusiones

Al implementar en el sistema del ICTC las herramientas de instrumentación y control fue posible optimizar la recolección de datos y mejorar la precisión en los estudios termodinámicos realizados en el laboratorio. Asimismo, la integración de controladores PID permiten ajustar de manera dinámica las condiciones operativas, respondiendo a cambios en las variables de proceso y asegurando que el sistema funcione de manera óptima bajo diferentes condiciones. Incorporar

sistemas de adquisición de datos y *software* permite una supervisión en tiempo real del mecanismo de transferencia de calor.

Por último, una instrumentación adecuada asegura que los resultados obtenidos sean fiables. Esto permite validar ecuaciones de diseño y coeficientes de transferencia térmica. Además, hace posible evaluar y escalar estos resultados a escenarios reales, aunque las condiciones controladas en un laboratorio pueden variar a factores externos que se presentan a nivel industrial.

Referencias

- Bandeira, V. F., Pachekoski, W. M., & Mikowski, A. (2020). Case studies from different types of heat exchangers to plate and shell heat exchanger: a review. *Revista de Engenharia Térmica*, 19(1), 119-125. <https://doi.org/10.5380/reterm.v19i1.76444>
- Ciarffarafa, M., & Stickland, M. (2019). *A heat exchanger* (Patente GB 2571774 B; solicitud PCT/GB2019/050655, wo 2019171079 A1). Oficina de Propiedad Intelectual del Reino Unido y WIPO.
- Guillén Cruz, E. F. (2014). *Diseño y fabricación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos para los Laboratorios de Termo fluidos de la Universidad Santo Tomás*. Tesis de ingeniería, Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- León Morales, D. A., & Zurita Moncada, L. E. (2021). *Modelado térmico de intercambiadores de calor usando hojas de cálculo*. Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21249>
- Martínez, R. C. (2011). Guía para seleccionar intercambiadores de calor. *Tlatemoani: Revista Académica de Investigación*, (6).
- Rivera, M. M., Bravo, R. G., & Hernández, D. M. (2005). *Equipo didáctico para control y monitoreo de temperatura*. En 10th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, de 23 al 27 de julio de 2012, Panamá.
- Thulukkanam, K. (2024). *Heat Exchangers*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003352044>

Sistema de navegación autónoma de robots móviles terrestres basado en visión computacional aérea

Antonio Isaías Martínez Santos,^a Héctor Miguel Buenabad
Arias,^{a*} Roberto Alan Beltrán Vargas,^a Miguel Ángel
Basurto Pensado,^a José Antonio Marbán Salgado,^a Jorge
Arturo Sandoval Espino,^a Diego Hernández Cabrera^a

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un robot terrestre móvil que emplea procesamiento remoto de visión computacional desde un punto de vista aéreo para realizar el rastreo y seguimiento de un objetivo designado. El sistema de procesamiento y control se encarga de extraer datos del entorno y guiar el robot de manera autónoma hacia su objetivo. La comunicación ocurre mediante una conexión inalámbrica LAN, estableciendo una transmisión de comandos eficiente y en tiempo real, además de ajustar su trayectoria en función del movimiento percibido.

Palabras clave: visión computacional, procesamiento remoto, robótica móvil, mecatrónica.

Abstract

This paper presents the development and implementation of a mobile ground robot that employs remote computer vision processing from an aerial perspective to track and follow a designated target. The processing and control system is responsible for extracting data from the environment and autonomously guiding the robot to its target, communicating over a wireless LAN connection,

^a Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

* Autor de correspondencia: hector.buenabad@uaem.mx

establishing an efficient and real-time command transmission, and adjusting its trajectory based on the perceived motion.

Keywords: computer vision, remote processing, mobile robotic, mechatronics.

Introducción

La robótica móvil ha avanzado significativamente en las últimas décadas, ampliando sus aplicaciones en diversos ámbitos, desde robots humanoides y drones hasta sistemas autónomos con capacidad de navegación y toma de decisiones basada en la percepción del entorno (Rubio, Valero & Llopis-Albert, 2019). Para lograr esta autonomía, se emplean diversas técnicas como métodos determinísticos, no determinísticos y evolutivos, en combinación con sensores, actuadores, retroalimentación y visión computacional (Alatise & Hancke, 2020; Pandey, Pandey & Parhi, 2017).

Entre estas tecnologías, la visión computacional destaca por su practicidad en la navegación autónoma, ya que permite la detección y planificación de trayectorias sin necesidad de sensores adicionales (Pandey, Pandey & Parhi, 2017; Yasuda, Martins & Cappabianco, 2020; Pérez et al., 2016). Dependiendo del objetivo, pueden emplearse enfoques basados en visión 3D (Básaca-Preciado et al., 2014), utilizando cámaras de profundidad para mapear el entorno, o en visión 2D, donde la optimización y el ajuste de puntos de referencia permiten extraer información relevante y reducir errores de perspectiva (Mei et al., 2015).

El seguimiento y rastreo de objetivos en movimiento a partir de visión aérea sigue representando un desafío en la navegación autónoma, lo que ha motivado a la exploración de nuevas estrategias para mejorar el posicionamiento y percepción visual del entorno (Dufek, Xiao & Murphy, 2021). Entre estas estrategias, se han propuesto enfoques como la colaboración inteligente entre dispositivos, integrando estimaciones de movimiento y transferencia de información para optimizar la toma de decisiones y la ejecución de tareas (Käslin et al., 2016; Zhang et al., 2018).

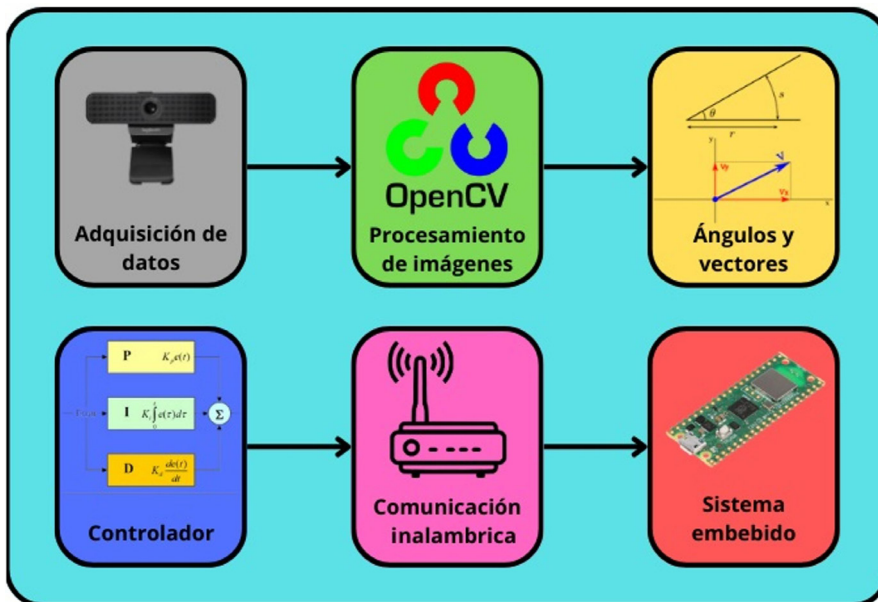
Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema de navegación autónoma, basado exclusivamente en visión computacional desde una perspectiva

top-down (vista aérea), sin el uso de sensores adicionales. El sistema dependerá íntegramente de los datos obtenidos mediante la visión y, a través de cálculos geométricos con vectores y ángulos, junto con un sistema de control clásico, estimará la velocidad y dirección necesarias para seguir el objetivo designado. Este estudio busca evaluar las capacidades y limitaciones de este método en escenarios dinámicos.

Materiales y metodología

Este apartado describe los materiales y métodos empleados en el desarrollo del sistema de navegación autónoma basado en visión computacional. Se presentan los componentes empleados de *software* y *hardware* utilizados, así como el procedimiento seguido para su implementación y pruebas. La Figura 1 muestra la metodología estructurada en una secuencia de etapas, las cuales se detallarán en lo sucesivo.

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de navegación



Herramientas de software y hardware

Para poder realizar este trabajo, como elementos de *software* se requirieron los siguientes: IDLE Python (3.10), Thonny IDE (Micro Python), OpenCV (4.10), Numpy (1.26.4) y un Docker MQTT o Socket TCP/IP.

Por el lado del *hardware*, se trabajó con los siguientes materiales: cámara web genérica (1080p), laptop (Ryzen 5, 12GB RAM, AMD Radeon Vega Graphics, 1TB HDD, 120GB SSD), chasis de robot impreso en PLA (7.3 cm x 7.3 cm x 7 cm), Raspberry Pi Pico W, motores Pololu (3.7V relación 1:50), baterías 3.7V Li-Po 400mAh, tapas con patrón de color (Figura 2), pelota de plástico de 5 cm de radio, router 2.4GHz.

Adquisición de datos

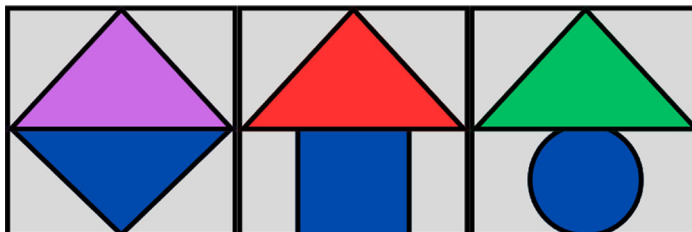
Para lograr la vista *top-down*, se construyó una estructura de 2 m de altura para montar la cámara de manera paralela al área de trabajo. La cámara, una *webcam* genérica de resolución 1080p, está conectada a una laptop que realiza el proceso computacional. Dadas las dimensiones de nuestro robot (menor a 7.5 cm de altura), se optó por una reducción de resolución de imagen a 640 x 480 píxeles mediante *software*. Esto garantiza permitir trabajar con distintos modelos de cámara sin afectar la interpretación de las coordenadas del robot dentro del área de visión, la cual se maximiza gracias a la elevación de la cámara.

Procesamiento de imágenes

En esta etapa, se realiza la interpretación de nuestras tapas con patrones de color. Esto es mediante máscaras en espacio de HSV (matiz, saturación y valor) y detección de figuras geométricas dentro de la máscara, lo que permite identificar el robot, la orientación y el objetivo. Se extraen parámetros clave para el procesamiento matemático posterior; algunas son: área, color, centroides y distancias. Para mejorar el reconocimiento de los patrones de color sin recurrir al *machine learning*, se realiza un tratamiento de la imagen original en una

parametrización de espacio HSL (matiz, saturación e iluminación), lo que permite resaltar puntos de interés. Finalmente, se generan vectores entre el robot y el objetivo, los cuales se utilizarán en la siguiente etapa.

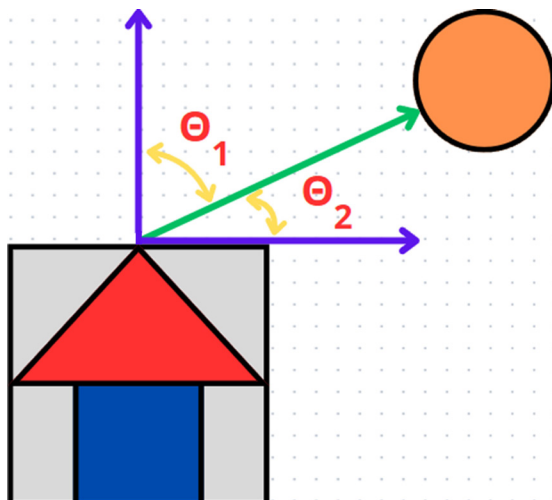
Figura 2. Patrones de color utilizados para las pruebas



Ángulos y vectores

Una vez extraídos y almacenados los datos de interés en las etapas anteriores, se utilizan los vectores obtenidos para determinar la dirección de movimiento del robot. Para ello, se aplica el producto punto entre los vectores de referencia, lo que permite inferir la relación angular entre el robot y su objetivo (Figura 3).

Figura 3. Relación angular entre el robot y el objetivo



Esta inferencia es fundamental para entregarse al sistema de control y poder asegurar un seguimiento estable y preciso del objetivo.

Controlador

Para gestionar las velocidades del robot, se optó por un controlador del tipo PI (proporcional-integrador), dado que no se cuenta con *encoders* en los motores y, por lo tanto, no hay retroalimentación directa del dispositivo. Para mitigar los efectos de acumulación de error en el término integrador, se implementó una técnica anti *wind-up*, evitando sobresaturaciones e inestabilidad en la respuesta. Cabe destacar que la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) generada por el controlador se sigue de manera remota en el computador.

Comunicación inalámbrica

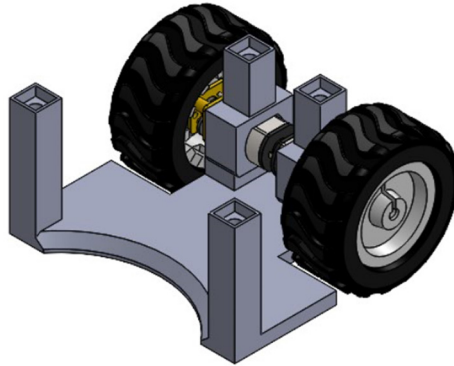
Para esta sección, se realizaron pruebas mediante dos protocolos de comunicación: TCP/IP y MQTT, seleccionados por su rápida transmisión de datos, su eficiente empaquetado de datos y su capacidad de minimizar pérdidas, interferencias y ruidos en la señal. La red LAN se estableció mediante un *router* de señal de 2.4 GHz, garantizando una cobertura adecuada para la comunicación.

El mensaje enviado al sistema embebido incluye tres parámetros: PWM, dirección y un identificador adicional, el cual permite gestionar la operación de múltiples robots en caso de ser necesario.

Sistema embebido

El sistema embebido es responsable de recibir, interpretar y ejecutar los comandos enviados. Para ello, se implementó una programación en MicroPython, donde el mensaje recibido es desempaquetado, además de los valores asignados a los motores.

Figura 4. Diseño del robot a utilizar

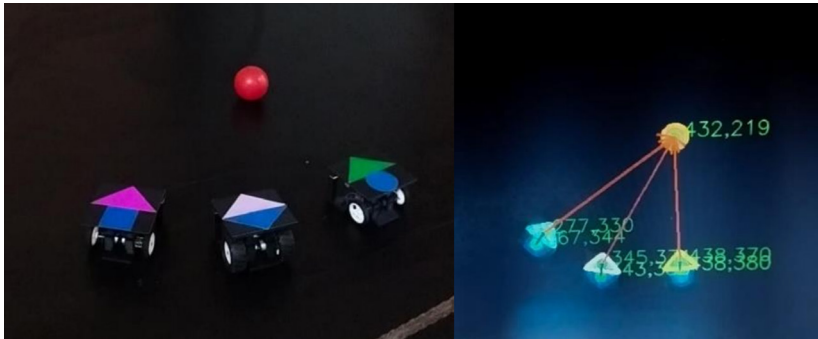


Los motores operan a una frecuencia de PWM fija, la cual también puede ajustarse si es necesario, dependiendo del entorno o las características del *hardware* (Figura 4) utilizado.

Resultados

Se realizaron pruebas sobre superficies de tonalidades oscuras, tanto mate como

Figura 5. Robots colocados en la pista y trayectorias generadas



brillosas, con dimensiones de 1.5 m x 2.5 m como área de trabajo. Dejando caer la bola sobre la superficie para que comenzara a rodar, mientras que el robot

comenzaba el seguimiento una vez detectase el objetivo. En la Figura 5 se muestra la visualización de trayectoria con más de un robot.

Para evaluar el desempeño del sistema, se realizaron pruebas de búsqueda y seguimiento con diferentes condiciones iniciales del objetivo. En la Tabla 1 se presentan los tiempos registrados, considerando un límite de PWM de 150 y una frecuencia de operación del motor de 1.1 kHz.

Tabla 1. Resultados de las pruebas realizadas

Distancia (cm)	Estado del objetivo	Posición inicial del robot	Tiempo en alcanzar el objetivo (segundos)
30	Estático	Espaldas al objetivo	3
30	Movimiento lento	Espaldas al objetivo	8-12
30	Movimiento rápido	Espaldas al objetivo	>30

Los resultados muestran que el robot fue capaz de alcanzar el objetivo de manera efectiva, cuando este permanecía estático o tenía una velocidad baja, como en el caso del movimiento inicial tras la caída. Sin embargo, cuando la bola adquiría mayor velocidad después de un impacto o rebote, se presentaron dificultades para completar la trayectoria correctamente y llegar al objetivo. En estas condiciones, el robot lograba seguir la dirección general del objetivo, pero no conseguía alcanzarlo con precisión.

Conclusiones

El presente sistema de navegación logró identificar y seguir el objetivo designado bajo pruebas controladas. Sin embargo, al aumentar la velocidad del objetivo, el robot no logra llegar adecuadamente a su objetivo, hasta que este último disminuía su velocidad. A pesar de esto, la recomposición de la trayectoria sí se realizó de manera adecuada. Esta limitación se puede asociar a diversos factores, como la velocidad máxima de los actuadores o la resolución temporal del sistema de visión. De esta manera, el sistema demostró funcionar adecuadamente

para objetivos cuyo movimiento disminuye, pero no es adecuado para objetivos con altas velocidades constantes ni con aceleración creciente.

Referencias

- Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE Access*, 8, 39830-39846. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643>
- Básaca-Preciado, L. C., Sergiyenko, O. Y., Rodríguez-Quinonez, J. C., García, X., Tyrsa, V. V., Rivas-Lopez, M., ... & Starostenko, O. (2014). Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.005>
- Dufek, J., Xiao, X., & Murphy, R. R. (2021). Best viewpoints for external robots or sensors assisting other robots. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 51(4), 324-334. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.10452>
- Käslin, R., Fankhauser, P., Stumm, E., Taylor, Z., Mueggler, E., Delmerico, J., ... & Hutter, M. (2016, octubre). Collaborative localization of aerial and ground robots through elevation maps. En 2016 *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 284-290). IEEE.
- Mei, B., Zhu, W., Yuan, K., & Ke, Y. (2015). Robot base frame calibration with a 2D vision system for mobile robotic drilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1903-1917. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7031-4>
- Pandey, A., Pandey, S., & Parhi, D. R. (2017). Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review. *International Robotics & Automation Journal*, 2(3), 96-105. <https://doi.org/10.15406/iratj.2017.02.00023>
- Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., & García, D. F. (2016). Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review. *Sensors*, 16(3), 335. <https://doi.org/10.3390/s16030335>

- Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2). <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>
- Yasuda, Y. D., Martins, L. E. G., & Cappabianco, F. A. (2020). Autonomous visual navigation for mobile robots: A systematic literature review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(1), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3368961>
- Zhang, J., Liu, R., Yin, K., Wang, Z., Gui, M., & Chen, S. (2018). Intelligent collaborative localization among air-ground robots for industrial environment perception. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(12), 9673-9681. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2880727>

Evaluación termodinámica de un ciclo Rankine orgánico acoplado a colectores Fresnel para producción de 1 kW de electricidad y de calor para procesos

O. A. Jaramillo,^a Laura Castro,^b J. C. Garcia,^{b*}
Agustín Moisés Alcaraz-Calderón^c

Resumen

En este trabajo se realiza la evaluación termodinámica de un ciclo Rankine orgánico (ORC) acoplado a un conjunto de tres colectores lineales Fresnel (CLF) de 23 m² de área de apertura. El sistema está diseñado para que trabajen en dos circuitos: un circuito para los CLF, donde el fluido de trabajo es agua presurizada a 7 bar, y el otro circuito es el ORC donde el fluido de trabajo es el refrigerante R245fa y se presuriza hasta 4 bar. Este diseño, desde el punto de vista termodinámico, puede obtener 1.21 kW de electricidad y además proporciona 225.62 MJ/día de energía térmica para aplicarse en procesos térmicos urbanos o industriales.

Palabras clave: colector solar, Fresnel, ORC, Rankine Orgánico, electricidad, renovable.

Abstract

This work carries out the thermodynamic evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) coupled to a set of three Linear Fresnel Collectors (LFC) with a 23 m² aperture area. The system is designed to operate in two loops: one loop for the

^a Instituto de Energías Renovables, UNAM.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

^c Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

* Autor de correspondencia: jcgarcia@uaem.mx

LFCs, where the working fluid is pressurized water at 7 bar, and the other loop is the ORC, where the working fluid is the refrigerant R245fa, pressurized up to 4 bar. From a thermodynamic perspective, this design can generate 1.21 kW of electricity and provides 225.62 MJ/day of thermal energy to be applied in urban or industrial thermal processes.

Keywords: solar collector, Fresnel, ORC, Organic Rankine Cycle, electricity, renewable.

Introducción

Un ciclo Rankine orgánico (ORC) utiliza sustancias orgánicas como fluido de trabajo y se puede aplicar para generar electricidad, cuando la cantidad de calor disponible no permite usar agua como fluido de trabajo. Entre las fuentes de calor que se pueden acoplar a los ORC, se encuentran las fuentes fototérmicas (Caldiño-Herrera, Castro et al., 2017; Caldiño Herrera, García et al., 2021), las cuales pueden utilizar colectores solares parabólicos (CSP) o colectores lineales Fresnel (CLF).

Los LFC, en comparación con los CSP, son de fácil instalación, su estructura es sencilla, tienen una adecuada eficiencia óptica, sus diseños son flexibles y poseen la posibilidad de generar vapor en un rango de 80 a 400 °C, lo cual los hace competitivos para aplicaciones en comunidades rurales frente a los colectores parabólicos (PTC) o colectores de tubos evacuados (ETC) (Thomas et al., 2025). Uno de los problemas que enfrenta el diseño de un LFC es el sombreado entre sus espejos continuos, por lo cual se requiere tener suficiente espacio entre ellos, además de altura para colocar al receptor.

En este trabajo, se realiza la evaluación termodinámica de un ORC acoplado a colectores Fresnel para producción de 1 kW de electricidad y calor para procesos. Se utiliza el *software* Octave para realizar los cálculos y CoolProp para determinar las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo durante las diferentes etapas del proceso. Este ORC puede trabajar por 8.17 horas al día, proporcionando 1.21 kW de electricidad, y los CLF, en adición, pueden proporcionar 225.62 MJ/día de energía térmica disponible para aplicarse en procesos térmicos.

Materiales y metodología

El análisis termodinámico se realiza en un campo fototérmico acoplado a un ORC. El campo fototérmico está compuesto de tres CLF basados en un colector modelo LF-11 (Industrial Solar GmbH, s. f.; Almeida, Burin & Bazzo, 2018; Haagen et al., 2015). Las características técnicas del CLF se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas del CLF (basado en un CLF-11)

Condición o característica	Descripción o capacidad
Temperatura máxima de funcionamiento	673 K
Superficie por cada reflector	23 m ²
Pérdida térmica por área de reflector primario	$u1 = 0.032913 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ $u4 = 1.4838 \times 10^{-9} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
Potencia térmica máxima	454 W/m ² (por superficie total de instalación)

El diagrama de flujo del acoplamiento campo CLF-ORC se muestra en la Figura 1. El sistema CLF-ORC está compuesto por dos circuitos: el CLF y el ORC. Las características principales del circuito CLF se muestran en la Tabla 2, mientras que la Tabla 3 muestra las características principales del ORC. En la Figura 1 se muestra que el circuito fototérmico está compuesto de tres CLF, un termotanque para almacenar el fluido de trabajo (cuando no tiene la carga térmica necesaria para operar el ORC o cuando tiene un excedente de carga térmica) y de dos intercambiadores de calor (HE1 para transferir la carga térmica al ORC y HE2 para transferir energía a algún proceso que requiera agua caliente). Debido a que el circuito fototérmico se encuentra presurizado a 7 bar, el fluido de trabajo (agua líquida) puede tener una temperatura de 423 K sin cambiar de fase, ya que su temperatura de saturación, para esa presión, es de 438 K. El ORC está compuesto también de dos intercambiadores de calor (HE1 y HE3, este último es para ceder calor a algún proceso que requiera calor), el fluido de trabajo es refrigerante R245fa y contiene una bomba para incrementar la presión a 4 bar.

Figura 1. Diagrama de flujo para sistema ORC 1kW acoplado a FLC

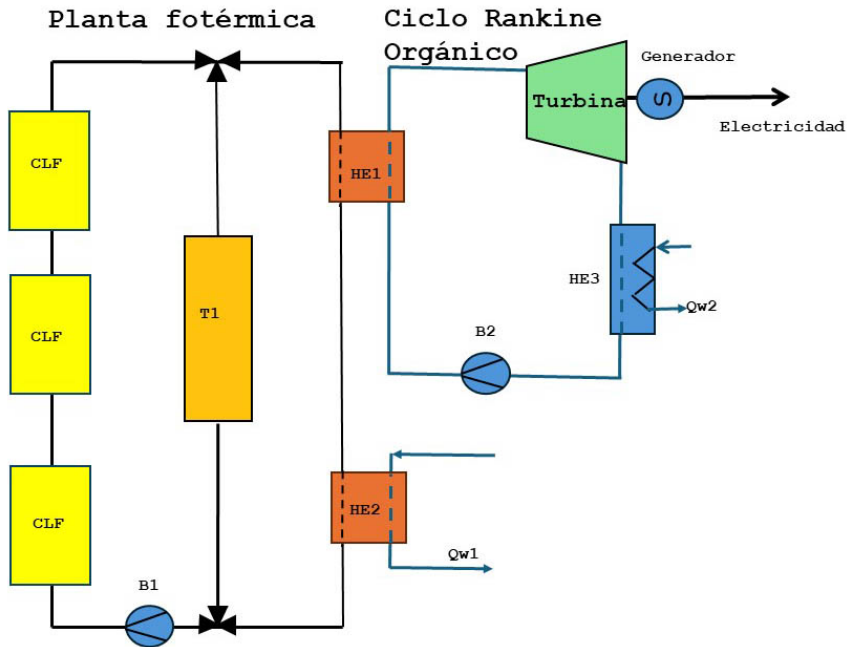


Tabla 2. Condiciones generales de operación del circuito fototérmico

Condición	Descripción o capacidad
Carga térmica que entrega (el CLF) a intercambiador de calor HE1	18 kW
Flujo másico $\dot{W}_b$ de agua caliente en intercambiador de calor HE1	0.035 kg/s
Eficiencia de intercambiadores de calor HE1 y HE2	0.85
Temperatura de agua en entrada de concentradores solares CLF	303 K
Temperatura de agua en salida de concentradores solares	423 K
Presión del circuito fototérmico	7 bar

Tabla 3. Condiciones generales de operación del circuito ORC

Condición	Descripción o capacidad
Flujo másico de refrigerante R245fa	0.06 kg/s
Temperatura de agua en entrada bomba	303 K
Temperatura de agua en salida de intercambiador de calor HE1	379.93 K
Presión en entrada de la bomba	1.78 bar
Presión de salida de la bomba	7.12 bar
Eficiencia de la turbina ORC	0.7
Eficiencia de la bomba ORC	0.5

Las condiciones generales de operación del circuito ORC se definen como se muestra en la Tabla 3. De la misma forma que en la Tabla 2, estos pueden cambiar de acuerdo con los requerimientos que se definan como entrada en los programas numéricos que se implementaron en este trabajo.

Las condiciones y componentes del ORC acoplado al CLF se determinaron tomando en consideración que será un banco experimental. Los datos que se muestran son el resultado de la evaluación termodinámica con programas numéricos desarrollados en Octave y CoolProp.

Para la fuente fototérmica se usaron las siguientes ecuaciones: la carga térmica Q_u obtenida de la radiación incidente en la superficie de los espejos del CLF se calcula con la ecuación (1):

$$Q_u = \eta_{th} * A_a * DNI \quad (1)$$

Donde A_a es la superficie total de los espejos del CLF y DNI es la irradiancia directa normal. La eficiencia térmica η_{th} es la razón de la energía transferida al fluido de trabajo con respecto a la radiación incidente en la superficie de la superficie de los espejos del colector frenal.

El incremento de temperatura en el fluido de trabajo producida por el LFC se puede calcular con:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico del refrigerante R245fa, C_p su capacidad calorífica promedio, T_o y T_i sus temperaturas de entrada y salida.

En el caso del circuito ORC, CoolProp permite conocer el estado termodinámico de una sustancia de su base de datos, conociendo dos de sus propiedades del estado termodinámico:

$$[x, y] = CoolProp(T_a, P_a) \quad (3)$$

Para este ORC, se empieza con el estado de la sustancia orgánica en la entrada de la bomba, líquido saturado a $T_1 = 303$ K y $P_1 = 178$ kPa, y el estado termodinámico se determina con:

$$[h_a, s_a, \rho_a] = CoolProp(T_a, P_a) \quad (4)$$

La presión a la salida P_b de la bomba se determina como:

$$P_b = P_a P_R \quad (5)$$

Donde P_R es el incremento de presión provocado por la bomba y P_a representa la eficiencia de la bomba.

La entalpía a la salida de la bomba es:

$$h_{bs} = CoolProp(P_b, s_a) \quad (6)$$

Si se toma en consideración la eficiencia isentrópica, entonces la entalpía a la salida de la bomba es:

$$h_{bs} = h_a + \eta_{is} (h_{bis} - h_a) \quad (7)$$

Con estas propiedades, se determinan las demás variables termodinámicas a la salida de la bomba:

$$[T_b, \rho_b, s_b] = CoolProp(P_b, h_b) \quad (8)$$

Para el proceso de evaporación, se utiliza la carga térmica disponible por la fuente fototérmica:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ORC} (h_c - h_b) \quad (9)$$

El proceso de evaporación se considera isobárico, así que una vez calculada h_c , se determina el estado termodinámico en la entrada de la turbina:

$$[T_c, \rho_c, s_c] = CoolProp(P_c, h_c) \quad (10)$$

El estado termodinámico a la salida de la turbina se determina con la razón de expansión y la eficiencia isentrópica. La entalpía a la salida de la turbina es:

$$h_{dis} = CoolProp(P_d, s_c) \quad (11)$$

$$h_d = h_c - \eta_{turb} (h_c - h_{dis}) \quad (12)$$

El resto de las variables termodinámicas quedan determinadas como:

$$[s_d, T_d, \rho_d] = CoolProp(P_d, h_d) \quad (13)$$

Con esto, el estado termodinámico de las corrientes del ciclo ORC quedan determinados y se calculan la eficiencia térmica η_t , la potencia mecánica $\dot{W}_{turb}$ disponible para la turbina y la eficiencia η_{II} por segunda ley de termodinámica.

$$\eta_t = (h_d - h_a) / (h_c - h_b) \quad (14)$$

$$\eta_{II} = \eta_t / (1 - T_a / T_c) \quad (15)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{ORC} (h_c - h_d) \quad (16)$$

Para calcular la exergía e_i en cada una de las corrientes se usó:

$$e_i = (h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o) \quad (17)$$

Con la equivalencia de $T_o = 24 \text{ °C}$ y $P_o = 1 \text{ bar}$.

Resultados

La Figura 2 muestra la irradiancia solar directa del día 28 de enero de 2025 de la estación de la Red Solarimétrica Mexicana (Red Solarimétrica Mexicana, 2025), ubicada en el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Autónoma Nacional de México, en Temixco, Morelos (latitud $18^\circ 50' 25.62''$ N, longitud $99^\circ 14' 10.49''$ O). Los datos de irradiancia que se muestran en la figura se usaron en los cálculos termodinámicos de este trabajo.

La Figura 3 muestra la variación de la eficiencia del CLF, del flujo de agua, de la energía térmica que proporciona cada CLF y el campo fototérmico. El comportamiento de las cuatro variables es parabólico y se corresponde con el comportamiento de la irradiancia solar. Para la irradiancia del día 28 de enero de 2025, el campo fototérmico puede proporcionar 18 kW desde las 9 horas hasta las 17.17 horas, esto significa que el circuito ORC puede trabajar por 8.17 horas, proporcionando 1.21 kW de electricidad.

La Figura 4 muestra la energía térmica que no se usará en el ORC y que está disponible para el calentamiento de procesos que requieran de energía térmica. Esta energía térmica disponible incluye el agua que no alcanzó la carga térmica requerida por el ORC (ocurre por la mañana o por la tarde) o el equivalente a la carga térmica excedente a la requerida (ocurre cuando la irradiancia es máxima).

La carga térmica que como excedente puede ser almacenada o utilizada para otras aplicaciones que la requieran es de 225.62 MJ/día.

Figura 2. Irradiancia solar directa del día 28 de enero de 2025

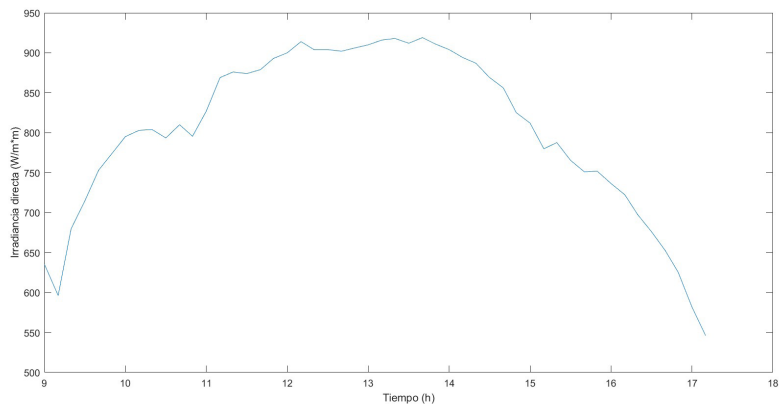


Figura 3. Flujo másico y carga térmica para el campo fototérmico CLF: eficiencia térmica del campo fototérmico CLF en conjunto (a); flujo de agua (b); energía térmica por cada CLF (c), y carga térmica total que puede entregar el campo fototérmico de CLF (d)

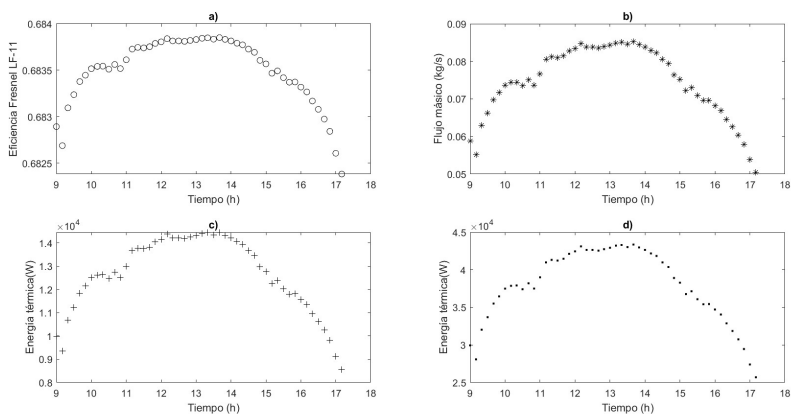
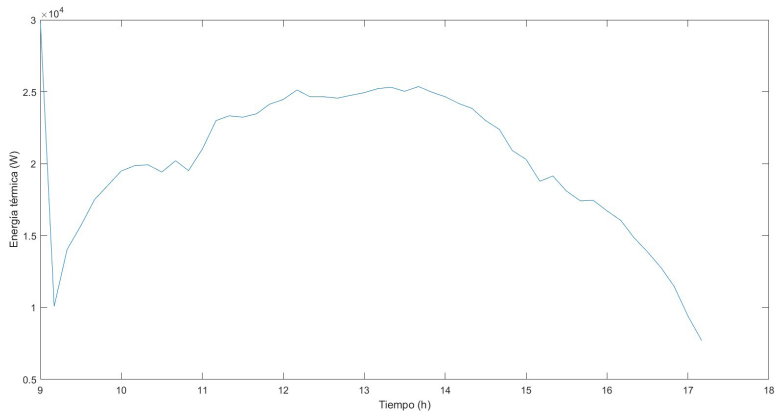
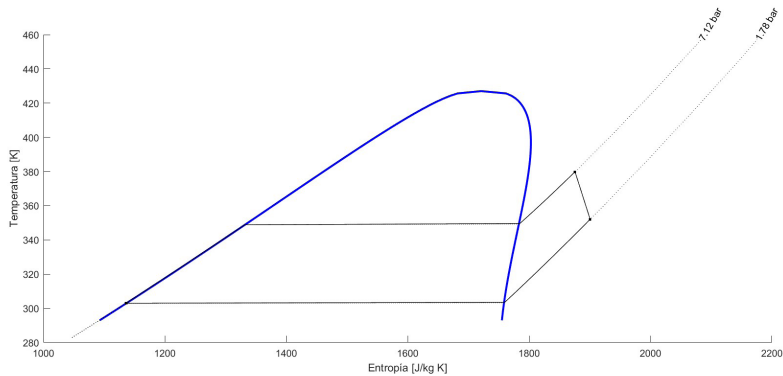


Figura 4. Energía térmica disponible en el campo fototérmico para calentamiento de procesos



El desempeño termodinámico de este ORC es de una potencia producida por la turbina de 1.21 kW, con un flujo de 0.06 kg/s de R245fa, con una eficiencia térmica de 7.83 % y una eficiencia por la segunda ley de la termodinámica de 38.67 %. La Figura 5 muestra las curvas de saturación para el R245fa en el ORC.

Figura 5. Curvas de saturación para R245fa en el ORC



Conclusiones

En este estudio, se presenta la evaluación termodinámica de un ORC acoplado a un campo fototérmico constituido de tres CLF para producir 1.21 kW de electricidad y, además, obtener una carga térmica de 225.62 MJ/día, aprovechable en diversas aplicaciones que van desde calentar agua para aplicaciones domésticas hasta para algunos procesos urbanos. El área total de recepción de la energía solar del campo fototérmico para esta aplicación es pequeña (69 m² para tres CLF de 23 m²); por lo cual, este tipo de colectores podrían ser instalados en el techo de alguna casas o de edificios públicos.

Los resultados obtenidos muestran que este sistema puede operar durante 8.17 horas diarias, aprovechando la irradiancia solar desde las 9 a las 17.17 horas, generando tanto electricidad como calor residual disponible para otros procesos. La eficiencia térmica promedio del campo fototérmico es de 0.683, mientras que la eficiencia del ORC es del 0.0783, lo que muestra el potencial de estos sistemas para el aprovechamiento de la energía solar.

Referencias

- Almeida, T. G., Burin, E., & Bazzo, E. (2018). Solar energy as an alternative to partially supply the steam and the hot water demands of a poultry slaughterhouse. En *ECOS 2018 - Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2018*.
- Caldiño Herrera, U., García, J. C., Sierra-Espinosa, F. Z., Rodríguez, J. A., Jaramillo, O. A., Santiago, O. de, & Tilvaldiev S. (2021). Enhanced thermal efficiency organic Rankine cycle for renewable power generation. *Applied Thermal Engineering*, 189, 116706. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116706>
- Caldiño-Herrera, U., Castro, L., Jaramillo, O. A., Garcia, J. C., Urquiza, G., & Flores, F. (2017). Small organic Rankine cycle coupled to parabolic

- trough solar concentrator. *Energy Procedia*, 129, 700-707. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.097>
- Haagen, M., Zahler, C., Zimmermann, E., & Al-Najami, M. M. R. (2015). Solar process steam for pharmaceutical industry in Jordan. *Energy Procedia*, 70, 621-625. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.169>
- Industrial Solar GmbH. (S. f.). *Fresnel Collector LF-11 Datasheet*. <https://mb.cision.com/Public/17705/3013997/8f88fef06bc27025.pdf>
- Red Solarimétrica Mexicana. (2025, 5 de febrero). <http://esolmetdata.ier.unam.mx/Esolmet2/index.html>
- Thomas, S. J., Sahoo, S. S., Thomas, S., Kumar G, A., & Awad, M. M. (2025). A review on Linear Fresnel Reflector (LFR) as a solar line concentrator in polygeneration for low-medium temperature applications among the rural livelihoods. *Energy Nexus*, 17, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100340>

Análisis de parámetros operativos para la demostración de cavitación en un equipo experimental

Alan Gonzales Ramos,^a Erick Omar Castañeda Magadán,^{a*} Miriam Navarrete Procopio,^a Víctor Zezatti Flores,^b Ángel Tlatelpa Becerro^c

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra un sistema enfocado en la demostración y análisis de cavitación en un circuito hidráulico experimental para los estudiantes de las carreras de Ingeniería Química y Mecánica de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Dicho sistema se compone de un tubo tipo Venturi (entrada convergente, garganta y salida divergente), un circuito hidráulico y elementos de control específicos como válvulas de paso empleadas para encontrar los parámetros de operación donde se demuestre la cavitación. Las variables principales de adquisición y control son la presión de entrada y salida en el tubo de Venturi (diferencia de presión), así como el flujo volumétrico. Los intervalos de operación con la presencia de cavitación para el actual equipo se encuentran a una diferencia de presión (ΔP) máxima y mínima de 0.653 y 0.398 bar a un flujo volumétrico de 5 GPM a la entrada y de 0.33 bar a un flujo volumétrico de 0.5 GPM correspondientemente. Con el análisis de las variables involucradas en la cavitación es posible el diagnóstico y predicción de fallas mecánicas en componentes hidráulicos en turbomaquinaria empleada en la industria para la generación de energía eléctrica.

Palabras Clave: cavitación, presión, flujo volumétrico, tubo de Venturi.

^a Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.

^b Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.

^c Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: erick.castaneda@uaem.mx

Abstract

The current research entails a system focused on demonstration and cavitation analysis in an experimental hydraulic circuit use to Chemical and Mechanical Engineering students at the Autonomous University of the State of Morelos. This system is composed of a tube type Venturi (Converging inlet, throat and diverging outlet), hydraulic circuit and specific control elements like valves employed to find the operation parameters where the cavitation is present. The main control and acquisition variables are inlet and outlet pressure in the Venturi tube (pressure difference), as well as the volumetric flow. The operation ranges with cavitation for the current equipment are found to maximum and minimum pressure difference (ΔP) of 0.653 and 0.398 Bar at a volumetric flow of 5 GPM at the inlet and 0.33 Bar at a volumetric flow of 0.5 GPM correspondingly. With the involved variables analysis in the cavitation is possible the prediction and diagnostic of mechanical failures in hydraulic components on turbomachines employed in the industry for electric energy generation.

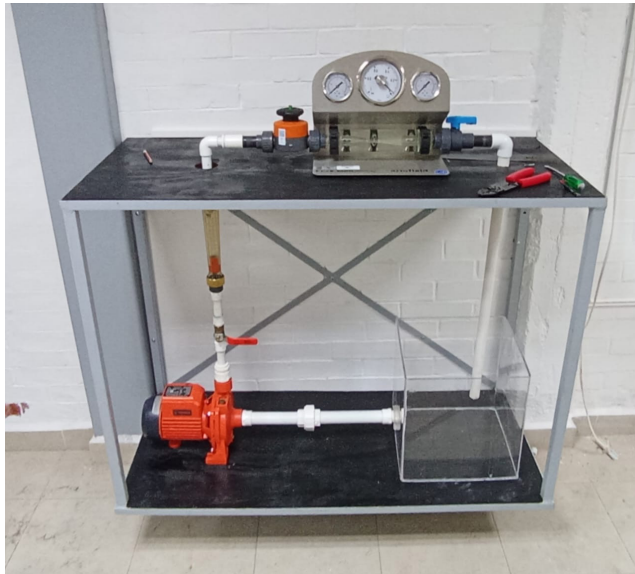
Keywords: cavitation, pressure, volumetric flow, Venturi tube.

Introducción

El fenómeno de cavitación, que afecta a componentes hidráulicos como turbinas, bombas y válvulas, puede causar daños debido a la formación de burbujas de vapor que implotan y generan grietas en el material. La cavitación ocurre cuando la presión absoluta en un punto del sistema cae por debajo de la presión de vapor del líquido a una temperatura determinada. Para evitar este fenómeno, los sistemas hidráulicos se diseñan cuidadosamente empleando fórmulas y teoremas para predecir y prevenir la cavitación (Rennels, 2022; Sandström, 2024; Ahn et al., 2024; Subramanian & Coutier-Delgosha, 2022; Ranade et al., 2022; Biryukov, Gerasimov & Yurin, 2022; Kuimov & Minkin, 2021). La fórmula de continuidad utilizada en el sistema está basada en la preservación del flujo másico en el sistema que, a pesar de las reducciones de los diámetros, el flujo másico no es alterado, pero sufre un incremento de velocidad, presión y pérdidas

por fricción (Le Méhauté, 1975; Wahba, 2021; Özsoy, 2020; Wu & Quan, 2012; Garvin, 2023). El teorema de Bernoulli está implícitamente relacionado en este tipo de sistemas. Es un principio fundamental en la mecánica de fluidos que relaciona la presión, velocidad y la elevación del fluido en movimiento. En el sistema estudiado, se desprecia la variable de la elevación debido a que se encuentra a la misma altura y se toman en cuenta solo las variables de la velocidad y la presión (Sousa Ferreira et al., 2023; Ortiz Domínguez & Cruz Avilés, 2022; Ravikumar, 2022; Suárez et al., 2021; Rezende, 2023). Esto genera un efecto Venturi, el cual consiste en una geometría de tipo convergente y posteriormente divergente; es decir, inicia con un determinado diámetro, este se reduce y vuelve a ampliarse al mismo diámetro inicial, donde dicha reducción es llamada garganta. Las condiciones de operación de temperatura, velocidad y presión en el fluido cambian con su paso en la sección de la garganta, incrementando sus valores a la salida de la garganta en comparación con las condiciones iniciales de entrada (Hu, 2023; Kumar K., Muniamuthu & Tharanisrisakthi, 2022; Dzhejms, 2018; Qun et al., 2019; Zhi et al., 2017).

Figura 1. Equipo para la demostración de cavitación

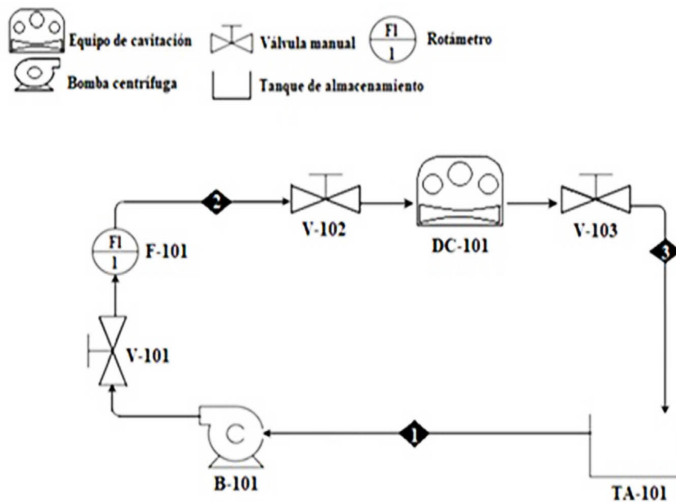


Materiales y metodología

El equipo para la demostración de cavitación tiene como componentes principales una bomba centrífuga, un flujómetro, válvulas de estrangulamiento, un depósito de agua y el equipo de demostración de cavitación (Figura 1). Un objetivo principal es de finalidad académica, para que el usuario adquiriera el conocimiento de las condiciones donde se pueda presentar el fenómeno de cavitación, además de sus consecuencias en los sistemas hidráulicos y cómo evitarlo.

En la Figura 2 se muestra el proceso funcional entre el circuito hidráulico, instrumentación y equipos por medio del diagrama de tubería e instrumentación (DTI) para demostrar cavitación.

Figura 2. Diagrama de tubería e instrumentación



Donde:

- Corriente 1: el fluido almacenado en el tanque TA-101 es succionado por una bomba centrífuga B101 y descargado hacia el equipo de demostración de cavitación, controlando el flujo volumétrico con una válvula de globo V-101 y un flujómetro F-101.

- Corriente 2: el fluido es descargado y controlado por una válvula manual de aguja con bloqueo V102 hacia el equipo de demostración de cavitación DC-101, el cual reduce su diámetro donde en la presencia del fenómeno genera pequeñas burbujas que implotan al aumentar el diámetro y además pasa por una válvula de globo V-103 que estrangula el flujo volumétrico a la salida del equipo.
- Corriente 3: se descarga el fluido en el tanque de almacenamiento TA-101.

Pruebas experimentales

Se realizó un total de 76 pruebas experimentales en el equipo. Dichas pruebas fueron divididas de acuerdo a la apertura de la válvula hidráulica V-103 (flujo volumétrico de salida), es decir, aperturas del 100 %, 75 %, 50 % y 25 %. En cada apertura, se realizó un incremento de flujo volumétrico de 0.25 GPM en un intervalo total de 0.5- 5.0 GPM en la válvula hidráulica V-101 (flujo volumétrico de entrada). En todos los intervalos de operación, se realizaron 19 pruebas con el objetivo de desarrollar una amplia base de datos para su mejor análisis.

Las pruebas se realizaron en un intervalo de 3 minutos, dando un tiempo total de 228 minutos para adquirir las variables de interés u operación como la presión de la entrada, salida y en la sección de la garganta (ΔP) para determinar las condiciones en las cuales el fenómeno está presente.

Resultados

Por medio de los datos obtenidos en las pruebas experimentales realizadas se desarrollaron gráficos en los que se relaciona el flujo volumétrico (GPM) y la diferencia de presión (bar), ver Figuras 3-6.

Los gráficos muestran punteros con tonalidad verde y rojo. Para el caso de punteros en color verde no existe el desarrollo de cavitación; sin embargo, los punteros con tonalidad roja muestran la cavitación generada. Así, la cavitación

se presenta mediante el sonido y la generación de múltiples burbujas a la salida de la geometría Venturi.

Los resultados específicos de la relación de las condiciones de operación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados numéricos experimentales obtenidos

GPM	100% (bar)	75% (bar)	50% (bar)	25% (bar)
0.50	0.033	0.033	0.033	0.033
0.75	0.040	0.040	0.040	0.033
1.00	0.047	0.047	0.047	0.033
1.25	0.053	0.053	0.050	0.037
1.50	0.067	0.067	0.063	0.040
1.75	0.080	0.080	0.073	0.047
2.00	0.093	0.100	0.093	0.062
2.25	0.120	0.113	0.113	0.088
2.50	0.147	0.133	0.127	0.115
2.75	0.167	0.167	0.160	0.137
3.00	0.187	0.190	0.187	0.168
3.25	0.220*	0.233	0.213	0.202
3.50	0.250*	0.253*	0.250*	0.228
3.75	0.263*	0.263*	0.260*	0.273
4.00	0.265*	0.263*	0.263*	0.335
4.25	0.265*	0.267*	0.263*	0.410
4.50	0.265*	0.267*	0.280*	0.517
4.75	0.332*	0.333*	0.330*	0.563
5.00	0.398*	0.400*	0.405*	0.653*

Nota: *Desarrollo de cavitación

Figura 3. Prueba experimental con 100 % de apertura en la válvula de salida

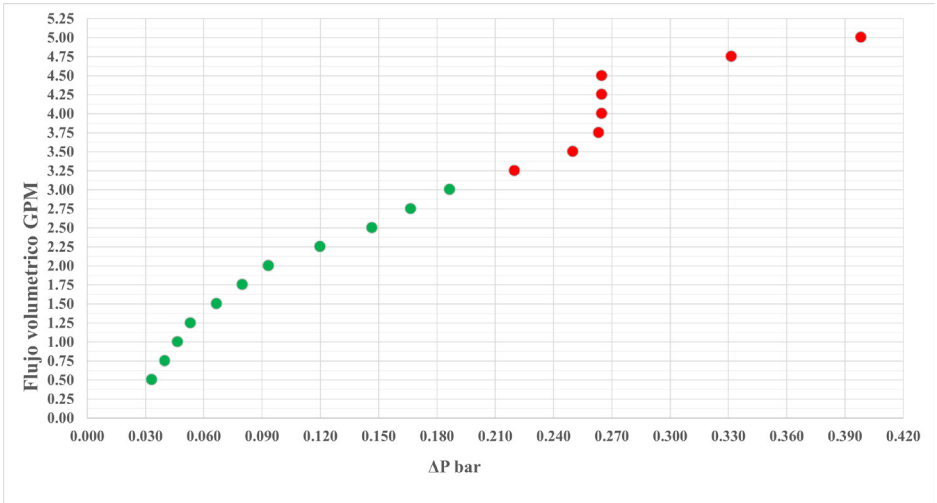


Figura 4. Prueba experimental con 75 % de apertura en la válvula de salida

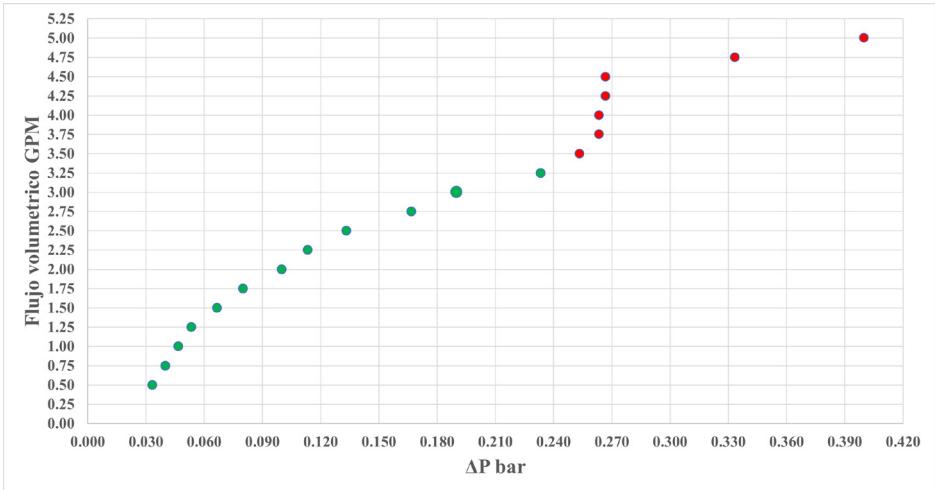


Figura 5. Prueba experimental con 50 % de apertura en la válvula de salida

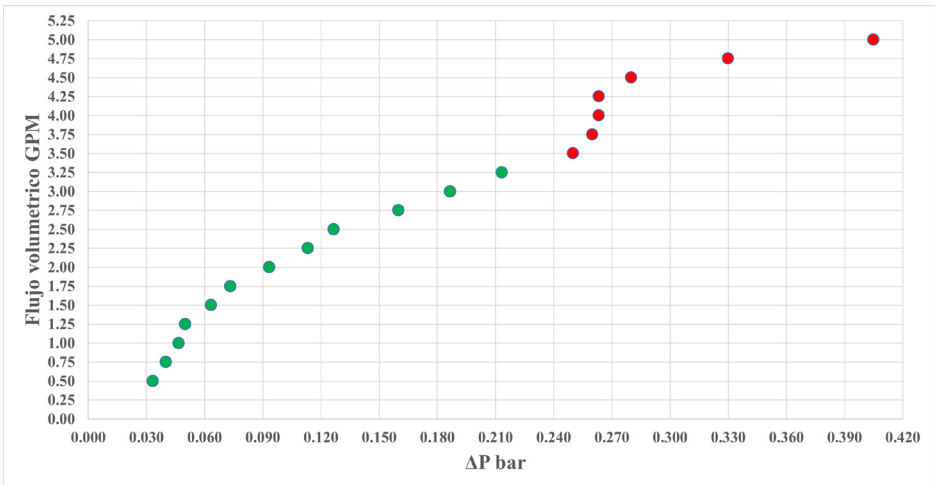
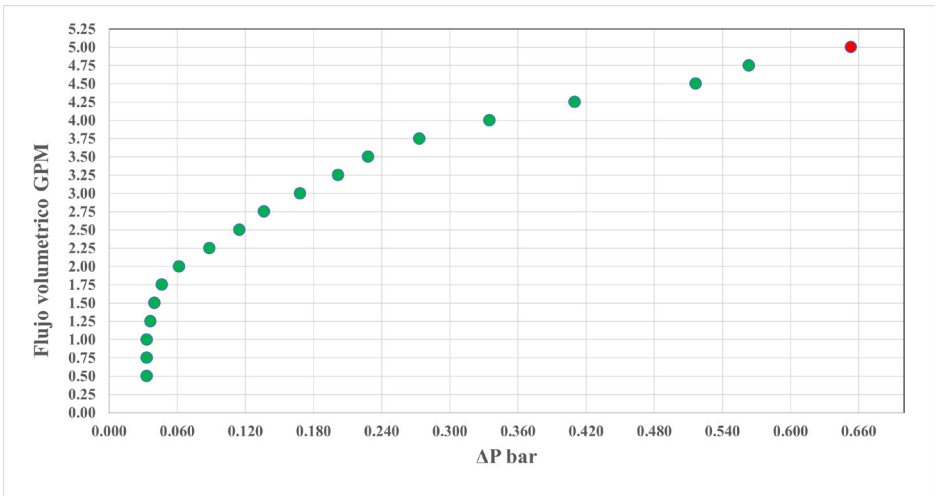


Figura 6. Prueba experimental con 25 % de apertura en la válvula de salida



Conclusiones

Con las pruebas realizadas en el equipo experimental, se determinaron los intervalos de trabajo en donde se genera cavitación en el equipo. Con ello, es posible demostrar a los usuarios este fenómeno que pone en riesgo a componentes importantes en la turbomaquinaria empleada en la generación de energía.

La válvula V-103 como elemento de control de flujo volumétrico posicionado en una apertura del 100 % opera en un intervalo de 0-3 GPM con una presión máxima de 0.187 bar sin la presencia del fenómeno de cavitación. Con una apertura comprendida entre el 75 % y 50 % se opera en un intervalo de 0-3.25 GPM con una presión máxima de 0.233 (75 %) y 0.213 (50 %) bar sin la presencia del fenómeno de cavitación, mientras que con una apertura del 25 % se opera en un intervalo de 0-4.75 GPM con una presión máxima de 0.563 bar sin la presencia del fenómeno de cavitación.

Finalmente, de acuerdo con los resultados experimentales, el mejor desempeño en el sistema con el mayor flujo volumétrico de operación se encuentra al 25 % de apertura en la válvula V-103 y al 94 % de apertura en la válvula V-101 sin la presencia de cavitación a 4.75 GPM.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería por aportar el lugar y el material para poder llevar acabo la investigación, a todos los colaboradores y doctores a cargo, por apoyar en el diseño y manufacturación del sistema para demostrar el fenómeno de cavitación; a Bethzayra Flores Silva y María Fernanda Silva de León, a los doctores Erick Omar Castañeda Magadan, Víctor Manuel Flores Zezatti y Miriam Procopio Navarrete.

Referencias

- Biryukov, D., Gerasimov, D., & Yurin, E. (2022). *Cavitation and Associated Phenomena* (1.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367853495>
- Dzhejms, B. V. (2018). *System and method for creating venturi effect in opening*. Patente No. RU2671175C2.
- Garvin, J. W. (2023). Mass conservation and the continuity equation. En *A Student's Guide to the Navier-Stokes Equations* (pp. 1-31). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009236119.002>
- Hu, T. (2023). Analysis of the Venturi tunnel and ground effect. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 38, 695-698. <https://doi.org/10.54097/hset.v38i.5933>
- J. Ahn, H. Seol, H. Jeong, Y. Park, S. Kim, & J. Han. (2024). Azimuth thruster cavitation test apparatus development and cavitation performance study. *Journal of The Society of Naval Architects of Korea*, 61(3), 161-169. <https://doi.org/10.3744/snak.2024.61.3.161>
- Kuimov, D., & Minkin, M. (2021). Cavitation as a method of improving the energy efficiency of oil industry enterprises. En *III International Conference "Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems": Vol. 279:01015*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202127901015>
- Le Méhauté, B. (1975). The continuity principle. En *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves* (pp. 31-36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2_3
- Ortiz Domínguez, M., & Cruz Avilés, A. (2022). Principio de Bernoulli. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 9(18), 58-65. <https://doi.org/10.29057/escs.v9i18.8806>
- Özsoy, E. (2020). Equations of motion of a fluid. En *Geophysical Fluid Dynamics I*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16973-2_3
- Ranade, V. V., Bhandari, V. M., Nagarajan, S., Sarvothaman, V. P., & Simpson, A. T. (Eds.). (2022). Hydrodynamic cavitation. En *Hydrodynamic Cavitation: Devices, Design and Applications* (pp. 1-20). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527346448.ch1>

- Ravikumar, V. (2022). Bernoulli's Law. En *Sprinkler and Drip Irrigation* (pp. 549-561). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2775-1_19
- Rennels, D. (2022). Cavitation. En *Pipe Flow: A Practical and Comprehensive Guide* (2.^a ed., pp. 247-254). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119756460.ch20>
- Rezende, B. L. de F. (2023). *Teoremas limite para variáveis aleatórias de Bernoulli dependentes*. Tesis de doctorado, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/t.104.2023.tde-24082023-084945>
- S. Kumar K., S. Muniamuthu, & B. T. Tharanisrisakthi. (2022). An Investigation to Estimate the Maximum Yielding Capability of Power for Mini Venturi Wind Turbine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(1), 72-78. <https://doi.org/10.12912/27197050/147150>
- Sandström, R. (2024). Cavitation. En *Basic Modeling and Theory of Creep of Metallic Materials* (pp. 185-203). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49507-6_10
- Sousa Ferreira, A. J. de, Sousa Viana, C. M. de, Garanito Gouveia, D. I., Andrade de Aguiar, I. E., Brito Mendes, N. M., Figueira, S. V., & Neves Lousada, S. A. (2023). Demonstração do teorema de Bernoulli, no laboratório de hidráulica, da UMa. *Caderno Pedagógico*, 20(5), 1362-1377. <https://doi.org/10.54033/cadpedv20n5-018>
- Suárez, A., Dutra, M., Monteiro, M., & Marti, A. C. (2021). El embrollo de Bernoulli: una investigación sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en dinámica de fluidos. *Modelling in Science Education and Learning*, 14(2), 17-30. <https://doi.org/10.4995/MSEL.2021.14835>
- Subramanian, R. K., & Coutier-Delgosha, O. (2022). Intrusive temperature measurement of the cavitation bubbles using cold wire. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(4, Supl.), A249. <https://doi.org/10.1121/10.0016168>
- Wahba, E. M. (2021). Derivation of the differential continuity equation in an introductory engineering fluid mechanics course. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 50(2). <https://doi.org/10.1177/03064190211014460>

- Wu, M., & Quan, H. (2012). Fluid motion vector calculation using continuity equation optimizing. En T. Xiao, L. Zhang, & M. Fei, (Eds.), *Communications in Computer and Information Science: Vol. 323*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34384-1_44
- Z. Qun, Fuzheng, Y., Chenghao, L., Tingting, C., Qiang, L., Xin, W., Peng, Z., & Han, H. (2019). *Venturi tube device for enhancing atomization effect* (Publicación de patente CN 109340819 A). China.
- Zhi, G., Xinmiao, Z., Jinyi, L., & Chenlin, Z. (2017). *Vacuum multiple-effect membrane distillation device coupled with venturi effect* (U.S. Patent No. 10,392,270). U.S. Patent and Trademark Office.

Experiencias en el desarrollo, programación y construcción de un cortador láser

Grecia Minerva Barona Paz,^{a*} Jimena Castrejon Neri,^a
Ángel David Diaz Damián,^a Samuel Portillo Contreras^a

Resumen

Este artículo presenta la experiencia en el desarrollo y construcción de un cortador láser de 1 m x 1 m, diseñado en el marco de la carrera de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. Se investigó, diseñó y construyó un sistema funcional que integra mecánica, electrónica y programación para corte y grabado de materiales como madera y acrílico. El sistema alcanzó una precisión de ± 0.1 mm, con una potencia láser de 30 W y una velocidad de corte de hasta 500 mm/s, lo que lo hace competitivo frente a alternativas comerciales (*Laser Tree K30 30W Optical Power Laser Module*, 2025). Durante el desarrollo, se enfrentaron desafíos como la estabilidad estructural y la calibración del láser, los cuales fueron solucionados mediante ajustes técnicos y mejoras en el diseño.

Palabras clave: cortador láser, precisión, automatización, manufactura, control numérico.

Abstract

This article presents the experience of developing and constructing a 1 m x 1 m laser cutter, designed as part of the Robotics Engineering and Industrial Manufacturing Systems program. A functional system integrating mechanics, electronics, and programming was researched, designed, and built for cutting and engraving materials such as wood and acrylic. The system achieved a

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: grecia.barona@uaem.edu.mx

precision of ± 0.1 mm, with a laser power of 30 W and a cutting speed of up to 500 mm/s, making it competitive compared to commercial alternatives (*Laser Tree K30 30W Optical Power Laser Module*, 2025). During development, challenges such as structural stability and laser calibration were encountered and resolved through technical adjustments and design improvements.

Keywords: laser cutter, precision, automation, manufacturing, numerical control.

Introducción

La manufactura avanzada y el prototipado rápido han experimentado una creciente adopción de tecnologías de corte y grabado por láser debido a su precisión, velocidad y versatilidad. En este contexto, se desarrolló un cortador láser de 1 m x 1 m como parte de la formación en Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial (Choudhury & Shirley, 2021).

El diseño y construcción de este sistema se fundamentó en estudios previos sobre tecnologías de corte láser, destacando su eficiencia en comparación con métodos tradicionales como el fresado o el corte por plasma. Para fortalecer la base teórica, se revisaron múltiples referencias sobre parámetros óptimos de operación, precisión y estabilidad en sistemas de corte láser, permitiendo una mejor justificación del diseño implementado.

Materiales y metodología

Los materiales utilizados para la construcción se dividen en tres categorías principales: estructura y soporte, sistema de movimiento y componentes electrónicos (Tabla 1).

La programación del sistema de control se realizó utilizando firmware GRBL (Hernandez, Lopez & Zhang, 2023), generando trayectorias mediante código G para el control del movimiento del cabezal. Se calibró el equipo con pruebas de corte en diferentes materiales y se midió la precisión del sistema con un margen $0.1 \pm$ mm (Smith, Brown & Patel, 2020).

Tabla 1. Materiales implementados

Categoría	Materiales
Estructura y soporte	PTR 1 x 1 calibre 14
	Rieles CNC de aluminio 2040
	Tableros MDF blanco 1.20 m x 1.20 m
	Tornillos y tuercas M4, M6
Sistema de movimiento	Motores NEMA 23 3 Nm
	Banda dentada GT2 (6 mm) y poleas GT2 20T
	Ruedas CNC 225zz
Componentes electrónicos	Tarjeta MKS DLC32 v2 con Wifi
	Controlador DM556
	Fuente de alimentación 110 V a 15 A
	Módulo láser de 30 W y bomba de aire

Figura 1. Firmware GRBL, donde se realizaron las pruebas de movimiento de los motores

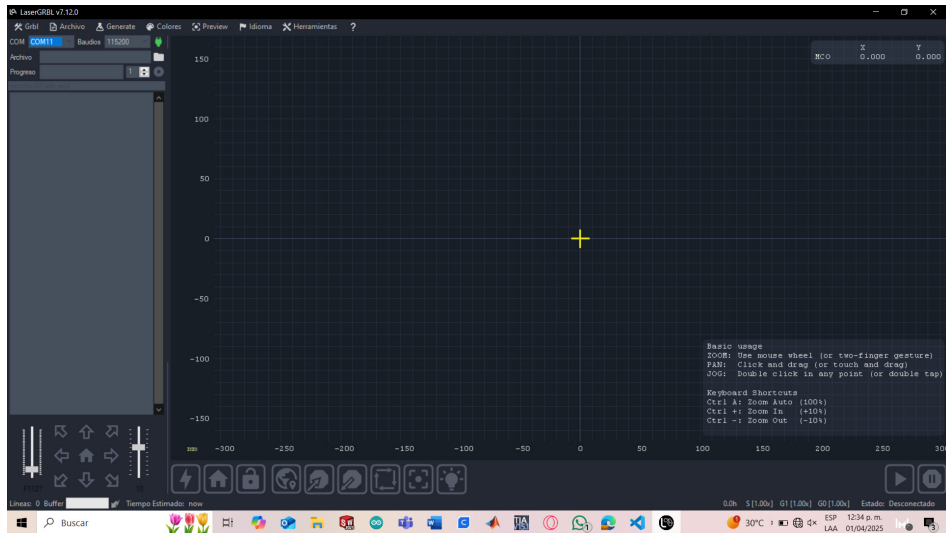


Figura 2. Prueba de Grabado sobre MDF Wood



Para el diseño y fabricación de componentes utilizados en la cortadora láser, se empleó SolidWorks para el modelado en 3D de las piezas, permitiendo un diseño preciso y optimizado para su funcionalidad. Posteriormente, las piezas fueron preparadas para impresión utilizando Ultimaker Cura, asegurando parámetros adecuados para su fabricación mediante impresión 3D. Estas piezas impresas se integraron en la cortadora láser, contribuyendo a su ensamblaje y mejora estructural (Ultimaker 2023; Dassault Systèmes, 2023).

Figura 3. Diseño de la mesa realizado en SolidWorks

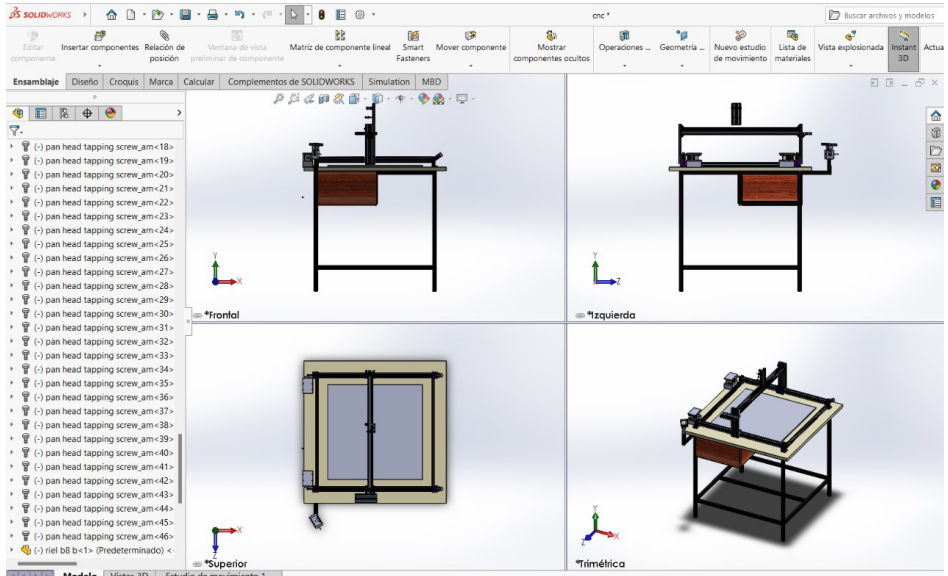


Figura 4. Diseño de la estructura del láser realizado en SolidWorks

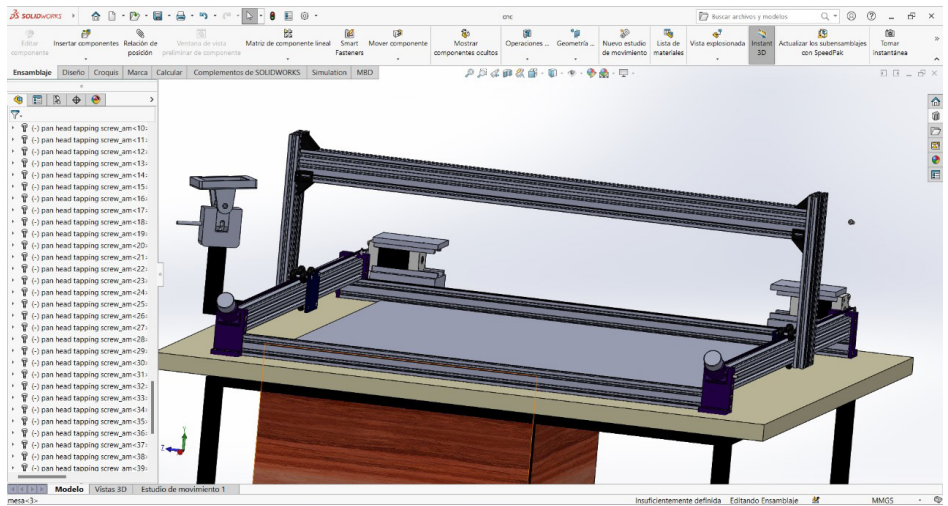


Figura 5. Diseño en SolidWorks del tensor de bandas

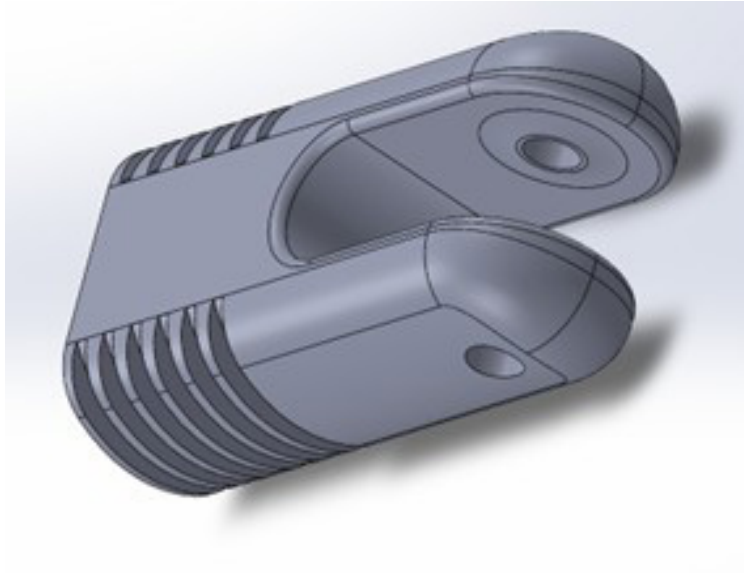


Figura 6. Proceso en Ultimaker Cura para impresión del tensor de bandas

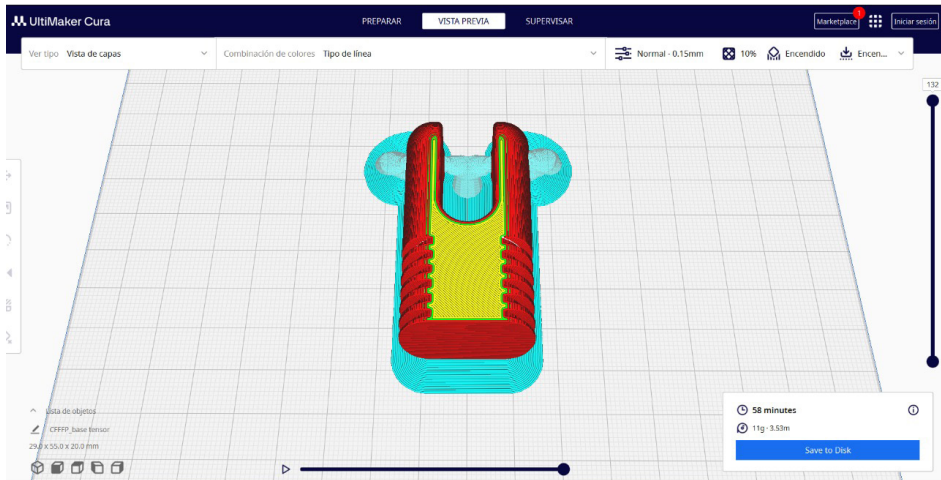


Figura 7. Postprocesado de la impresión del tensor de banda



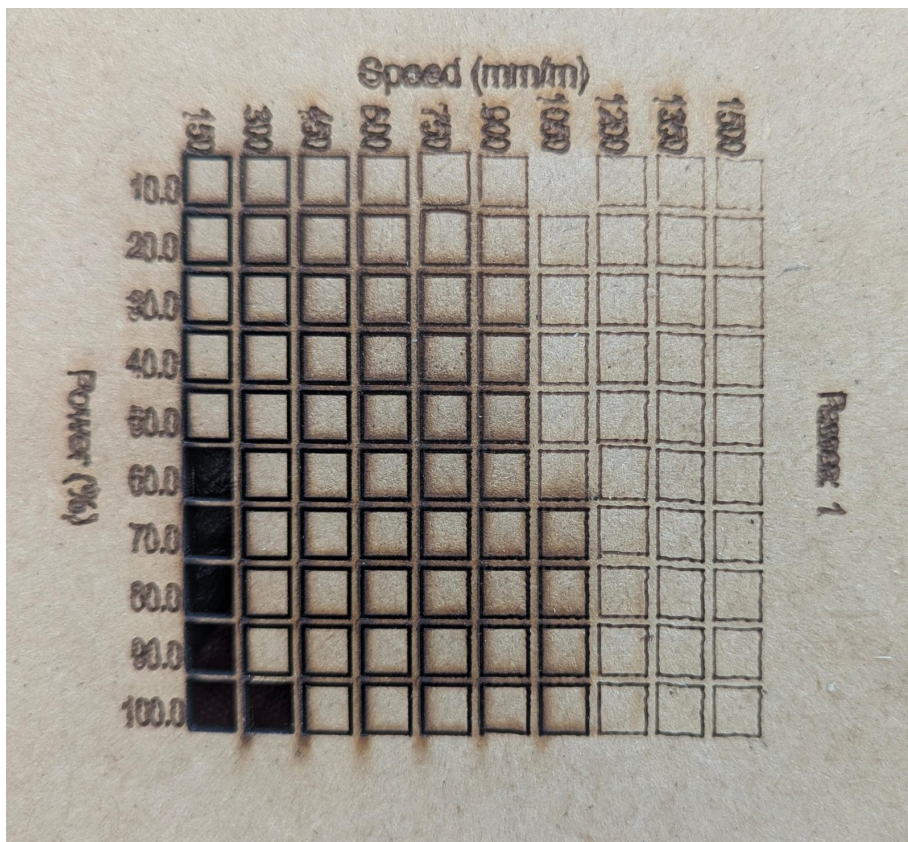
Para el control y operación de la cortadora láser, se emplearon las aplicaciones grblControl y LightBurn. grblControl fue utilizado para la ejecución y monitoreo del código G en tiempo real, permitiendo el control preciso del cabezal láser. LightBurn facilitó la creación y edición de diseños de corte y grabado al proporcionar una interfaz intuitiva para la manipulación de parámetros como velocidad, potencia y número de pasadas. Estas herramientas fueron clave para optimizar la eficiencia del sistema y mejorar la experiencia del usuario en la operación del equipo (García & Torres, 2022).

Resultados

El cortador láser construido demostró ser un sistema funcional y eficiente. Las pruebas de corte en madera y acrílico mostraron bordes limpios y una alta repetibilidad del proceso. La velocidad de corte alcanzó hasta 500 mm/s en materiales de 3 mm de espesor. Además, el sistema presentó una versatilidad considerable,

permitiendo el procesamiento de diversos materiales con ajustes mínimos en los parámetros de potencia y velocidad (Miller & Johnson, 2021).

Figura 8. Prueba de corte en MDF Wood, manipulando los parámetros de potencia y velocidad



La precisión del sistema, medida con calibres digitales, confirmó un margen de error de ± 0.1 mm. Se verificó que la longitud de onda del láser (450 nm) era adecuada para el corte de materiales no metálicos, asegurando una alta eficiencia energética (Kim, Park & Lee, 2021).

Figura 9. Prueba exitosa del grabado sobre un termo de aluminio



Figura 10. Prueba exitosa del grabado sobre una placa de madera



Conclusiones

El desarrollo del cortador láser de 1 m x 1 m permitió aplicar conocimientos en mecánica, electrónica y programación, consolidando habilidades esenciales para la ingeniería en manufactura. La precisión alcanzada (± 0.1 mm) y la velocidad de corte (hasta 500 mm/s) validan la efectividad del diseño implementado, situándolo como una alternativa viable para aplicaciones industriales y educativas.

Los desafíos técnicos, como la estabilidad estructural y la calibración del láser, fueron resueltos mediante ajustes en el diseño y pruebas iterativas. Este trabajo demuestra la importancia de la integración de tecnologías avanzadas en la educación en ingeniería, sentando bases para futuras investigaciones en manufactura digital y automatización (Grewal & Singh, 2022).

Referencias

- Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2021). *Corte láser: Teoría y aplicaciones*. Elsevier.
- Dassault Systèmes. (2023). *SolidWorks: 3D CAD design software*. <https://www.solidworks.com>
- García, M., & Torres, L. (2022). *Herramientas de software para corte y grabado láser: Un enfoque práctico*. McGraw-Hill.
- Grewal, A., & Singh, R. (2022). *Manufactura digital y automatización en la educación en ingeniería*. CRC Press.
- Hernandez, P., Lopez, R., & Zhang, T. (2023). *Programación CNC con GRBL: Una guía práctica*. Springer.
- Kim, H., Park, J., & Lee, S. (2021). Optimización de parámetros de corte láser para aplicaciones industriales. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.015>
- Laser Tree K30 30W Optical Power Laser Module. (2025). Laser Tree. <https://lasertree.com/products/k30-30w-optical-power-laser-module>
- Miller, D., & Johnson, L. (2021). *Materiales y su comportamiento en procesos de corte láser*. Wiley.

- Smith, J., Brown, K., & Patel, M. (2020). *Precisión y calibración en sistemas de corte láser*. Taylor & Francis.
- Ultimaker. (2023). *Ultimaker Cura: Prepare your 3D prints*. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>

Adquisición y clasificación de señales

José Ernesto Pliego Sánchez,^{a*} Demian Flores
Sánchez,^a Misael Méndez Garnelo^a

Resumen

Los biopotenciales son indicativos fisiológicos del cuerpo humano que pueden ser registrados y estudiados, y son esenciales en áreas como la medicina, la rehabilitación y la ingeniería biomédica (García-Mayor & Serón-Arbeloa, 2014). El progreso tecnológico ha posibilitado el paso de equipos grandes a dispositivos más compactos (Geddes & Baker, 1998), lo que facilita el monitoreo fuera del entorno hospitalario y abre oportunidades para dispositivos médicos personalizados. La demanda de dispositivos flexibles surge de la variedad de señales y las necesidades particulares de cada tipo de aplicación (Merletti, Parker & Hermie, 2016).

Este proyecto de investigación tiene un enfoque educativo y su objetivo es desarrollar un algoritmo para el reconocimiento de señales mioeléctricas. Para ello, se emplea un proceso de agrupamiento previo (*clustering*) seguido de una clasificación sencilla basada en la distancia euclidiana. En cuanto al proceso de agrupamiento, se utilizan los momentos invariantes unidimensionales (similares a Hu) de la señal mioeléctrica como características (García-Mayor & Serón-Arbeloa, 2014; Geddes & Baker, 1998; Merletti, Parker & Hermie, 2016; Webster, 2018).

Palabras clave: biopotenciales, *clustering*, momentos invariantes, clasificación.

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

* Autor de correspondencia: joseernesjoseerne@gmail.com

Abstract

Biopotentials are physiological indicators of the human body that can be recorded and studied, and are essential in fields such as medicine, rehabilitation, and biomedical engineering (García-Mayor & Serón-Arbeloa, 2014). Technological advancements have enabled the shift from large equipment to more compact devices (Geddes & Baker, 1998), making monitoring outside the hospital environment easier and opening up opportunities for personalized medical devices. The demand for flexible devices arises from the variety of signals and the specific needs of each type of application (Merletti, Parker & Hermie, 2016).

This research project has an educational focus and aims to develop an algorithm for the recognition of myoelectric signals. To achieve this, a prior clustering process is used, followed by a simple classification based on Euclidean distance. For the clustering process, one-dimensional invariant moments (similar to Hu's) of the myoelectric signal are used as features (García-Mayor & Serón-Arbeloa, 2014; Geddes & Baker, 1998; Merletti, Parker & Hermie, 2016; Webster, 2018).

Keywords: biopotentials, invariant moments, clustering, classification.

Introducción

Las señales electromiográficas son de naturaleza aleatoria, no estacionaria y no lineal. Por esta razón, es fundamental identificar un patrón que represente la señal, teniendo como etapa crucial la segmentación, la extracción y selección de características, la reducción de dimensionalidad y la clasificación (Webster, 2018).

Los principales métodos de clasificación de señales mioeléctricas se pueden dividir en enfoques tradicionales y métodos basados en aprendizaje automático.

Los métodos tradicionales emplean técnicas estadísticas y matemáticas para diferenciar patrones en las señales electromiográficas: análisis de umbral, análisis de envolvente, métodos basados en distancias.

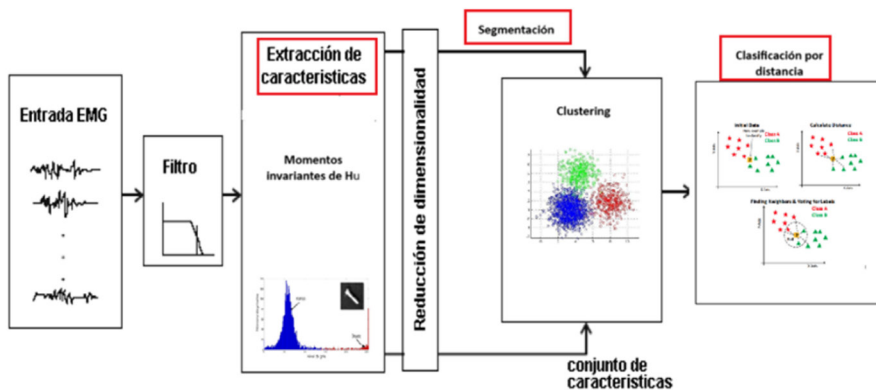
Por otro lado, los métodos de aprendizaje automático, utilizan patrones a partir de datos de entrenamiento: máquinas de soporte vectorial, redes neuronales artificiales, bosques aleatorios, redes neuronales profundas.

Este proyecto usa una conjunción, con distancias euclidianas para clasificación y metodología de aprendizaje automático (*clustering*) para la segmentación, además de emplear como características los momentos invariantes de la señal (Ayza Graef, 2019).

Materiales y metodología

Las etapas que se consideran en el procesamiento de señales mioeléctricas son: extracción de características, segmentación y clasificación del patrón.

Figura 1. Tres etapas del procesamiento de la señal mioeléctrica



Momentos invariantes de Hu

En este proyecto, se le da mayor énfasis al cálculo de los momentos invariantes de la señal, como la etapa crucial que proporciona características que permiten discriminar las señales mioeléctricas.

Los momentos son proyecciones de una función sobre una base polinomial usados para medir la distribución de masa de un cuerpo. El concepto de momento

se utiliza en la clasificación de objetos en imágenes, así, para 2D (Gómez Flores, 2019) se emplea:

$$m_{pq} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} x^p y^q f(x, y) \quad (1)$$

Donde $p = 0, 1$ y $q = 0$, ambos son enteros.

Asimismo, son correspondientes a momentos centrales de orden $(p + q)$:

$$\mu_{pq}^o = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (\underline{x} - \underline{\bar{x}})^p (\underline{y} - \underline{\bar{y}})^q f(x, y) \quad (2)$$

Donde $(\bar{x}, \bar{y})$ es el centro de masa del objeto calculado como:

$$\underline{\bar{x}} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \underline{\bar{y}} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3)$$

Los momentos centrales de orden 3 se pueden calcular como:

$$\begin{aligned} \mu_{00}^o &= m_{00} \\ \mu_{10}^o &= \mu_{01}^o = 0 \\ \mu_{20}^o &= m_{20} - \underline{\bar{x}} m_{10} \\ \mu_{02}^o &= m_{02} - \underline{\bar{y}} m_{01} \\ \mu_{11}^o &= m_{11} - \underline{\bar{x}} m_{01} - m_{10} \underline{\bar{y}} \\ \mu_{21}^o &= m_{21} - 2 \underline{\bar{x}} m_{11} - \underline{\bar{y}} m_{20} + 2 m_{01} \underline{\bar{x}}^2 \\ \mu_{12}^o &= m_{12} - 2 \underline{\bar{y}} m_{11} - \underline{\bar{x}} m_{02} + 2 m_{01} \underline{\bar{y}}^2 \\ \mu_{30}^o &= m_{30} - 3 \underline{\bar{x}} m_{20} + 2 m_{10} \underline{\bar{x}}^2 \\ \mu_{03}^o &= m_{03} - 3 \underline{\bar{y}} m_{02} + 2 m_{01} \underline{\bar{y}}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Mientras los momentos centrales normalizados de orden $(p + q)$ son:

$$\eta_{pq} = \frac{\overset{o}{\underset{00}{\circ}}_{pq}}{\overset{o}{\underset{00}{\circ}}_{\geq 00}} \quad \text{donde} \quad \geq \frac{p+q}{2} \quad y \quad (p+q) \geq 2 \quad (5)$$

Finalmente, el conjunto de siete momentos invariantes de Hu (Gómez Flores, 2019):

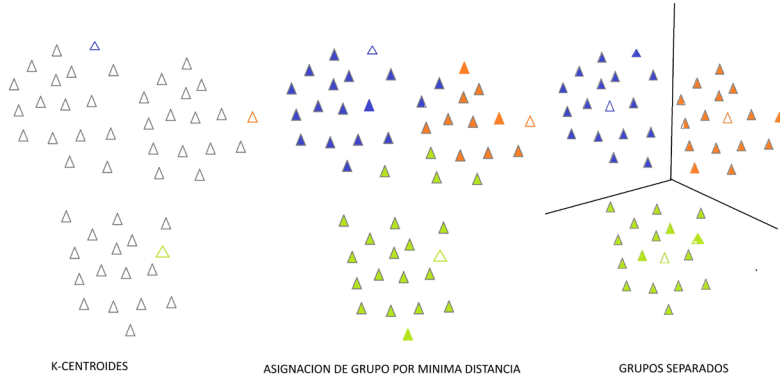
$$\begin{aligned} \phi_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ \phi_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ \phi_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \\ \phi_4 &= (\eta_{30} - \eta_{12})^2 + (\eta_{21} - \eta_{03})^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Segmentación: formación de clusters

El *clustering* es una técnica de aprendizaje no supervisado que se utiliza para agrupar datos en subconjuntos o *clusters* según sus similitudes. Su objetivo es organizar un conjunto de datos en grupos de manera que los elementos dentro de cada grupo sean lo más parecidos posible entre sí y, al mismo tiempo, diferentes de los elementos en otros grupos.

En este proyecto se utiliza el algoritmo K-means para separar las señales en k grupos distintos que puedan ejecutar en los controladores k comandos distintos, como se muestra en la Figura 2 (Ayza Grael, 2019).

Figura 2. Algoritmo K-means



Pertenencia a clusters

Una vez entrenado el sistema, se tienen los k centroides necesarios para clasificar las señales y entonces estaría listo para clasificar una entrada nueva en tiempo real.

La clasificación en esta etapa se realiza midiendo la distancia a cada centroide y seleccionando la más pequeña para indicar la pertenencia a un *cluster* determinado (Ayza Grael, 2019):

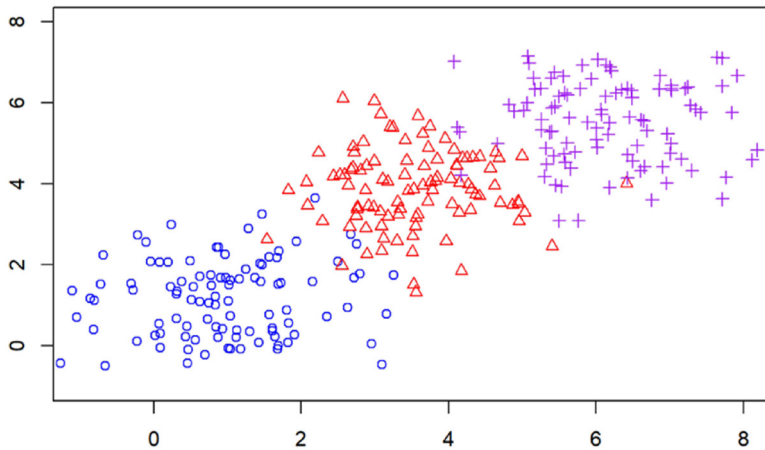
$$d_{ab} = \left[\sum_{j=1}^p (x_{aj} - x_{bj})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Resultados

Para la clasificación, se toman varias muestras de la señal electromiográfica, utilizando un solo movimiento y diferentes intensidades de fuerza. De cada señal se obtuvieron los tres primeros momentos invariantes, y se utilizaron para

identificar tres *clusters* (posibles comandos de control) diferentes, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Segmentaciones en 3 *clusters* mediante K-means



Conclusiones

Se planteó y aplicó el uso de momentos invariantes como características de señales mioeléctricas, que permitieron segmentar en grupos bien definidos de señales utilizando el método de *clustering K-means*. El presente trabajo genera un precedente en el uso de una metodología distinta de caracterización de señales mioeléctricas; sin embargo, se pretende estudiar más señales para identificar las características que mejor las describan y aumentar el nivel de discriminación de señales al combinarse con metodologías como la transformada wavelet.

Referencias

Ayza Graell, J. (Coord.). (2019). *Técnicas de clustering*. Xavi Font. Universitat Oberta de Catalunya. https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147174/10/AnaliticaDeDatos_Modulo5_TecnicasDeClustering.pdf

- García-Mayor, L. F., & Serón-Arbeloa, F. J. (2014). *Bioseñales: Fundamentos y aplicaciones*. Universidad de Zaragoza.
- Geddes, L. A., & Baker, L. E. (1998). *Biomedical Engineering: Design and Applications*. John Wiley & Sons.
- Gómez Flores, W. (2019). *Análisis digital de imágenes*. <https://perseo.tamps.cinvestav.mx/~wgomez/diapositivas/AID/Clase00.pdf>
- Merletti, R., Parker, P. A., & Hermie, J. W. (2016). *Electromyography: Physiology, Engineering, and Noninvasive Applications*. John Wiley & Sons.
- Webster, J. G. (2018). *Medical Instrumentation: Application and Design*. John Wiley & Sons.

El papel fundamental de las matemáticas en la formación del ingeniero: aplicaciones y beneficios desde la perspectiva del estudiante

Hannie Valeria Ramírez Salazar,^{a*} Eros Arturo
García Acosta,^a Samuel Portillo Contreras^{a*}

Resumen

Las matemáticas desempeñan un papel esencial en la formación del ingeniero en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, proporcionando herramientas clave para la resolución de problemas, modelado de procesos y optimización de diseños. Este estudio analiza la aplicación de conceptos matemáticos en el plan de estudios de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla. Se identifican las principales dificultades que enfrentan los estudiantes y las oportunidades para mejorar la enseñanza de matemáticas dentro del programa académico. Se concluye que una mayor integración de ejercicios prácticos y proyectos aplicados puede mejorar significativamente la comprensión y aplicabilidad de estos conocimientos.

Palabras clave: matemáticas, ingeniería, robótica, manufactura, aprendizaje, modelado.

Abstract

Mathematics plays a fundamental role in the education of Engineers in Robotics and Industrial Manufacturing Systems, providing key tools for problem-solving, process modeling, and design optimization. This study analyzes the application of mathematical concepts in the Curriculum of Robotics and

^a Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

^{*} Autores de correspondencia: hannie.ramirez@uaem.edu.mx; samuel.portillo@uaem.mx

Industrial Manufacturing Systems Engineering at the School of Higher Studies of Yecapixtla. The main difficulties students face and opportunities to improve mathematics teaching within the academic program are identified. It is concluded that better integration of practical exercises and applied projects can significantly enhance students' understanding and application of these concepts.

Keywords: mathematics, engineering, robotics, manufacturing, learning, modeling.

Introducción

El programa educativo de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla se ha estructurado con el objetivo de formar profesionistas capacitados en diseño, automatización y control de sistemas robóticos para proyectos de alto impacto industrial con resultados eficientes, confiables, repetibles y duraderos (Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos [EES-Yecapixtla, UAEM], 2024). Dentro de este marco, las matemáticas juegan un papel crucial en la comprensión de principios físicos, el modelado de sistemas y la programación de algoritmos de control. Las matemáticas de nivel universitario, que incluyen áreas como por ejemplo cálculo, ecuaciones diferenciales, probabilidad, estadística, álgebra lineal y matemáticas discretas, requieren un nivel de complejidad matemática que, como mínimo, corresponde al conocimiento básico del cálculo (ABET, 2023). Estas disciplinas son fundamentales para el desarrollo de competencias técnicas y la resolución de problemas complejos en el campo de la ingeniería.

Puesto que las matemáticas juegan un papel fundamental durante el estudio de una ingeniería, debido a que estas constituyen más del 50 % de materias que se cursan a lo largo de esta y es esencial su comprensión, como redactó Galileo en 1623: “Si queremos entender el universo, debemos aprender a comprender el lenguaje matemático, ya que en este se encuentra escrito, y las letras son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible comprender una sola palabra” (Galilei, 1997). Por ello, el dominio y la

comprensión profunda de las matemáticas se convierten en un requisito indispensable para el desempeño eficaz en el campo de la ingeniería.

Sin embargo, el estudiantado frecuentemente encuentra desafíos en la aplicación de estos conocimientos a problemas reales. Según Camarena (2012), esta problemática que presenta el alumnado se vincula al poco interés que tienen por ella, ya que no ven de manera inmediata su aplicación, ni el objeto de tener que cursarla (Camarena, 2012) y, posteriormente, en el desempeño profesional en calidad de ingenieros, al resolver un problema en el sector industrial o de producción, la modelación matemática se torna necesaria. Es allí donde se presentan inconvenientes debido a que en la etapa de estudiantes no tuvieron la preparación respectiva (Plaza Gálvez, 2016).

El objetivo de este estudio es analizar la presencia y aplicación de las matemáticas en el plan de estudios, identificando áreas de mejora y proponiendo estrategias didácticas que refuercen el aprendizaje matemático en contextos prácticos.

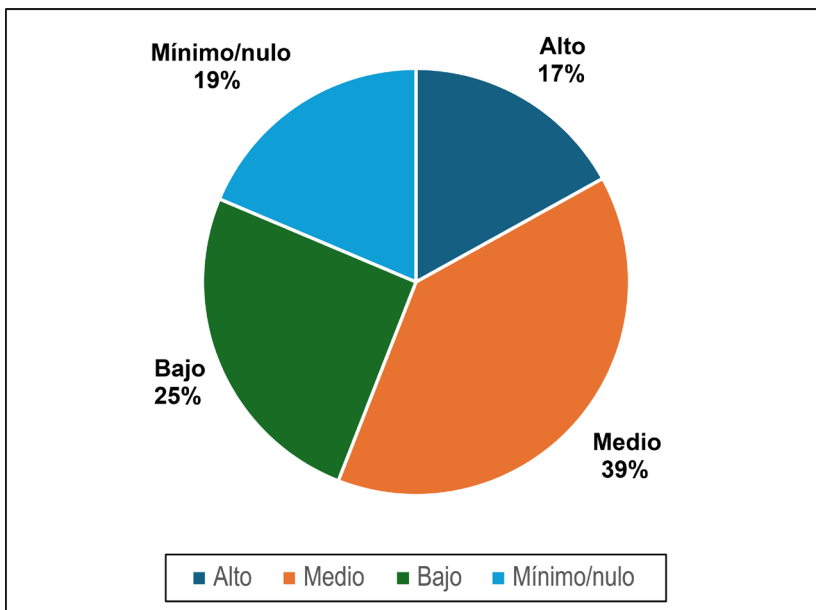
Materiales y metodología

Clasificación del nivel matemático en el plan de estudios

Para este estudio, se realizó un análisis del mapa curricular de la Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial (ENAAE, 2023). Se identificaron las unidades de aprendizaje que incluyen matemáticas y se evaluaron su conexión con las competencias profesionales. Dicho análisis comenzó por la clasificación de las materias según su nivel de complejidad matemática (Figura 1).

- Alto nivel: exigencia de dominio avanzado de matemáticas y su aplicación en problemas complejos.
- Mediano nivel: materias con matemáticas intermedias y aplicaciones directas, pero no avanzadas.
- Bajo nivel: materias que requieren solo conocimientos básicos o aplicaciones simples de matemáticas.
- Mínimo o nulo nivel: materias con uso limitado o nulo de matemáticas.

Figura 1. Nivel de complejidad matemática del mapa curricular



Evaluación del mapa curricular según criterios ABET y EUR-ACE

A la par, se llevó a cabo un análisis con base en los criterios establecidos por la Sociedad de Ingenieros de Fabricación y los criterios de acreditación de ABET y estándares EUR-ACE para evaluar el mapa curricular de la carrera de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. Estos criterios abarcan áreas clave como materiales y procesos de fabricación, ingeniería de procesos, competitividad manufacturera, diseño de sistemas de fabricación y experiencia en laboratorio o instalación de fabricación (ABET, 2023).

Encuesta aplicada al estudiantado

La encuesta (Figura 2) se aplicó al estudiantado de la carrera de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, abarcando desde el segundo hasta el octavo semestre. Esta encuesta fue diseñada y desarrollada para este

estudio con la herramienta Google Forms, con el fin de facilitar su distribución y recopilación del mayor número de respuestas para garantizar una alta precisión en el análisis posterior. La encuesta constó de catorce preguntas organizadas en tres secciones principales: datos generales del alumnado, percepción sobre la enseñanza matemática y la experiencia en la aplicación matemática. Las preguntas incluyeron opciones de respuesta cerrada y abierta, lo que permitió recopilar datos tanto cuantitativos como cualitativos. El objetivo del formulario fue conocer la percepción del alumnado sobre la enseñanza de las matemáticas y su aplicabilidad, con el fin de identificar áreas de mejora en la integración de los conceptos matemáticos en su formación profesional.

Figura 2. Formulario de percepción estudiantil

Percepción sobre la Enseñanza Matemática

¿Consideras que las matemáticas son fundamentales en tu formación como ingeniero en robótica y manufactura industrial? *

☐ Sí, totalmente

☐ En cierta medida

☐ No lo considero tan relevante

☐ No, para nada

¿Has tenido dificultades para aplicar los conceptos matemáticos en proyectos o actividades prácticas? *

☐ Sí, frecuentemente

☐ A veces

☐ Rara vez

☐ Nunca

Experiencia en la Aplicación Matemática

¿Has utilizado herramientas matemáticas en proyectos prácticos dentro de la carrera? *

☐ Sí, frecuentemente

☐ A veces

☐ Rara vez

☐ Nunca

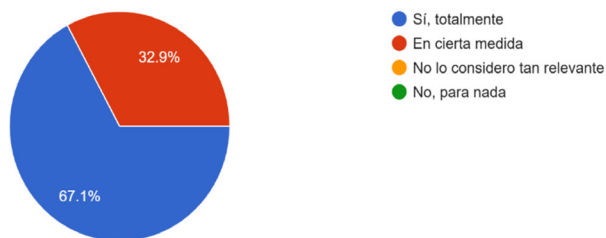
Resultados

Con base en los resultados obtenidos de la encuesta, se identificó que el 67.1 % del alumnado considera a las matemáticas como fundamentales en su formación profesional, sin dejar de lado que el 32.9 % también las valora como importantes en cierta medida (Figura 3).

Figura 3. Importancia de las matemáticas en la formación de ingeniería

¿Consideras que las matemáticas son fundamentales en tu formación como ingeniero en robótica y manufactura industrial?

73 respuestas



De igual manera, se identificó que el 71.2 % del alumnado no tenía experiencia previa en matemáticas avanzadas antes de ingresar a la carrera, lo que sugiere que la mayoría no cuenta con una base sólida en esta área (EES-Yecapixtla, UAEM, 2025).

A partir del análisis del plan de estudios se determina que cumple con los estándares internacionales ABET (2023) y EUR-ACE (ENAAE, 2023; La aplicación de las matemáticas en la ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, 2025), al incluir un sólido componente de matemáticas avanzadas en materias como Cálculo vectorial, Ecuaciones diferenciales, Métodos numéricos y Álgebra lineal, pero pese a ello su aplicación práctica no siempre es evidente para los estudiantes, ya que el 56.2 % de los estudiantes reportó tener dificultades frecuentes para aplicar los conceptos matemáticos en proyectos o actividades prácticas, mientras que el 27.4 % indicó que

a veces enfrenta estas dificultades y solo un pequeño porcentaje no reportó problemas en este ámbito.

Respecto a la percepción de los cursos de matemáticas, el 47.9 % de los estudiantes consideró que deberían incluir mucho más actividades prácticas y proyectos aplicados a la ingeniería, mientras que el 41.1 % opinó que el enfoque actual es suficiente. Esto refleja una demanda significativa por una mayor conexión entre la teoría y la práctica. Además, al indagar sobre las principales dificultades al aprender matemáticas, el 65.8 % del estudiantado mencionó la falta de bases matemáticas previas como el principal obstáculo, seguido por el 45.2 % que señaló métodos de enseñanza poco didácticos y el 39.7 % que destacó la falta de aplicación práctica. Estos resultados sugieren que, aunque los estudiantes reconocen la importancia de las matemáticas en su formación, existen desafíos tanto en la preparación previa como en la metodología de enseñanza y la aplicabilidad de los conceptos.

Conclusiones

Con base a los resultados de la encuesta se observa que se reconoce la importancia de las matemáticas en la formación del estudiantado en ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial (EES-Yecapixtla, UAEM, 2025). Asimismo, existe una necesidad de fortalecer la conexión entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica. La inclusión de más actividades integrales y proyectos aplicados, así como el uso de herramientas como Matlab, Python y otros softwares de simulación podrían facilitar y mejorar la comprensión y motivación de los cursantes. Además, sería beneficioso brindar apoyo adicional a aquellos alumnos que enfrentan algún rezago académico en la aplicación de las matemáticas, considerando que un porcentaje significativo no contaba con experiencia previa en matemáticas avanzadas al momento de ingresar a la carrera.

Referencias

- ABET. (2023). *Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2023-2024*. Engineering Accreditation Commission. https://www.abet.org/wp-content/uploads/2023/05/2024-2025_EAC_Criteria.pdf
- Camarena, P. (2012). La modelación matemática en la formación del ingeniero. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, 5(3), 1-10. <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/1386/902>
- ENAAE. (2023). *EUR-ACE Framework Standards and Guidelines*. European Network for Accreditation of Engineering Education. <https://www.enaee.eu/eur-ace-system/eur-ace-framework-standards/>
- Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (2024). *Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial – Objetivo general*. <https://eesyecapixtla.uaem.mx/ingeniero-en-robotica-y-sistemas-de-manufactura-industrial24/>
- Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (2025). *Mapa curricular*.
- Galilei, G. (1997). *Il Saggiatore: Edición Ricciardi*. Liber Liber. <https://liberliber.it/autori/autori-g/galileo-galilei/il-saggiatore/>
- La aplicación de las matemáticas en la ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial. (2025). Google Forms. <https://forms.gle/ugvmF8bMPR3g6NX36>
- Plaza Gálvez, L. F. (2016). Modelación matemática en ingeniería. *Revista de Investigación Educativa de la REDIECH*, 7(13), 47-57. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-85502016000200047

Implementation of a proportional-integral control system for a hybrid solar-biomass food dryer with thermal energy storage, evaluating Thermodynamic variables

Arly Darío Rincón Quintero,^{a,d,e*} Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez,^b Omar Lengerke Pérez^c

Resumen

Este estudio implementa un sistema de control proporcional-integral (PI) en un secador híbrido solar-biomasa para mejorar la eficiencia del secado de cacao. El proyecto, desarrollado en la Finca San Cristóbal, El Playón, Santander (Colombia), incluyó el diseño e instalación de un sistema de potencia y control con sensores de temperatura, actuadores, un PLC Logo V8 y una interfaz web de monitoreo. El sistema integra colectores solares con almacenamiento térmico, una cámara de combustión de biomasa y un control de flujo de aire forzado. Los resultados experimentales mostraron que las variaciones en el flujo de aire no afectaron proporcionalmente la temperatura de secado debido a las propiedades del almacenamiento térmico y la variabilidad de la irradiación solar. En consecuencia, el control PI resultó ineficaz para estabilizar la temperatura. Se concluye que la estabilidad térmica depende más de la energía almacenada que del flujo de aire, sugiriendo explorar estrategias de control alternativas.

Palabras clave: colector solar, control PI, energía renovable, secado.

^a Grupo de Investigación en Diseño y Materiales DIMAT, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia.

^b Grupo de Investigación en Sistemas de Energía, Automatización y Control GISEAC, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia.

^c Grupo de Investigación en Control Avanzado GICAV, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia.

^d Departamento de Ingeniería Energética, Universidad del País Vasco UPV/EHU, España.

^e Sistema General de Regalías SGR, Departamento Nacional de Planeación, Colombia.

* Autor de correspondencia: arincon@correo.uts.edu.co

Abstract

This study focuses on implementing a Proportional-Integral (PI) control system for a hybrid solar-biomass food dryer to enhance cocoa drying efficiency. Conducted at Finca San Cristóbal, El Playón, Santander (Colombia), the project involved designing and installing a power and control system with temperature sensors, actuators, a PLC Logo V8, and a web-based monitoring interface. The system integrates solar collectors with thermal storage, a biomass combustion chamber, and forced airflow control. Experimental results revealed that airflow variations did not proportionally affect drying temperature due to thermal storage properties and fluctuating solar irradiation. Consequently, the PI control system proved ineffective in stabilizing temperature. Findings suggest that thermal stability is primarily influenced by stored energy rather than airflow modulation. Future research should explore alternative control strategies, considering these factors to optimize drying efficiency.

Keywords: solar collector, PI control, renewable energy, drying.

Introduction

The drying of agricultural products is crucial for enhancing the value of local produce and ensuring sustainable development in rural areas (Abdenouri et al., 2022). To minimize energy costs, solar energy is often utilized either directly or through solar air heaters. However, in both cases, the drying process is subject to interruptions, leading to temperature fluctuations that cannot be effectively controlled (Manrique et al., 2020). Hybrid drying systems extend the applicability of solar dryers even in unfavorable climatic conditions while enabling precise temperature regulation according to the specific requirements of each product (Simo-Tagne & Ndi-Azese, 2021). Since drying is an energy-intensive operation, the integration of solar energy is highly advantageous, particularly in developing countries (Simo-Tagne & Ndi-Azese, 2021). However, solar energy sources are inherently intermittent and influenced by weather variability. To

preserve product quality post-drying, temperature control is essential, ensuring it remains within an optimal range.

The variability of solar irradiation complicates temperature stabilization and control during the drying process. Additionally, significant temperature fluctuations can severely impact the final quality of dried products. The incorporation of an auxiliary heating system helps maintain a continuous drying operation and ensures stable and appropriate temperature levels. According to literature, the most commonly used auxiliary heating sources include biomass, gas, and electricity (Srinivasan & Muthukumar, 2021).

This study focuses on implementing temperature control using a PLC Logo V8 in a hybrid solar-biomass drying system within a collective cocoa processing facility.

Methodology

The drying process of agricultural products requires a significant amount of energy to ensure successful operation. This becomes particularly relevant in batch dryers, where there are uneven drying results in higher energy consumption, translating into increased operational costs.

Conventionally, convection-based drying systems use air as the working fluid, making the design of the system a critical factor in achieving energy efficiency (Abubakar et al., 2017). Additionally, in the design of a convective drying chamber, proper airflow distribution must be ensured to maintain uniform drying conditions and precisely control both the airflow rate and temperature of the working fluid (Amjad et al., 2020).

Experimental set-up

This study was conducted at an integrated processing facility for cocoa beans located in the municipality of El Playón, Santander, Colombia. The facility manages the entire post-harvest processing cycle, from fruit reception and dehulling to fermentation and drying, with the latter being the focus of this research. A

hybrid solar-biomass drying prototype was used, incorporating thermal energy storage to optimize drying efficiency. The system harnesses solar irradiation as the primary energy source, supplemented by a biomass pellet burner to provide additional heat for the working fluid.

The drying system integrates two renewable energy sources—solar energy and residual biomass—to heat forced airflow, which circulates through drying tables and a rotating drum where the food product is dehydrated.

To ensure continuous operation, the system required the design and implementation of electrical and control circuits capable of monitoring thermodynamic variables in real-time. The system includes thermal energy storage using fluids such as oil and paraffin, with airflow modulation managed through a Proportional-Integral (PI) control system. A PLC constantly monitors and adjusts airflow to maximize efficiency.

The study was structured into three primary phases:

- 1) System design:
 - Definition of control parameters, including input and output signals.
 - Design of the power and control circuit for the drying system.
 - Preliminary analysis of system behavior and manual control of actuators.
- 2) Installation of the electrical and control system:
 - Procurement of electrical and control components.
 - Installation of the power distribution system, including two-phase and neutral electrical connections to supply equipment operating at 110V and 220V.
 - Integration of sensors, actuators, and control elements, including a PLC, data display panel, and signal converters.
- 3) Performance evaluation and experimental testing:
 - System startup and sensor calibration, ensuring accurate data acquisition.
 - Testing the response of actuators such as fans and motors.
 - Development of the PI control logic in the PLC.

- Field testing under different operating conditions to assess the effectiveness of airflow control in regulating drying temperature.

Development of the work

The system consists of flat-plate solar collectors, thermal storage tanks, a pellet combustion chamber, a centrifugal fan, an oil pump, a combustion air fan, a rotating drum, drying tables, and a pellet injector, see Figure 1. The following section describes these components in detail.

The main components of the drying system were:

- 1) Rotating drum: designed to store fermented cocoa beans, it features an internal cylindrical mesh structure that facilitates moisture release when exposed to airflow at temperatures between 40 °C and 60 °C. The drum includes an electric motor and a mechanical transmission system to reduce rotational speed, ensuring uniform mixing of cocoa beans during drying.
- 2) Flat-plate collector with paraffin storage: equipped with a transparent glass cover that allows solar irradiation to reach a black-coated metal plate for efficient heat absorption. The plate transfers heat to two fluids: the primary working fluid used for drying and paraffin stored underneath to retain residual heat for later use when no external energy source is available.
- 3) Flat-plate collector with oil storage: similar to the paraffin-based collector but using thermal oil, which can withstand higher operating temperatures (up to 150 °C). This system is integrated with the combustion system to provide heat when solar energy is insufficient.
- 4) Oil pump: ensures internal circulation of the thermal storage fluid, preventing overheating in stagnant areas. Overheated oil degrades, evaporates, and increases pressure, potentially damaging the system. This component acts as a safeguard.

- 5) Biomass combustion chamber: where pelletized biomass and forced air injection enable controlled combustion. The heat generated is transferred to the oil in the collector to maintain system functionality during non-solar hours.
- 6) Pellet injector: includes an electric motor, mechanical reducer, hopper, and auger screw to feed solid biomass into the combustion chamber.
- 7) Centrifugal fan: controls forced airflow for drying cocoa. Its speed can be adjusted using frequency variation, allowing modulation of the drying process.
- 8) Combustion air fan: supplies oxygen for the chemical reactions that generate heat in the combustion chamber.

Figure 1. Hybrid dryer prototype



Selection of automation system components

The acquired equipment includes power wiring for plant illumination, electrical outlets for tools such as computers, drills, pressure washers, hammer mills, and pelletizers, among others. The system also incorporates a PLC-based control unit, sensors, actuators, and other essential monitoring and control devices.

Below is a summary of the key components used in the power and control system installation:

Alongside component selection, circuit designs were developed and are included as annexes. Key circuit diagrams are illustrated below (Figures 2-3).

Figure 2. Control circuit

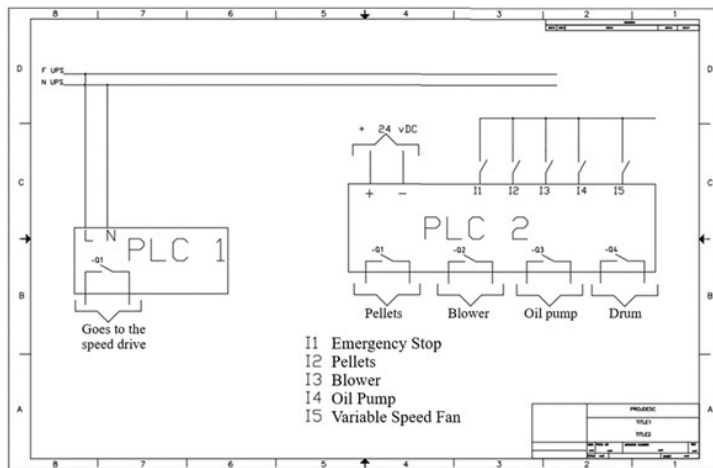
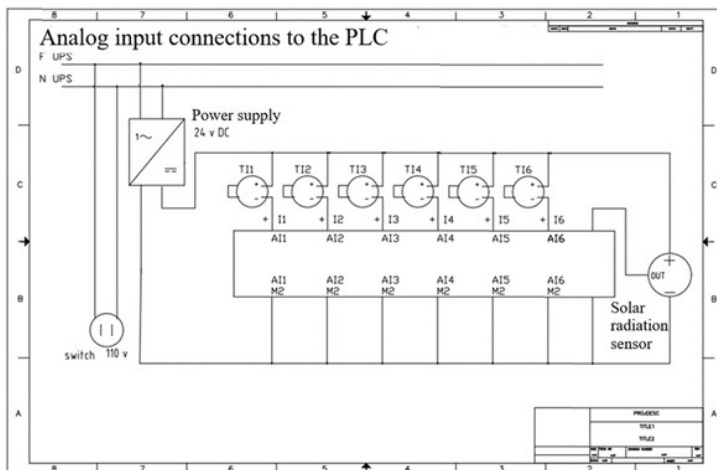


Figure 3. Analog input circuit



Installation of the electrical and control system

The installation of power and control circuits was carried out in collaboration with the technical and research team of the UTS Cocoa Project (Figures 4-5).

Figure 4. Electrical installation

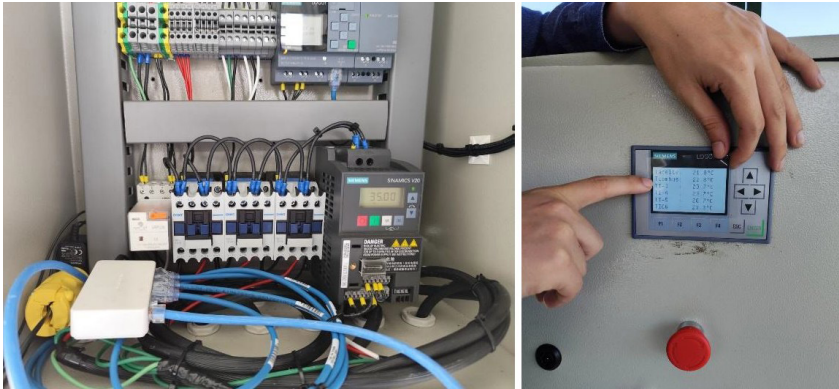
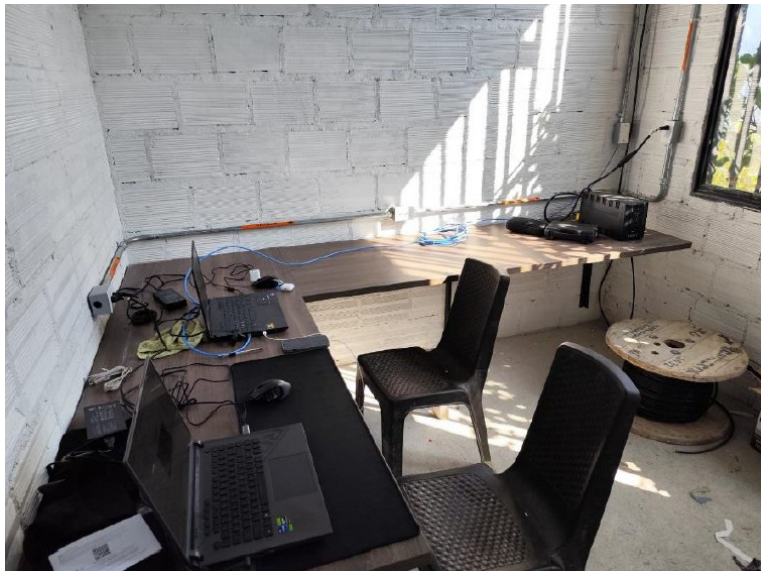


Figure 5. Control center



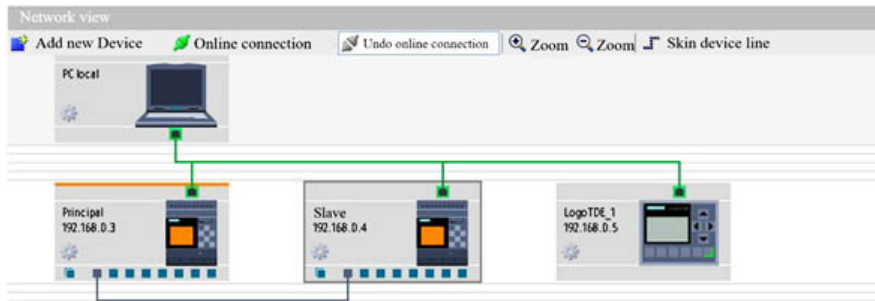
The following tasks were completed:

- Defining cable tray and conduit pathways, considering power outlets, light switches, contactor and fuse boxes, and the main control panel.
- Installing supports and drilling wall holes to secure cable trays and conduits.
- Laying power cables to supply electricity to the processing center.
- Extending electrical wiring for lighting.
- Installing LED lamps in different work areas.
- Mounting the control panel and UPS for PLC power supply.

PLC programming

Based on the system analysis, motor control, monitoring variables, and other key aspects, a PLC-based automation program was developed. The configuration consists of two PLC Logo units and a Logo TDE display panel (Figures 6-7).

Figure 6. Logo components distribution



Additionally, a PC-based interface was created to facilitate system operation (Figure 8). The user can turn motors on and off, monitor temperature and solar irradiation data, and generate logs for further analysis.

With the described tools and infrastructure in place, the next phase of the study involves conducting field tests to collect performance data and refine the drying control system.

Figure 7. Logo programming

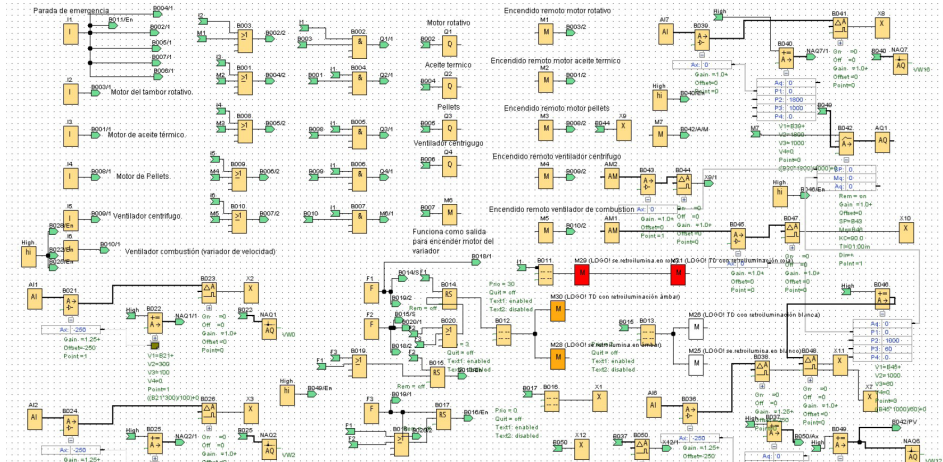
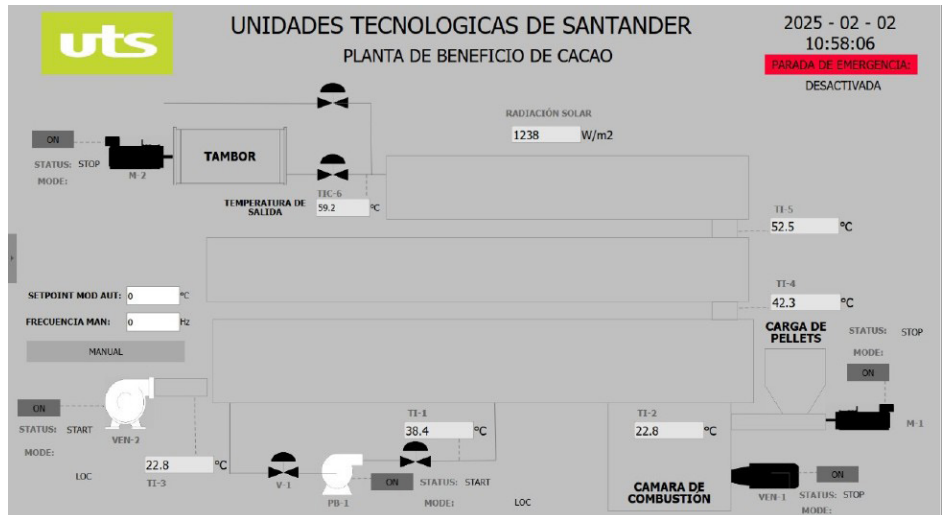


Figure 8. System interface



Results

This research project is based on the hypothesis that drying process control can be achieved by adjusting the airflow rate using a centrifugal fan, with speed variation applied as follows:

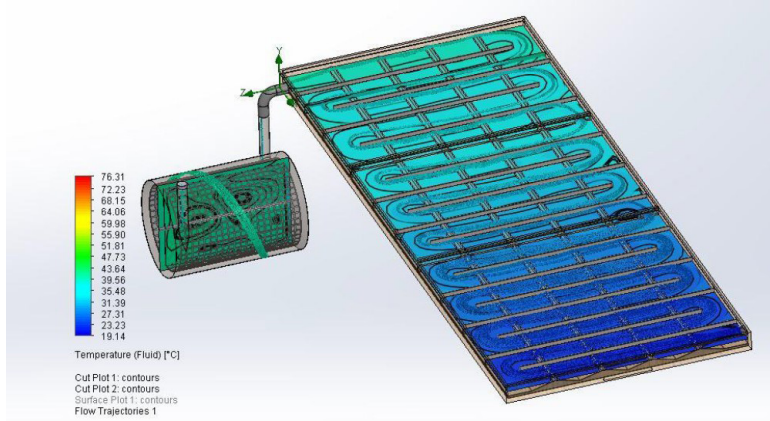
Figure 9. Centrifugal fan speed controller



The PLC transmits airflow commands to regulate the frequency inverter, ensuring a controlled airflow that stabilizes variables such as drying temperature. This hypothesis originates from the UTS technical and research team, who simulated the behavior of the solar collector and observed the following response:

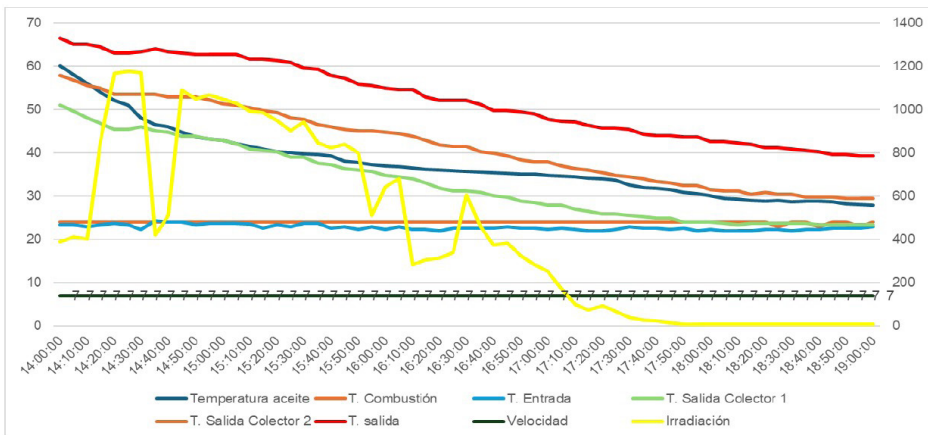
As shown in Figure 10, the simulated air temperature reaches up to 55 °C at the collector outlet—an optimal range for cocoa drying. The simulation indicates that airflow variations (m/s) influence the outlet temperature under stable conditions. However, in real-world conditions, maintaining stable heat flow is practically impossible. Thus, the speed controller, in conjunction with the PLC, is proposed as a reactive system to adjust for operational fluctuations.

Figure 10. Solar collector simulation



One of the initial tests involved maintaining a constant speed on the centrifugal fan motor to analyze system behavior over a full operating day. The collected data is shown below:

Figure 11. Drying system data



As illustrated in Figure 11, the airflow velocity remained at 7 m/s throughout the test, while air temperature exhibited a gradual decline over five hours (from 2:00 PM to 7:00 PM). This trend is primarily attributed to atmospheric conditions—specifically, the reduction in solar irradiation, which served as the

primary energy source during this test. As solar irradiation decreased, the system's overall temperature gradually declined without abrupt fluctuations.

The stable temperature response results from the use of thermal storage fluids such as thermal oil and paraffin. Figure 11 demonstrates that thermal oil, due to its superior heat transfer properties, is the first fluid to release stored energy throughout the day, reaching ambient temperature before the paraffin. Subsequently, the second collector's paraffin discharges its stored heat in response to the temperature differential between ambient air and the collector's metal surface. These observations are critical for implementing automation in the drying process.

Following the analysis of system behavior under constant fan speed, a second test was conducted in which airflow velocity was varied at different time intervals. The results are presented below:

Figure 12. Test from 8:00 AM to 12:00 PM

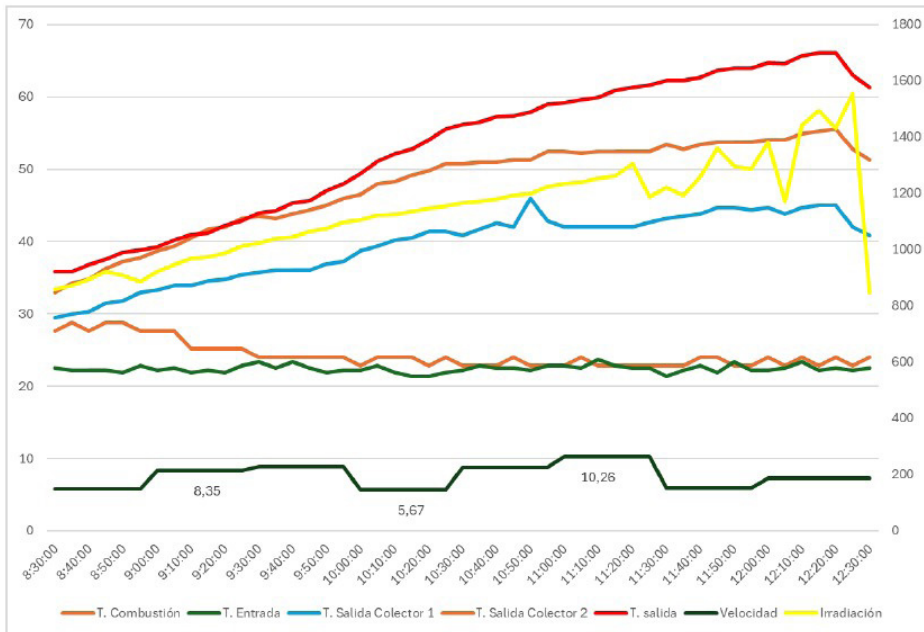
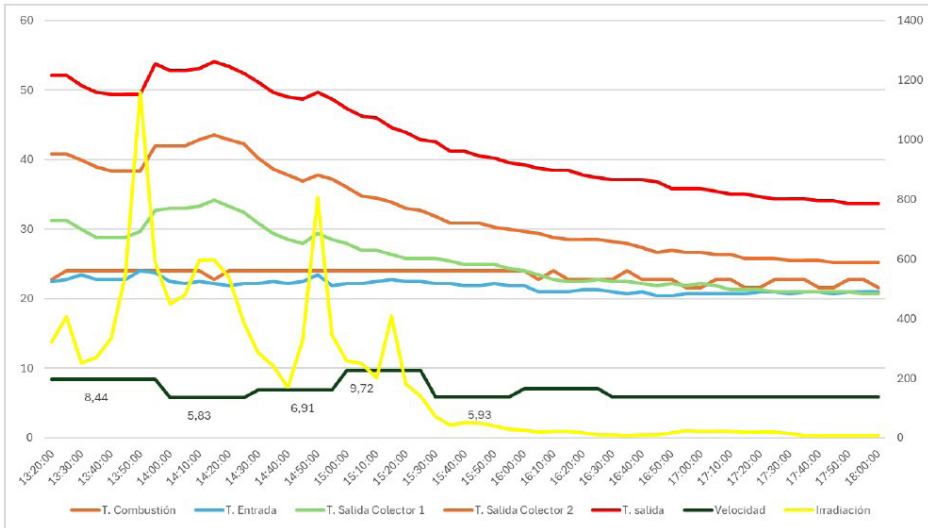


Figure 13. Test from 1:00 PM to 6:00 PM



Figures 12 and 13 illustrate a typical daily solar radiation pattern in Quinales, El Playón, Santander, where solar radiation increases until reaching a peak near midday before decreasing in the afternoon due to sunset or weather conditions such as rain.

Additionally, it was observed that modifying the centrifugal fan speed did not produce significant temperature variations within the drying system. For instance, in Figure 13, between 11:25 AM and 11:30 AM, airflow velocity was reduced from 10 m/s to 5.6 m/s, yet no notable temperature change was recorded at the system outlet. Similarly, in Figure 12, during the 3:25 PM to 3:30 PM interval, a 40 % airflow reduction did not result in proportional temperature variations. In contrast, temperature fluctuations closely followed changes in solar irradiation, which were dampened due to energy storage in thermal fluids (oil and paraffin).

As previously stated, the objective of this technological development project is to implement a Proportional-Integral (PI) controller to improve drying system efficiency. To achieve this, an attempt was made to establish proportionality between drying air velocity and system temperature by varying motor

speed using a frequency inverter (Figure 12). However, the system did not exhibit a direct response to these variations due to the presence of thermal storage fluids (oil and paraffin).

Moreover, the response time analysis suggests that system temperature adjustments become noticeable only after a delay of 1 to 2 hours. For example, in Figure 13, even after a reduction in solar irradiation at 4:00 PM, the drying system continued to generate a 16 °C temperature difference for two additional hours.

In conclusion, based on the collected and analyzed data, it is evident that controlling the system's outlet temperature by modulating airflow velocity is unfeasible. This is primarily due to the fluctuating thermal energy input and the heat transfer properties of the energy storage fluids, which buffer rapid temperature changes and delay system responses.

Conclusions

This study enabled the design and implementation of a power and control electrical system for a hybrid solar-biomass dryer at the cocoa processing center in Finca San Cristóbal, Quinales, El Playón, Santander.

The installed infrastructure comprises flat-plate solar collectors, a biomass combustion chamber, thermal storage using oil and paraffin, a rotating drum, and drying tables. These components are integrated into an automated control system utilizing a PLC Logo V8 with a web-based interface for remote monitoring and operation.

Experimental results indicated that variations in airflow did not have a proportional impact on drying temperature due to two key factors:

The nature of thermal storage in fluids (oil and paraffin), which dampens temperature fluctuations and delays the system's thermal response.

Fluctuations in solar irradiation, which cause variability in absorbed energy, making precise drying air temperature control challenging.

As a result, it is concluded that the Proportional-Integral (PI) control strategy is not suitable for this system, as the operating conditions do not allow for a stable relationship between airflow variation and outlet temperature.

Consequently, adjusting the centrifugal fan speed was ineffective in stabilizing the drying temperature.

These findings emphasize the need to explore alternative control strategies, such as predictive models based on artificial intelligence or adaptive control systems, capable of compensating for energy fluctuations within the system. Additionally, further tests with constant airflow rates are recommended to assess their impact on cocoa bean quality and optimize the drying process.

This research provides valuable insights for the development of more efficient and sustainable drying systems in the agro-industrial sector, promoting the use of renewable energy sources and enhancing cocoa post-harvest processing.

References

- Abdenouri, N., Zoukit, A., Salhi, I., & Doubabi, S. (2022). Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer. *Solar Energy*, 231, 328-342. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.026>
- Abubakar, I., Khalid, S. N., Mustafa, M. W., Shareef, H., & Mustapha, M. (2017). Application of load monitoring in appliances' energy management - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.064>
- Amjad, W., Waseem, M., Munir, A., Ghafoor, A., Asghar, F., & Gilani, G. A. (2020). Solar Assisted Dehydrator for Decentralized Controlled and Homogeneous Multi-Product Drying. *Journal of Sololar Energy Engineering*, 143(1). <https://doi.org/10.1115/1.4047671>
- Manrique, R., Vásquez, D., Chejne, F., & Pinzón, A. (2020). Energy analysis of a proposed hybrid solar-biomass coffee bean drying system. *Energy*, 202, 117720. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117720>
- Simo-Tagne M., & Ndi-Azese, M. (2021). Thermal, economic, and environmental analysis of a novel solar dryer for firewood in various temperate and tropical climates. *Solar Energy*, 226, 348-364. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.060>

Srinivasan G., & Muthukumar, P. (2021). A review on solar greenhouse dryer: Design, thermal modelling, energy, economic and environmental aspects. *Solar Energy*, 229, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>

Electromyographic signal analysis for classifying wrist movements: a cepstrum and case-based reasoning approach

Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez,^{a*} Diana María Reyes Bravo,^b Omar Lengerke,^c Arly Darío Rincón Quintero,^d Andrés Felipe Jiménez Quezada^a

Resumen

El análisis de señales electromiográficas de superficie (sEMG) es actualmente muy demandado con el fin de lograr prótesis funcionales o identificar patologías. Numerosos trabajos han empleado múltiples métodos de clasificación para el reconocimiento de patrones sEMG. Este trabajo evalúa seis tipos de movimientos (flexión-extensión, pronación-supinación, desviación radial y desviación cubital) en quince sujetos sanos, a partir de sEMGs obtenidos a nivel del tercio proximal del antebrazo. Para clasificar los movimientos, utilizamos la técnica de razonamiento basado en casos y la transformada de cepstrum (envolvente espectral con diferentes puntos) de la que extrajimos características como: valor RMS, valor pico y promedio, utilizados como entradas en el clasificador. Se analizaron cepstrums con diferente número de muestras EMG y puntos FFT, arrojando una precisión del 93.33 % para un cepstrum con 128 muestras EMG y 128 puntos FFT, siendo 8 puntos de cepstrum la más alta.

Palabras clave: movimientos de la mano, características, cepstrum, sEMG, FFT.

^a Grupo de Investigación en Sistemas de Energía, Automatización y Control GISEAC, Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia.

^b Grupo de Investigación Caring, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia.

^c Grupo de Investigación en Control Avanzado GICAV, Unidades Tecnológicas de Santander.

^d Grupo de Investigación en Diseño y Materiales DIMAT, Unidades Tecnológicas de Santander.

* Autor de correspondencia: csandoval@correo.uts.edu.co

Abstract

The analysis of surface electromyographic signals (sEMG) is currently in great demand for the purpose of achieving functional prostheses or identifying pathologies. Numerous works have employed multiple classification methods for sEMG pattern recognition. This work evaluates six types of movements (flexion-extension, pronation-supination, radial deviation and ulnar deviation) in fifteen healthy subjects, based on sEMGs obtained at the level of the proximal third of the forearm. In order to classify the movements, it used the case-based reasoning technique and the cepstrum transform (spectrum envelope with different points) from which it extracted features such as: RMS value, peak value and average, used as inputs in the classifier. Cepstrums with different number of EMG samples and FFT points were analyzed, giving a 93.33 % accuracy for a cepstrum with 128 EMG samples and 128 FFT points and 8 cepstrum points being the highest.

Keywords: hand movements, features, cepstrum, sEMG, FFT.

Introduction

EMG signals have become a very important field of study in the last decade in different applications such as: diagnosis of diseases (Subba & Bhoi, 2020; Khan, Aziz, Sohail et al., 2019), study of movement dynamics and classification of gestures for functional prostheses (Rocha León, 2020; Sandoval-Rodriguez, 2021). Electromyographic signals used to differentiate and classify diseases such as Parkinson's disease (Subba & Bhoi, 2020) using classification techniques with an accuracy of 88.38 % with Decision Trees and 54.07 % for naïve Bayes. Abdominal sEMG are used to detect gastrointestinal (GI) disorders (Khan, Aziz, Sohail et al., 2019) propose a sEMG-based framework for the detection of GI disorders, with a 100 % result in the detection and classification of these disorders. In other works they use sEMG to recognize neuromuscular or thyroid diseases (Khan, Aziz, Bilal et al., 2019; Banu, 2016; Belkhou, Jbari & El Badlaoui, 2021) with fruitful results in the different articles. On

the other hand, cerebrovascular problems if not treated in time can cause death (Yu et al., 2020) propose a low-cost, alternative and real-time diagnostic system for accurate stroke prediction using EMG bio-signals from muscles and calves, to which they use artificial intelligence (AI) algorithms with a prediction higher than 90 %. EMG signals and AI are also used in animals, in this case ruminants, and were used to know what food the animal is ingesting (Campos et al., 2018).

The classification of hand gestures from sEMG has been worked with great importance during the last years, for which different tools of artificial intelligence, classification and feature extraction have been used to effectively interpret the signal in order to drive a prosthesis for amputees or a robotic hand, the cepstral analysis technique is used to extract features in the time domain by calculating the mel-frequency cepstral coefficients (MFCC) and inputting these to a generalized regression neural network (GRNN) to classify the movements and with an overall average classification accuracy of 99.23 % (Yavuz & Eyupoglu, 2019). By working a convolutional neural network (CNNfeat) and k-nearest neighbor (KNN), support vector machine (SVM) and linear discriminant analysis (LDA) classifiers to compare 25 features, with an increase in accuracy of 4.35 %, 3.62 %, and 4.7 % for SVM, LDA and KNN respectively (Chen et al., 2020). The combination of sEMG and electroencephalography (EEG) in the study of hand gestures has yielded results of between 84 % and 87 % accuracy this with different channels (Li et al., 2017). In gesture recognition work has also been done on low-power integrated systems or platforms using different interfaces (Pancholi & Joshi, 2019) with a good result. Gesture recognition the collection and labeling of large datasets takes a long time (Aarthiy et al., 2022) proposed a strategy to combine the advantages of deep vision learning. Another field under study and important for dynamic control of robotic hands are EMG signals with the force and speed of different gestures, all this to have better grip and device responses (Wu et al., 2022; Rodriguez et al., 2023; Lee et al., 2023).

The classification is based on extracting temporal or other domain characteristics that represent the type of movement (Yavuz & Eyupoglu, 2019;

Junior et al., 2020; Karheily et al., 2022; Li, Shi & Yu, 2021), with these characteristics the expert systems are trained to identify the type of movement such as: artificial neural networks (ANN), case-based reasoning (CBR), AI algorithms among others (Sandoval Rodríguez, 2013; Jaramillo-Yáñez, Benalcázar & Mena-Maldonado, 2020; Yang, Ren & Duan, 2023; Zhang, He & Yang, 2020; Wang et al., 2023; Seyidbayli, Salhi & Akdogan, 2020), where all have shown good classification results. In this sense, cepstrum processing techniques have been obtained for hand movements, features such as peak value, RMS, mean value, applying these features to case-based reasoning. In this work, cepstrum was used in order to make a useful contribution to the development of functional prostheses, with good success rates. In the following, it can be seen how the data was collected, the different theoretical components used, the results obtained, a brief discussion and conclusions for future work.

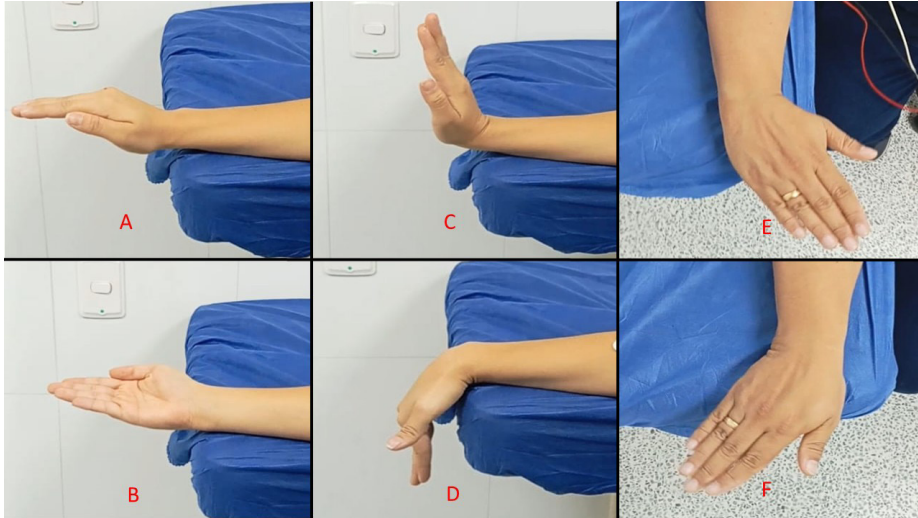
Materials and methods

Data base

The following gestures were studied: pronation-supination, flexion-extension, radial and ulnar deviation see Figure 1 (A-B, C-D, E-F). There are 90 records for the six gestures from 15 healthy subjects. We used ML880 Powerlab *hardware*, Dual Bio Amp ML135 signal conditioner, Labchart *software* from Adinstruments as an interface to observe the sEMG signals and Ag/AgCl (silver chloride silver) sensors were used (Sandoval Rodríguez, 2013).

For the acquisition of the sEMG, some factors were taken into account: internal disturbances such as muscle fatigue and mental stress, external disturbances such as “Cross Talk” generated by having the electrodes very close to each other, for the acquisition of the signal they were located with a minimum distance of 20 mm between them, aspects in the skin were also considered such as the villi and sweat (Sandoval Rodríguez, 2013; Konrad, 2005; Brunetti et al., 2005).

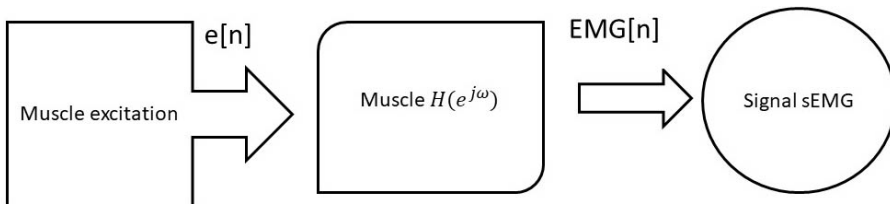
Figure 1. Movements studied: pronation (A), supination (B), extension (C), flexion (D), radial deviation (E), and ulnar deviation (F)



Signal processing

Cepstrum: Since the 1970, homomorphic techniques in signal processing have had a significant relevance in pattern recognition in non-stationary signals such as sEMG, which makes cepstrum derivatives an alternative for electromyographic pattern recognition. Taking into account that homomorphic systems are a class of nonlinear systems that are subjected to a superposition principle. Figure 2 shows the summarized methodology for using cepstral coefficients in electromyography.

Figure 2. Description of how the cepstrum is obtained (Sandoval Rodríguez, 2013; Deller, 1993)



Where the $EMG[n]$ signal corresponds to the muscle excitation signal $e[n]$ filtered by $H(e^{j\omega})$. Or seen in another way the $EMG[n]$ signal is obtained as the convolution of $e[n]$ with $h[n]$ as seen in equation 1.

$$E[n] = e[n] * h[n] \quad (1)$$

Where $h[n]$ is the inverse Fourier transform of $H(e^{j\omega})$.

An important consideration to take into account is that the proposed algorithm allows selecting both the segment of the $sEMG$ to be evaluated and the number of cepstrum points to be used to reconstruct the spectrum envelope. This observation is of interest because as the number of cepstrum coefficients increases, the definition of the envelope increases. However, if all the coefficients were taken, the whole spectrum would be reconstructed and not its envelope. Figure 3 shows this fact.

Features: Table 1 shows the three characteristic formulas used in this work, where x_i is the envelope spectrum.

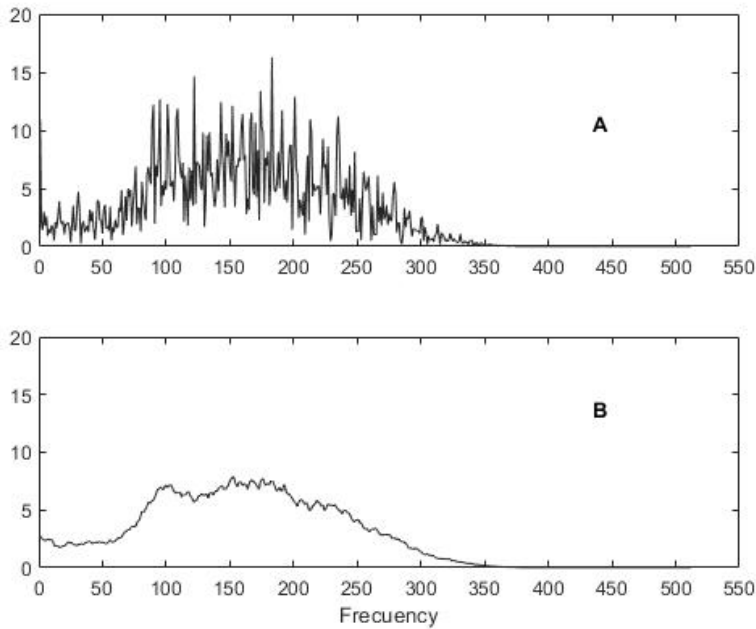
Table 1. Features used

Characteristics	Equation
Root mean square	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$ (2)
Average	$Dc = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ (3)
Peak value	$Peak = \max(x_i)$ (4)

Case-based reasoning (CBR)

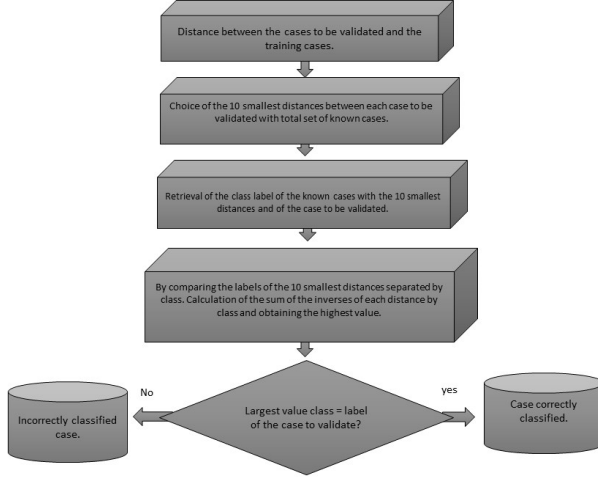
This method is often used in problems where it is required to identify or classify classes, that is, problems where patterns are identified. This technique consists of organizing a base of known cases. This comparison is made using some metric such as: Euclidean, Manhattan, etc.

Figure 3. Fourier spectrum using 1024 points for the spectrum (A), spectrum envelope using 64 cepstrum coefficients (B)



Each new case (pattern) is compared with the training database (typically 80 % of the cases belong to our database and the remaining 20 % to the cases to be validated (Sandoval Rodríguez, 2013; Gómez & González, 2014), the degree of membership (some chosen metric) of the case to be validated is measured with respect to the class to which it belongs. In addition, with the help of some inference mechanism, the membership or not of the case to be validated is decided. Sometimes the Euclidean distance between the case to be validated and each of the cases belonging to the training group is used. Then, the smallest distances are chosen, where the case to be validated is expected to be located. The number of elements that form this group is chosen in an exploratory way, in (Sandoval Rodríguez, 2013; Gómez & González, 2014) it is proposed to use the 10 shortest distances for the inference mechanism. For the present investigation, the inference mechanism shown in Figure 4 was implemented.

Figure 4. Inference mechanism used in this research



Euclidean distance

Euclidean distance is an “ordinary” distance between two points of a Euclidean space. Where we have two m by n matrices X , which are treated as m (1 by n) row vectors $X_1, X_2, \dots, X_m$, the different distances between the vector X_s and X_t are defined in this way see equation 5.

$$d^2 = (x_s - x_t)(x_s - x_t)^1 \quad (5)$$

Results

Table 2 shows the percentages of success of the classifier, where the different points of the FFT and different cepstrum points of the sEMG are shown.

The percentages of hits: for cepstrum with 128 samples of the EMG and 128 points of the FFT a mean of 91.25 and an IQR (84.58-92.9121), for cepstrum with 256 samples of the EMG and 256 points of the FFT a mean of 84.38 and an IQR

(81.1425-87.34), for cepstrum with 512 samples of the EMG and 512 points of the FFT a mean of 84, 58 and an IQR (81.66-91.5575), for cepstrum with 1024 EMG samples and 1024 FFT points a mean of 80.63 and an IQR (75.47-85.9375), where it was evidenced that the best results were using 128 cepstrum.

Table 2. Hit rates with different cepstrum and different FFT points

Cepstrum points	Success 128 EMG samples and 128 points of the FFT (%)	Success 256 EMG samples and 256 points of the FFT (%)	Success 512 EMG samples and 512 points of the FFT (%)	Success 1024 EMG samples and 1024 points of the FFT (%)
2	91.6	87.9	92.7	87.7
4	92.2	88.7	93.2	86.2
8	93.3	85.6	88.1	80.6
16	91.2	84.3	84.5	85.0
32	88.3	82.0	82.2	80.6
64	82.2	80.8	81.4	73.7
128	83.3	78.7	77.0	70.0

Table 3. Standard deviation with different cepstrum and different points of the FFT

Cepstrum points	128 EMG samples and 128 FFT points	256 EMG samples and 256 FFT points	512 EMG samples and 512 FFT points	1024 EMG samples and 1024 FFT points
2	3.82	7.14	5.53	5.31
4	3.64	7.53	4.16	5.07
8	3.91	6.82	6.52	10.1
16	6.46	6.32	6.21	6.39
32	6.28	6.34	5.21	6.79
64	7.86	6.11	5.31	10.8
128	5.89	9.26	8.6	9.32

Standard deviation: for cepstrum with 128 EMG samples and 128 FFT points a mean of 5.89 and an IQR (3.8425-6.415), for cepstrum with 256 EMG samples and 256 FFT points a mean of 6.82 and an IQR (6.325-7.4325), for cepstrum with 512 EMG samples and 512 FFT points a mean of 5, 53 and an IQR (5.235-6.4425), for cepstrum with 1024 EMG samples and 1024 FFT points a mean of 6.79 and an IQR (5.58-9.935), where it was evidenced that the best results were using 256 cepstrum.

Conclusion

This paper presents the results of applying a methodology for classifying movement types based on surface electromyography (sEMG) signals. The proposed methodology relies on pattern recognition techniques, utilizing case-based reasoning and Euclidean metrics for movement discrimination. The findings confirm that it is possible to accurately classify the six studied movements with high classification rates. These results demonstrate the effectiveness of the methodology in distinguishing subtle variations in muscle activity, highlighting its potential applicability in fields such as rehabilitation, prosthetic control, and human-machine interaction. Furthermore, the robustness of the approach suggests that it could be extended to classify a broader range of movements or adapted to different experimental conditions, improving the versatility of sEMG-based control systems. Future work may explore the integration of machine learning techniques to enhance classification accuracy and generalization across different individuals and movement patterns.

References

Aarthy, S. L., Malathi, V., Hamdi, M., Hilali-Jaghdam, I., Abdel-Khalek, S., & Mansour, R. F. (2022). Recognition of hand gesture using electromyography signal: human-robot interaction. *Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2022/4718684>

- Banu, G. R. (2016). Predicting thyroid disease using linear discriminant analysis (LDA) data mining technique. *Communications on Applied Electronics*, 4(1), 4-6. <https://doi.org/10.5120/cae2016651990>
- Belkhou, A., Jbari, A., & El Badlaoui, O. (2021). A computer-aided-diagnosis system for neuromuscular diseases using Mel frequency Cepstral coefficients. *Scientific African*, 13, e00904.
- Brunetti, F., Bueno, L., Ruiz, A. F., Sastoque, J. C. M., & Rovira, J. L. P. (2005). Ruido en sistemas electromiográficos superficiales portátiles. In *XXVI Jornadas de Automática: 7-10 de septiembre de 2005*, Alicante-Elche, 57-62.
- Campos, D. P., Abatti, P. J., Bertotti, F. L., Hill, J. A. G., & Silveira, A. L. F. da. (2018). Surface electromyography segmentation and feature extraction for ingestive behavior recognition in ruminants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 325-333.
- Chen, H., Zhang, Y., Li, G., Fang, Y., & Liu, H. (2020). Surface electromyography feature extraction via convolutional neural network. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 11(1), 185-196. <https://doi.org/10.1007/s13042-019-00966-x>
- Deller, J. R. (1993). *Discrete-time processing of speech signals*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Gómez, J. de J., & González, D. M. (2014). *Evaluación de daños en tuberías, mediante Razonamiento Basado en Casos y procesamiento de señales con transformada Wavelet y MPCA*. Engineering Thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Jaramillo-Yáñez, A., Benalcázar, M. E., & Mena-Maldonado, E. (2020). Real-time hand gesture recognition using surface electromyography and machine learning: A systematic literature review. *Sensors*, 20(9), 2467. <https://doi.org/10.3390/s20092467>
- Junior, J. J. A. M., Freitas, M. L. B., Siqueira, H. V., Lazzaretti, A. E., Pichorim, S. F., & Stevan Jr, S. L. (2020). Feature selection and dimensionality reduction: An extensive comparison in hand gesture classification by sEMG in eight channels armband approach. *Biomed Signal Process Control*, 59, 101920. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.101920>

- Karheily, S., Moukadem, A., Courbot, J.-B., & Abdeslam, D. O. (2022). sEMG time-frequency features for hand movements classification. *Expert Systems with Applications*, 210, 118282. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118282>
- Khan, M. U., Aziz, S., Bilal, M., & Aamir, M. B. (2019). Classification of EMG signals for assessment of neuromuscular disorder using empirical mode decomposition and logistic regression. In *2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)*, 237-243.
- Khan, M. U., Aziz, S., Sohail, M., Shahid, A. A., & Samer, S. (2019). Automated Detection and classification of gastrointestinal diseases using surface-EMG signals. In *2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC)*, 1-8.
- Konrad, P. (2005). *The ABC of EMG. A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography*.
- Lee H.-M. et al. (2023). Movement pattern and upper extremity muscle activation during fast and slow continuous steering movement. *Human Movement Science*, 87, 103049. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.103049>
- Li, W., Shi, P., & Yu, H. (2021). Gesture recognition using surface electromyography and deep learning for prostheses hand: state-of-the-art, challenges, and future. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 621885. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.621885>
- Li, X., Samuel, O. W., Zhang, X., Wang, H., Fang, P., & Li, G. (2017). A motion-classification strategy based on sEMG-EEG signal combination for upper-limb amputees. *J NeuroEngineering Rehabil*, 14(2), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0212-z>
- Pancholi, S., & Joshi, A. M. (2019). Electromyography-based hand gesture recognition system for upper limb amputees. *IEEE Sensors Letters*, 3(12), 1-4.
- Rocha León, C. (2020). *Sistema de reconocimiento de patrones de agarre en base a un solo canal de electromiografía superficial como medio de entrenamiento y guía para los pacientes con amputación transradial en la fundación FABRILAB*. Engineering Thesis, Universidad el Bosque, Bogotá, Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/3944>
- Rodriguez, C. L. S., Mejia, R. V., Romero, B. E. T., Quintero, A. D. R., & Nieves, A. J. R. (2023). Relationship between force signal and superficial

- electromyographic signals associated to hand movements. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(1), 64-73. <https://doi.org/10.21533/pen.v11.i1.78>
- Sandoval Rodríguez, C. L. (2013). *Caracterización de la dinámica de los movimientos básicos de la mano a partir de la actividad electromiográfica del antebrazo*. Universidad Industrial de Santander.
- Sandoval-Rodriguez, C. L., Veslin-Díaz, E. Y., Tarazona-Romero, B. E., Ascanio-Villabona, J. G., Cárdenas-Arias, C. G., & Angulo-Julio, C. A. (2021). Electromechanical hand prototype for the simulation of the opening and closing movement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 12035.
- Seyidbayli, C., Salhi, F., & Akdogan, E. (2020). Comparison of machine learning algorithms for EMG signal classification. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8(2), 1165-1176.
- Subba, R., & Bhoi, A. K. (2020). Feature extraction and classification between control and Parkinson's using EMG signal. In *Cognitive Informatics and Soft Computing: Proceeding of CISC 2019*, 45-52.
- Wang, L., Fu, J., Chen, H., & Zheng, B. (2023). Hand gesture recognition using smooth wavelet packet transformation and hybrid CNN based on surface EMG and accelerometer signal. *Biomedical Signal Processing and Control*, 86, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105141>
- Wu, Y., Liang, S., Yan, T., Ao, J., Zhou, Z., & Li, X. (2022). Classification and simulation of process of linear change for grip force at different grip speeds by using supervised learning based on sEMG. *Expert Systems with Applications*, 206, 117785. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117785>
- Yang, Y., Ren, J., & Duan, F. (2023). The spiking rates inspired encoder and decoder for spiking neural networks: an illustration of hand gesture recognition. *Cognitive Computation*, 15, 1257-1272. <https://doi.org/10.1007/s12559-022-10027-1>
- Yavuz, E., & Eyupoglu, C. (2019). A cepstrum analysis-based classification method for hand movement surface EMG signals. *Medical & Biological*

Engineering & Computing, 57, 2179-2201. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02024-8>

- Yu, J., Park, S., Kwon, S.-H., Ho, C. M. B., Pyo, C.-S., & Lee, H. (2020). AI-based stroke disease prediction system using real-time electromyography signals. *Applied Sciences*, 10(19), 6791. <https://doi.org/10.3390/app10196791>
- Zhang, Z., He, C., & Yang, K. (2020). A novel surface electromyographic signal-based hand gesture prediction using a recurrent neural network. *Sensors*, 20(14), 3994. <https://doi.org/10.3390/s20143994>

Conclusión

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería es una obra que compila contribuciones significativas en diversas áreas de la ingeniería, con el propósito de fortalecer la formación de estudiantes, académicos, investigadores y profesionales del sector. A través de estudios de caso, prototipos y soluciones implementadas, este libro ha tenido como objetivo fomentar vocaciones científicas y tecnológicas, así como ofrecer nuevas perspectivas en el diseño y la optimización de procesos sostenibles. La fusión de instrumentación, control, automatización y análisis de datos ilustra cómo la ingeniería puede progresar hacia un futuro más eficiente y responsable, promoviendo el desarrollo sostenible en beneficio de la industria, la academia y la sociedad.

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería
de Ángel Tlatelpa Becerro
y Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)
se terminó en agosto de 2025.

Los progresos en diversas ramas de la ingeniería impactan en la sociedad contemporánea, pues estos avances se transforman en instrumentos para abordar los retos sociales, económicos y ambientales: desde el uso de dispositivos y máquinas específicas en los ámbitos industrial y científico, hasta la adopción de *software* especializado que agiliza la solución de tareas complejas en el entorno global.

Paradigmas en la ciencia y la ingeniería, segundo volumen de la serie “Avances en ingeniería”, ofrece una recopilación de investigaciones de diversas áreas de la ingeniería, que exponen paradigmas en propuestas de soluciones teóricas y prácticas. A través de esta obra, los coordinadores pretenden dar a conocer avances y logros en ciencia y tecnología, con el objetivo de fortalecer el futuro profesional y contribuir al desarrollo social sostenible.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS