REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

"Semillero de Investigadores"

ISSN: 2007-9400

"Tecnología para la sociedad"

www.revistatecnologiadigital.com

Desde 2011

Volumen 15 Número 2

Año 2025

REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

CONSEJO EDITORIAL.

Presidente. Dr. Héctor Guerra Crespo.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
hgcrespo@hotmail.com, hector.gc@tuxtla.tecnm.mx

Secretario. M.C. Walter Torres Robledo.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
walter.tr@tuxtla.tecnm.mx

Editor M.C. Imelda Valles López.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
imelda.vl@tuxtla.tecnm.mx

Editor M.C. Octavio Ariosto Ríos Tercero.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
octavio.rt@tuxtla.tecnm.mx

Editor traductor. Dra. Magdalena Guerra Crespo.
Departamento de Fisiología, Facultad de Medicina, UNAM.
mguerra@ifc.unam.mx

Editor traductor. Dra. María Candelaria Gutiérrez Gómez.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
maria.gg1@tuxtla.tecnm.mx

Revista Tecnología Digital.

Índice LatIndex: 23658.
ISSN: 2007-9400.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
Carretera Panamericana Km. 1080.
C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
Departamento de Sistemas y Computación.
01-961-6150461 Ext. 319
www.revistatecnologiadigital.com

Editor Responsable.

Editorial Tecnología Didáctica®.
Dr. Héctor Guerra Crespo.
Registro del padrón de editores: 970-94054 de fecha 22-junio-2004.
Calle Oleaje 388 fraccionamiento La Herradura, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29054, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
www.tecnologiadidactica.com

Revista Tecnología Digital. Año 15, Volumen 15, Número 2 de 22 de diciembre de 2025 es una publicación anual on-line www.revistatecnologiadigital.com editada por Héctor Guerra Crespo oficinas en Calle Oleaje 388 fraccionamiento La Herradura, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.P. 29054. Correo-e hgcrespo@hotmail.com. Editor responsable: Héctor Guerra Crespo. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2014-022811040300-203 otorgado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. ISSN 2007-9400. Responsable de la última actualización de este número Dr. Héctor Guerra Crespo Presidente del Consejo Editorial. Fecha de la última modificación, 22 de diciembre de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la publicación.
Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor responsable. Índice LatIndex: 23658.

Índice.

	Página.
Aplicación móvil para los métodos de transporte de investigación de operaciones.	 1
Desarrollo de aplicación web para comunicación aumentativa y alternativa dirigida a niños con trastornos de lenguaje.	 17
Desarrollo de un controlador lógico programable de bajo costo basado en Raspberry PI	 29
Desarrollo de un Phantom de músculo para la calibración de resolución espacial en equipo de ultrasonido.	 43
Desarrollo e implementación de ambientes virtuales para la difusión turística del patrimonio cultural de Campeche.	 55
Desinfección con lámpara UVC usando robot móvil omnidireccional.	 67
Diseño de móvil omnidireccional para desinfección de espacios cerrados.	 79
Diseño de un sistema de extracción de jugo para productores de limón persa.	 91
Diseño, simulación y análisis de un sembrador mecánico.	 107
Diseño virtual del péndulo de Charpy para polímeros utilizando una interfaz interactiva.	 127
Estimación del índice de crecimiento de la lechuga mediante el aprendizaje profundo.	 143
Implementación de control inteligente para la mejora del factor de potencia y calidad de la energía.	 157
Intercambiador de calor tipo Serpentín con instrumentación electrónica usando Tecnología Industry 4.0.	 167
Machine learning para evaluación de estrategias de enseñanza-aprendizaje del sistema web de planeaciones didácticas.	 189
Modelos de lenguaje para difusión del conocimiento agrícola.	 199
Monitoreo inteligente de la calidad del agua: gestión sostenible del recurso hídrico.	 215

Perspectiva tecnológica del Tren Maya ante la llegada del Turista: un enfoque sobre infraestructura digital, experiencia del usuario y desarrollo tecnológico en Escárcega, Campeche. 225

Planificación de trayectoria en mapa de ocupación para robot móvil de almacén. 233

Planificador inteligente preliminar basado en PDDL para ensamble de piezas a nivel industrial. 243

Sistema de señalización para la optimización de tiempos en procesos de ensamblaje de arneses eléctricos en la industria autoelectromotriz. 255

Aplicación móvil para los métodos de transporte de investigación de operaciones.

Mobile application for operations research transport methods.

Erick Alexis Velasco Montes de Oca (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
l20271199@tuxtla.tecnm.mx.

Roberto Cruz Gordillo* (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
roberto.cg@tuxtla.tecnm.mx.

Jorge William Figueroa Corzo (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
jorge.fc@tuxtla.tecnm.mx.

Alicia González Laguna (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, alicia.gl@tuxtla.tecnm.mx.

Mónica Laurent León Juárez (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
monica.lj@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 13, 2025; aceptado en diciembre 02, 2025.

Resumen.

El proyecto describe el desarrollo de una aplicación móvil diseñada para optimizar la resolución de problemas de transporte. Como punto de partida, se expone el problema que motivó su creación: la necesidad de comparar varios métodos heurísticos, un proceso que consume tiempo y dificulta la toma de decisiones eficientes debido a la ausencia de un enfoque claro que garantice resultados óptimos; se demuestra la eficiencia y eficacia de los métodos heurísticos de transporte mediante una herramienta interactiva y adaptada a las necesidades actuales. Se utilizó la metodología en cascada para estructurar el desarrollo de la aplicación integrando los algoritmos de Esquina Noroeste, Costo Mínimo y Vogel. Métodos tradicionales en la literatura de transporte, además de ellos se programaron 3 métodos heurísticos alternativos, algoritmos de Esquina Suroeste, Demanda Maxima y Costo Mínimo por lotes (Cofermin). Esta metodología permite abordar fases como la recopilación de requisitos, diseño, implementación y pruebas para asegurar un resultado funcional y adaptado a los objetivos. Asimismo, el documento presenta ejemplos del código desarrollado y sus respectivas funciones, lo que permite ilustrar el diseño técnico y la implementación de las características clave de la aplicación, como la interacción con sliders, botones y celdas. Los resultados muestran que la aplicación mejora la toma de decisiones al proporcionar soluciones rápidas y confiables.

Palabras claves: Aplicación móvil, metodología en cascada, métodos heurísticos de transporte, toma de decisiones.

Abstract.

The project describes the development of a mobile application designed to optimize the resolution of transportation problems. As a starting point, it presents the problem that motivated its creation: the need to compare various heuristic methods, a process that is time-consuming and hinders efficient decision-making due to the lack of a clear approach that ensures optimal results. The efficiency and effectiveness of transportation heuristic methods are demonstrated through an interactive tool tailored to current needs.The waterfall methodology was used to structure the development of the application, integrating the Northwest Corner, Minimum Cost, and Vogel algorithms. This methodology makes it possible to address phases such as requirements gathering, design, implementation, and testing to ensure a functional outcome aligned with the objectives. Additionally, the document presents examples of the developed code and its respective functions, which illustrate the technical design and implementation of the application's key features, such as interaction with sliders, buttons, and cells. The results show that the application enhances decision-making by providing fast and reliable solutions

.

Keywords: Cascade methodology, decision-making, heuristic transport methods, mobile application.

1. Introducción.

La gestión eficiente del transporte es un reto esencial en la logística moderna. Los métodos heurísticos permiten obtener soluciones viables en menor tiempo, facilitando la toma de decisiones. Este artículo presenta una aplicación móvil que integra dichos métodos, con el fin de mejorar la enseñanza y práctica de la Investigación de Operaciones.

El Tecnológico Nacional de México Campus Tuxtla Gutiérrez es una Institución educativa pública de educación superior, que forma parte del Tecnológico Nacional de México.

La misión del Tecnológico se orienta a la formación integral de profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a valores éticos. Simultáneamente, su visión aspira a ser una Institución de excelencia en la educación superior Tecnológica del Sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región. (Comunicacion,2018).

La Ingeniería en Sistemas Computacionales forma a profesionistas capaces de diseñar, desarrollar y optimizar soluciones tecnológicas mediante el uso de software, hardware y redes para resolver problemas complejos en diversos sectores. Esta disciplina combina conocimientos de programación, redes, bases de datos, inteligencia artificial y gestión de proyectos, permitiendo a los ingenieros abordar desafíos tanto técnicos como estratégicos en entornos digitales y físicos.

Dentro del plan de estudios, una materia clave es Investigación de Operaciones, la cual se enfoca en aplicar modelos matemáticos, estadísticos y algoritmos para mejorar la toma de decisiones en sistemas complejos. Una de sus unidades más aplicadas es el estudio de los métodos de transporte, que buscan minimizar costos logísticos mediante modelos como el método de la esquina noroeste, el costo mínimo, la aproximación de Vogel, el cruce de arroyo y el método MODI. Estos enfoques son fundamentales en sectores como la manufactura, la salud y la distribución, donde la eficiencia operativa es clave.

Los métodos heurísticos como esquina noroeste, el costo mínimo, la aproximación de Vogel, cruce de arroyo y Modificación de Distribuciones Iniciales (MODI), desempeñan un papel fundamental en la optimización de asignación de recursos y la toma de decisiones estratégicas en problemas de transporte.

Según Sanchez (2021) "El modelo de transporte alude al intercambio de artículos de un número específico de fuentes a un número específico de puntos de destino con un costo mínimo de transporte."

El método de esquina noroeste se considera uno de los pioneros en este ámbito, se desarrolló como un método simple y secuencial para asignar unidades en una matriz de costos, el método del costo mínimo se especializa en minimizar

los costos como lo indica Pacheco Molina (2019) asignando "la mayor cantidad posible a la celda con el costo unitario mínimo" (p.10), lo que resultó en mejoras al ofrecer soluciones más eficientes y económicas. El método de aproximación de Vogel una versión mejorada de nivel intermedio de los métodos de costo mínimo y esquina noroeste, este modelo requiere de la realización de un número generalmente mayor de operaciones que los demás métodos heurísticos existentes, este enfoque de nivel medio permite una asignación más flexible y adaptable.

En el contexto de la transformación digital, la optimización de procesos logísticos mediante herramientas tecnológicas se ha vuelto indispensable. La aplicación propuesta responde a esta necesidad, permitiendo resolver problemas de transporte de manera automatizada, eficiente y adaptable a distintos escenarios operativos, como la distribución de insumos médicos, alimentos o productos industriales.

El proyecto es una aplicación móvil orientada a la optimización de rutas de distribución. Se sustenta en los conocimientos adquiridos en la materia de Investigación de Operaciones, lo que permite:

- Modelar el problema de transporte como una matriz de costos entre orígenes y destinos
- Aplicar métodos como Vogel o MODI para encontrar rutas óptimas con menor gasto
- Traducir los modelos matemáticos en algoritmos funcionales
- Simular escenarios logísticos y visualizar resultados en tiempo real
- Evaluar la eficiencia de cada método mediante pruebas comparativas

Gracias a esta integración, el proyecto no solo cumple con los objetivos técnicos, sino que también incorpora una base analítica sólida que lo hace escalable y aplicable en entornos reales como la distribución de insumos médicos o productos de consumo.

2. Métodos.

Para evaluar la eficiencia y eficacia de cada método heurístico de transporte, así como de las tres propuestas que la aplicación genera para cada problema planteado por el usuario, se analizarán todos los resultados obtenidos. De esta forma, se identificará con qué método se alcanza el menor costo, además de contabilizar las veces en que dicho método resulta ser el más económico.

En cualquier actividad industrial, empresarial o de negocios, el transporte de bienes o productos desde los centros de producción (orígenes) hacia los centros de consumo (destinos) es una tarea fundamental. Realizar esta actividad de manera óptima, es decir, al menor costo posible, representa ventajas económicas y competitivas.

A. **Método de esquina Noroeste** El método de la esquina Noroeste es operacionalmente muy sencillo, consiste en empezar con la primera casilla de la tabla y asignar a esa casilla la mayor cantidad posible. Esa cantidad máxima posible es el mínimo del requerimiento del correspondiente destino y de la disponibilidad del origen correspondiente. Se pasa a la casilla de la derecha o de abajo, dependiendo si se agotaron los requerimientos o las disponibilidades y se asigna a esa casilla la mayor cantidad posible, y así sucesivamente hasta agotar todos los requerimientos y disponibilidades. (Casuso, 2015 como se citó en (Garzón Espinosa & Llumiquinga Pachacama, 2019, pág. 14)).
B. **Método de costo mínimo** Según Pacheco Monina (2019) dice lo siguiente:
El método del costo mínimo o método de los mínimos costos, es un algoritmo desarrollado con el objetivo de resolver problemas de transporte o distribución, con mejores resultados que otros métodos, dado que se enfoca en las rutas que presentan menores costos, determina una mejor solución al concentrarse en las rutas más económicas. Para su aplicación, se asigna la mayor cantidad posible a la celda con el costo unitario mínimo, si existen dos o más celdas con iguales costos se selecciona el que se pueda satisfacer la mayor demanda; luego se tacha la fila o columna satisfecha y se emplean las cantidades de oferta y demanda como correspondan. (pág. 10).
C. **Método de aproximación de Vogel** Es un método basado en el concepto de ganancia. La estrategia del método de Vogel consiste en asignar valores a las celdas de menor costo no saturadas, procurando que, entre

las filas o columnas que puedan saturarse, se elija aquella con la máxima ganancia. De esta manera, se evita saturar celdas con costos bajos (aunque superiores al mínimo) y, en consecuencia, tener que asignar valores posteriormente a celdas con costos elevados (Leyes, 2009, como se citó en Garzón Espinosa & Llumiquinga Pachacama, 2019; Hernández Molina, 2021).

D. **Método de cruce de arroyo** Hernández Molina (2021), define en su trabajo de Investigación de Operaciones I lo siguiente: El método del Cruce del Arroyo, Trampolín, o de Salto de Piedra en Piedra (Stepping Stone) es un método de resolución de problemas de transporte en programación lineal que consiste en calcular cuál sería la variación del costo del envío a través de las rutas posibles, es decir asignar cierta cantidad de artículos desde varios orígenes (fábricas/fuentes) a un conjunto de destinos (clientes/depósitos) de tal manera que se disminuyan los costos, hasta optimizar el objetivo. Se parte de una solución factible de Costo Mínimo..

E. **Método MODI**. El algoritmo MODI, también llamado método de los costes ficticios, implica la inclusión de una fila y una columna adicionales en la matriz de costos, que contienen costos ficticios predeterminados (llamados números MODI). Esta técnica permite calcular los índices de mejora para las celdas no utilizadas, ofreciendo así una estrategia para optimizar la solución del problema.

Metodología Técnica.

Explicación del proceso general actual:

Dibujo de la tabla: El procedimiento se realiza de forma manual. Cada vez que un estudiante o profesor desea resolver un problema de transporte, comienza dibujando la tabla correspondiente.

Llenado de celdas: Se completan todas las celdas con los datos del problema.
Selección del método: Se elige el método de resolución; normalmente se utiliza el de esquina noroeste por ser el más sencillo.

Resolución del problema: Se aplica el método seleccionado paso a paso.

Obtención del resultado: Se obtiene el resultado en segundos o minutos, dependiendo del tamaño de la tabla.

Comparación con otros métodos: Si el resultado no es satisfactorio, es necesario resolver nuevamente el mismo problema utilizando los métodos restantes para identificar cuál proporciona el menor costo de transporte.

En la figura 1, se muestra el proceso actual del diagrama BPMN.

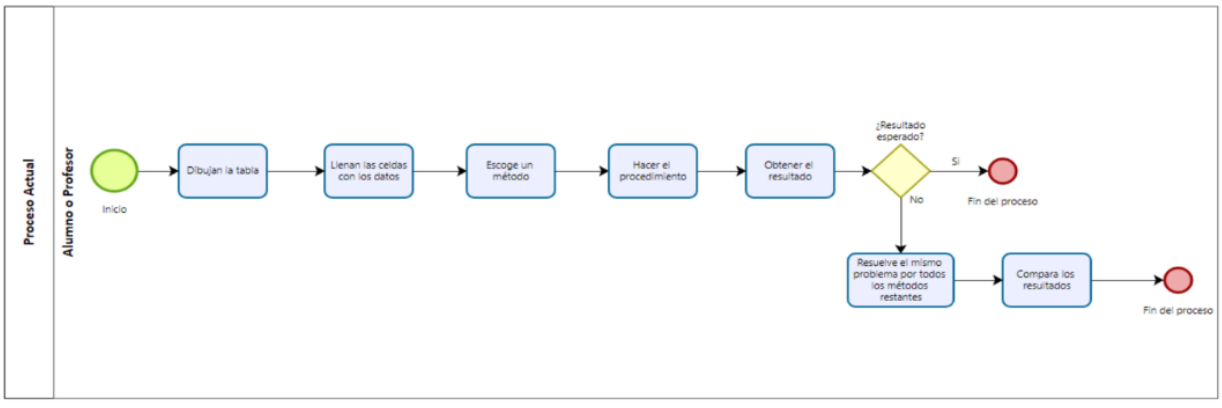


Figura 1. Diagrama BMPN del proceso actual Fuente: Elaboración propia.

3. Desarrollo.

Explicación del proceso que incluye la propuesta.

1. Abrir la aplicación: El usuario inicia la aplicación.
2. Elegir número de filas y columnas: Dentro de la aplicación selecciona cuántas filas y columnas utilizará.
3. Capturar datos:
   - Puede llenar manualmente todas las celdas con los datos de su problema.
   - bien, llenar las celdas de forma aleatoria utilizando random.
4. Solicitar resultados: El usuario pide a la aplicación que procese la información.
5. Resolver el problema: La lógica de negocio de la aplicación resuelve el problema utilizando todos los métodos heurísticos disponibles.
6. Entregar resultados: Se muestran todos los resultados indicando qué método obtuvo el menor costo.
7. Visualizar el procedimiento:
   - El usuario puede revisar paso a paso el procedimiento del método elegido.
   - Si desea consultar otro procedimiento, debe volver a solicitar los resultados y seleccionar el nuevo método.
8. Revisar historial y documentación: Este proceso solo es posible si el usuario accede al menú. Su uso es opcional y no afecta la operación principal de la aplicación.

Diagrama BPMN que incluye la propuesta. En la figura 2, se muestra el diagrama BPMN del proceso que incluye la propuesta.

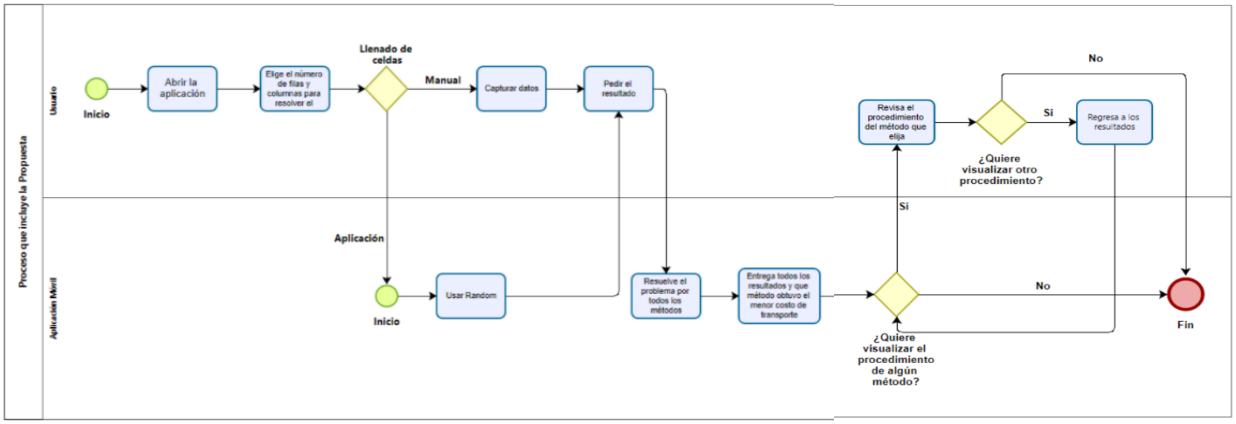


Figura 2. Diagrama BPMN del proceso que incluye la propuesta Fuente: Elaboración propia.

Especificación de requisitos del software.

Requisitos Funcionales.

En la tabla 1, se muestra los requisitos funcionales con su identificador correspondiente, nombre del requisito, descripción y su prioridad.

Tabla 1. Requisitos funcionales Fuente: Elaboración propia.

Identificador	Nombre del requisito	Descripción	Prioridad
RF01	Limitación de filas y columnas	La aplicación debe permitir a los usuarios en escoger el número de filas y columnas que usarán.	Alta
RF02	Llenar celdas	Debe permitir a los usuarios llenar todas las celdas de lo contrario no podrán obtener sus resultados.	Alta
RF03	Random	La aplicación será capaz de llenar las celdas de manera aleatoria	Media
RF04	Balancear la tabla	La aplicación debe revisar el problema que capture el usuario o el problema generado de manera random para revisar si se encuentra balanceado. Si se encuentra balanceado continua con su proceso de solucionar el problema caso contrario primer balancea y luego resuelve.	Alta
RF05	Solución	La aplicación debe ser capaz de resolver el problema por todos los métodos heurísticos de transporte y sus propuestas.	Alta
RF06	Respuesta	Debe proporcionar todos los resultados de los diferentes métodos	Alta
RF07	Costo Optimo	La aplicación debe indicar qué método dio el costo mínimo de transporte	Alta
RF08	Paso a Paso	La aplicación debe mostrar el paso a paso de todos los métodos heurísticos de transporte y sus propuestas.	Alta

Requisitos No Funcionales.

En la tabla 2, se muestra los requisitos no funcionales.

Tabla 2. Requisitos no funcionales Fuente: Elaboración propia.

Identificador	Nombre del requisito	Descripción	Prioridad
RNF01	Rendimiento	La aplicación debe responder de forma inmediata	Alta
RNF02	Escalabilidad	La aplicación debe soportar nuevo código que requiera ser agregado	Alta
RNF03	Seguridad	La aplicación debe cumplir con los estándares de seguridad ISO 27001	Alta
RNF04	Mantenimiento	El código debe estar bien documentado y seguir las mejores prácticas	Alta
RNF05	Usabilidad	La aplicación debe ser intuitiva y atractiva para cualquier usuario que tenga un mínimo conocimiento sobre los métodos de transporte.	Alta

.

Diagrama de casos de uso.

En la figura 3 ilustra el diagrama de casos de uso muestra las interacciones del sistema para ambos actores.

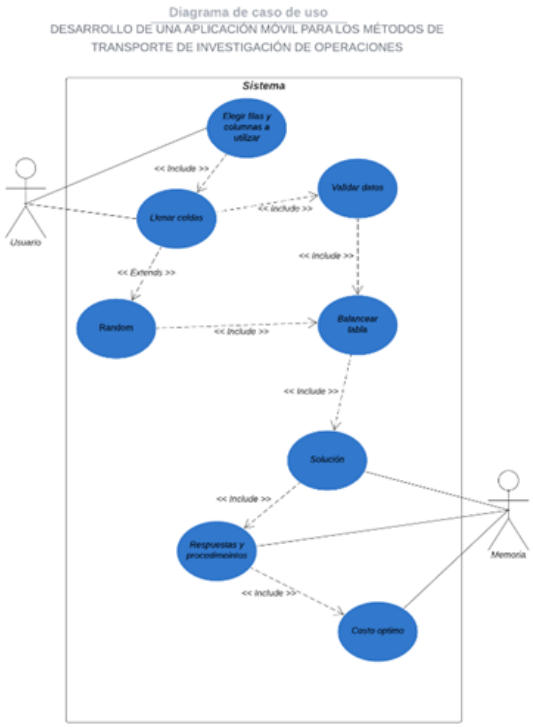


Figura 3. Diagrama de casos de uso Fuente: Elaboración propia.

Características de los usuarios.

En la tabla 3, se observa la descripción del rol del usuario y las funciones que realiza.

Tabla 3. Diagrama de casos de uso Fuente: Elaboración propia.

Actor	**Usuario**
Descripción	El usuario accede a la aplicación para resolver un problema de transporte.
Funciones en el sistema	• Elegir el número de filas y columnas que utilizará. • Ingresar datos en las celdas o elige random. • Visualizar los resultados • Visualizar procedimientos de los métodos de transporte. • Visualizar el costo óptimo.

En la tabla 4, se observa la descripción del rol de la memoria y las funciones que realiza.

Tabla 4. Diagrama de casos de uso Fuente: Elaboración propia.

Actor	**Memoria**
Descripción	La memoria se encargará de almacenar los costos totales que se necesita para saber que método tuvo mayor eficacia en un problema
Funciones en el sistema	• Almacena los costos totales de los métodos heurísticos y las 3 propuestas para indicar cuál de todas obtiene el costo mínimo de transporte

El desarrollo siguió tres etapas principales:
a) análisis de los métodos de transporte (Esquina Noroeste, Costo Mínimo, Vogel, Esquina Suroeste, Demanda Máxima, Cofermin Costo por lotes),
b) diseño técnico mediante diagramas BPMN y casos de uso, y
c) implementación de la aplicación móvil bajo la metodología en cascada.

Diseño preliminar del sistema.
Diseño de la arquitectura del software.

La arquitectura modular tiene un gran beneficio al dividir la aplicación en módulos independientes, logrando escalar y modificar cada componente por separado. Esto te permite agregar nuevos métodos heurísticos o propuestas en el futuro sin tener que reescribir todo el código o afectar negativamente otras partes de la aplicación.
En la figura 4 se muestra la diferencia entre una aplicación regular a una aplicación con módulos

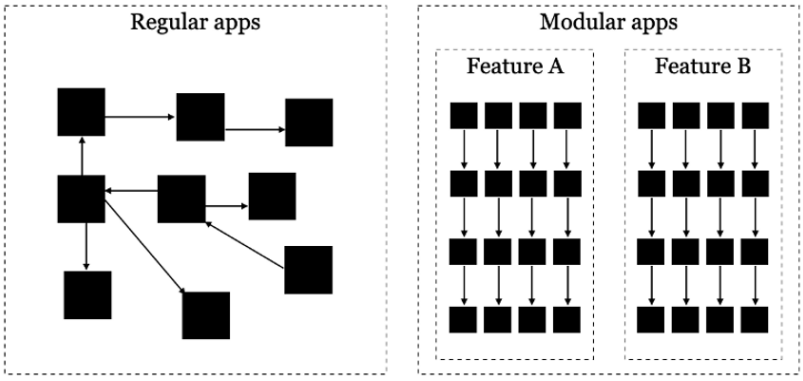


Figura 4. Arquitectura regular y Arquitectura modular Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de Componentes.

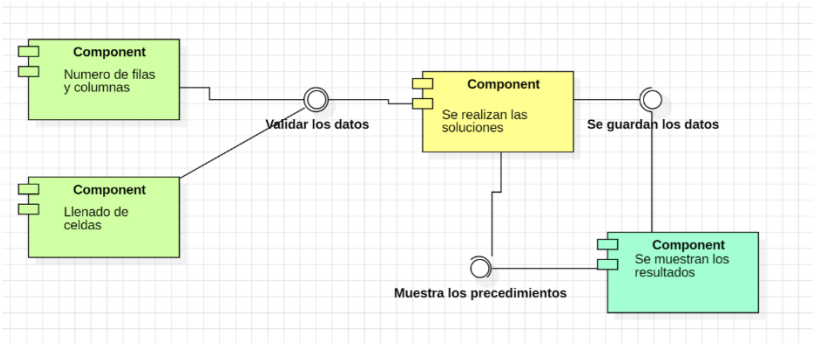


Figura 5. Diagrama de componentes Fuente: Elaboración propia.

Resultados:
La aplicación móvil resolvió correctamente casos de prueba basados en datos de oferta y demanda balanceada. Las tablas comparativas demuestran que los resultados coinciden con los obtenidos manualmente, validando la confiabilidad del sistema.

Métodos de Transporte.
Análisis de los resultados obtenidos:
Los resultados muestran que el método de la esquina suroeste gana en 22 ocasiones, mientras que el método de la esquina noroeste gana en 27 ocasiones, presentándose además empates en varios ejercicios.

Esto indica que ambos métodos tienen un desempeño similar, sin que uno logre una ventaja significativa sobre el otro, por lo cual se consideran técnicas de arranque equivalentes, útiles para fines didácticos, pero no óptimos frente a otros algoritmos heurísticos.

En esta comparación, tanto el método del costo mínimo como el método COFERMIN alcanzan 13 victorias cada uno, además de registrar 24 empates.

Estos resultados reflejan un empate técnico: ambos métodos presentan un nivel de efectividad semejante y ninguno logra imponerse como superior. La conclusión es que su utilidad práctica depende más de la estructura del problema que del algoritmo en sí.

Al contrastar estos métodos, se observa que Vogel gana en 25 ocasiones, mientras que COFERMIN gana en 6 ocasiones, con 18 empates. Aquí Vogel muestra una ventaja clara respecto a COFERMIN, pues obtiene aproximadamente cuatro veces más victorias, lo que lo posiciona como un método más consistente para obtener soluciones de bajo costo.

El enfrentamiento entre Vogel y DEMAXMIN evidencia que, aunque logran 14 empates, Vogel gana en 31 ocasiones, frente a solo 5 victorias de DEMAXMIN.

La diferencia confirma que Vogel se comporta como el método más robusto, ya que supera ampliamente a DEMAXMIN, el cual solo obtiene ventajas en casos puntuales.

Derivado a lo anterior, al analizar los resultados de la tabla, se observa que los métodos Vogel y DEMAXMIN presentan un mejor desempeño en la mayoría de los ejercicios, superando con frecuencia a enfoques clásicos como el de la esquina noroeste o suroeste. En particular, Vogel alcanzó el menor costo en 31 de 50 casos (62% de efectividad), mientras que DEMAXMIN destacó en problemas con estructuras más complejas. En contraste, métodos tradicionales como el costo mínimo y COFERMIN alcanzaron desempeños más modestos, con resultados competitivos en escenarios limitados. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Hillier y Lieberman (2010), quienes sostienen que los métodos intermedios tienden a ofrecer soluciones más cercanas al óptimo en problemas de transporte reales.

Tabla 5. Muestra la comparación de los resultados de los métodos de transporte.

Comparación	Método 1 (Victorias)	Método 2 (Victorias)	Empates	Interpretación
Noroeste vs Suroeste	Noroeste: 27	Suroeste: 22	Sí	Desempeño similar, sin ventaja clara, ambos útiles como métodos de arranque.
Costo mínimo vs COFERMIN	Costo mínimo: 13	COFERMIN: 13	24	Empate técnico, ambos con efectividad semejante.
Vogel vs COFERMIN	Vogel: 25	COFERMIN: 6	18	Vogel muestra clara ventaja, con 4 veces más victorias.

Vogel vs DEMAXMIN	Vogel: 31	DEMAXMIN: 5	14	Vogel se confirma como el método más robusto, DEMAXMIN solo gana en casos puntuales.
Global (50 ejercicios)	Vogel: 31 (62%)	DEMAXMIN: 11 (22%)	Otros: 8	Vogel es el más eficiente, seguido de DEMAXMIN; métodos clásicos tienen baja competitividad.

La tabla comparativa permite observar el desempeño relativo entre pares de métodos. Mientras que Noroeste y Suroeste, así como Costo mínimo y COFERMIN, muestran desempeños similares y empates frecuentes, Vogel se posiciona como el método claramente superior frente a COFERMIN y DEMAXMIN. A nivel global, Vogel confirma ser el método más eficiente (62% de efectividad), lo que respalda su recomendación como técnica heurística preferente para problemas de transporte.

En conclusión, la evidencia obtenida en los 50 ejercicios comparativos confirma que el método de Vogel se posiciona como el más eficiente en la mayoría de los escenarios, seguido por DEMAXMIN en contextos con mayor complejidad estructural. Los métodos tradicionales, aunque útiles para enseñanza y simplicidad de cálculo, no garantizan costos mínimos consistentes frente a técnicas más modernas. La aplicación desarrollada no solo permitió validar este comportamiento de manera práctica, sino que también evidenció la importancia de contar con herramientas automatizadas que reduzcan tiempos de análisis y faciliten la toma de decisiones en logística y distribución.

Tabla 6. Análisis de los métodos de transporte.

Método	Veces ganador	Porcentaje (%)
Vogel	31	62%
DEMAXMIN	11	22%
Esquina Noroeste	3	6%
Esquina Suroeste	2	4%
Costo mínimo	2	4%
COFERMIN	1	2%
Empates	0	0%
Total	50	100%

La Tabla de conteo confirma que el método de Vogel obtuvo la mayor efectividad, resolviendo con el menor costo en 31 de los 50 ejercicios (62%). DEMAXMIN alcanzó un 22% de efectividad, mostrando mejor desempeño en problemas con estructuras más complejas. En contraste, los métodos clásicos como esquina noroeste, suroeste, costo mínimo y COFERMIN apenas alcanzaron entre 2% y 6% de efectividad, lo que evidencia su baja competitividad en escenarios más exigentes. Estos resultados fortalecen la conclusión de que los métodos intermedios y heurísticos como Vogel y DEMAXMIN son más robustos para aplicaciones prácticas en logística

Conclusiones.

La aplicación móvil constituye una herramienta didáctica y práctica para la resolución de problemas de transporte en Investigación de Operaciones. Se cuenta con una aplicación que resuelve 6 métodos de transporte simultáneamente y los compara entre si para hallar la mejor solución de estos métodos propuestos para su valoración, también muestra la solución paso a paso de cada uno de ellos para mayor comprensión del desarrollo de los mismos, y comprender la efiencia y eficacia de cada uno de ellos, A futuro, se propone integrar más algoritmos heurísticos, optimizar la interfaz de la gráfica y extender su aplicación a problemas de transporte no balanceados.

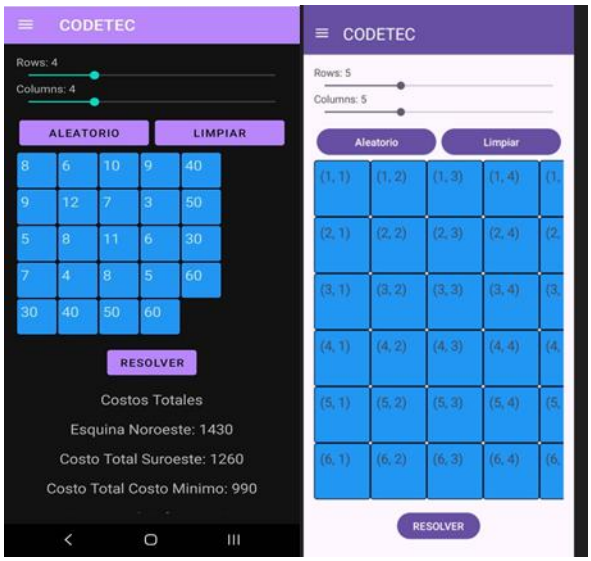


Figura 6. Vista de la aplicación Fuente: Elaboración propia.

La figura 6 muestra la primera interfaz de la aplicación, que cuenta con los dos Sliders para elegir el tamaño de filas y columnas que requiera el usuario, los botones Aleatorio que funciona para llenar todas las celdas de manera aleatoria y el botón limpiar que elimina todos los datos de las celdas si cuentas con algún número, el botón resolver que al dar clic resuelve el problema por los 3 métodos heurísticos y las 3 propuestas y por último los costos totales.

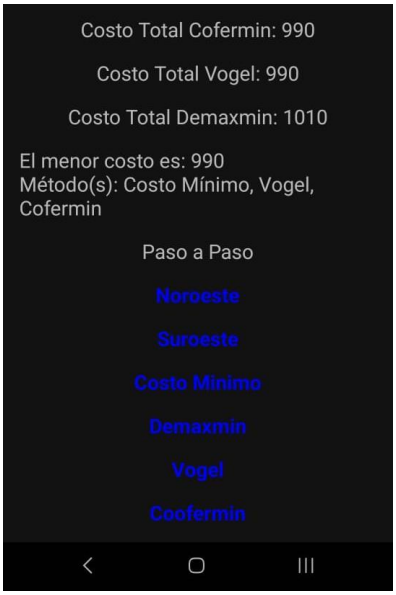
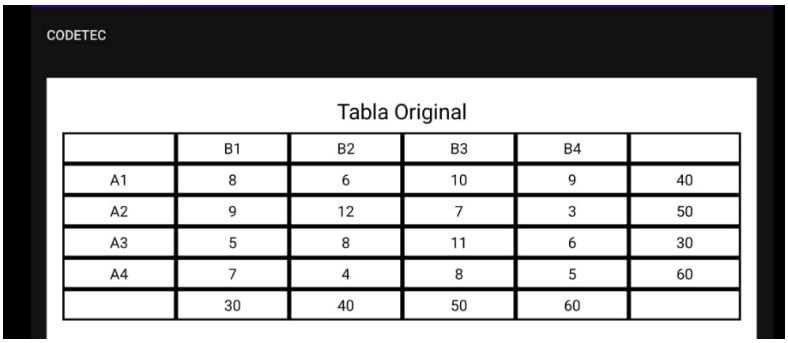


Figura 7. Costos totales 2/2 y los enlaces para ver paso a paso de cada método. Fuente: Elaboración propia.

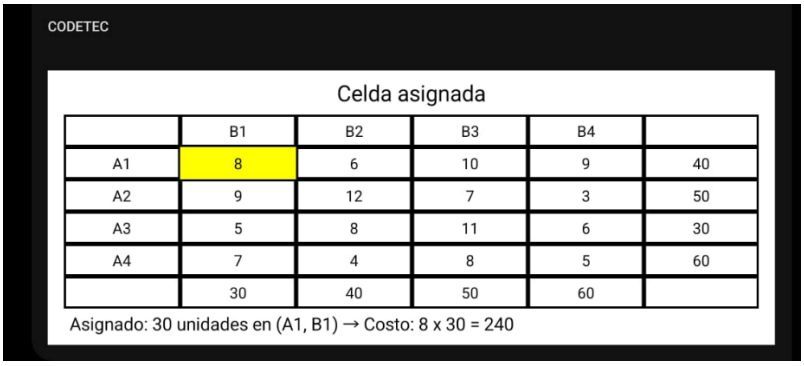
En la figura 8 se puede visualizar los costos totales 2/2, además del cual de los 3 métodos heurísticos y las 3 propuestas obtuvo u obtuvieron el menor costo y los enlaces para ver los paso a paso.



	B1	B2	B3	B4	
A1	8	6	10	9	40
A2	9	12	7	3	50
A3	5	8	11	6	30
A4	7	4	8	5	60
	30	40	50	60	

Figura 8. Primera tabla de paso a paso Fuente: Elaboración propia.

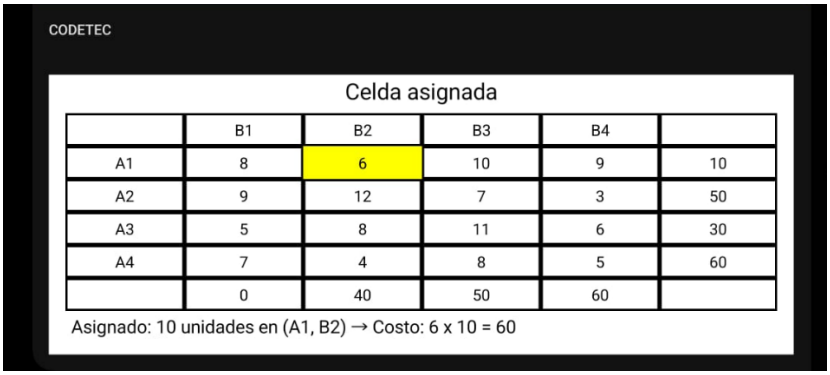
En la figura 8 muestra la primera tabla del paso a paso que se encuentra en una vista pasiva, la tabla que muestra es la Original que el usuario los datos en la celda o ya sea que fue llenada de manera aleatoria.



	B1	B2	B3	B4	
A1	8	6	10	9	40
A2	9	12	7	3	50
A3	5	8	11	6	30
A4	7	4	8	5	60
	30	40	50	60	

Figura 9. Primera iteración Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9 se puede observar la primera iteración que muestra el paso a paso, en este caso se eligió ver el paso a paso de Noroeste, y debajo de la tabla muestra cuanto se le asigno en la celda con sus respectivas coordenadas, además de la multiplicación del costo de la celda por lo asignado y su resultado de la multiplicación, este proceso continua hasta que ya no haya más ofertas y demandas por satisfacer.



	B1	B2	B3	B4	
A1	8	6	10	9	10
A2	9	12	7	3	50
A3	5	8	11	6	30
A4	7	4	8	5	60
	0	40	50	60	

Figura 10. Segunda iteración Fuente: Elaboración propia.

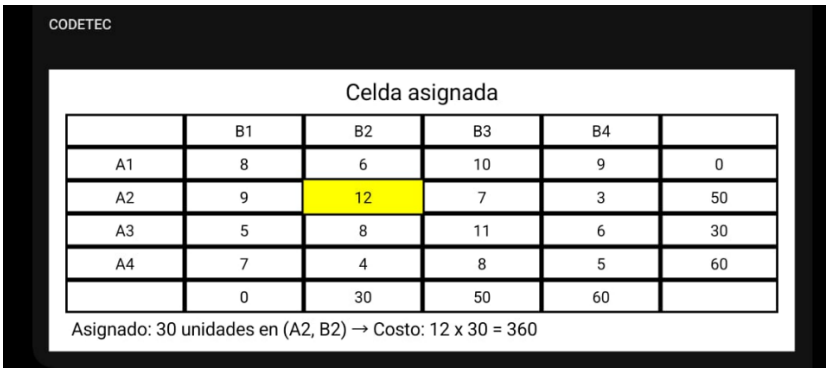


Figura 11. Tercera iteración Fuente: Elaboración propia.

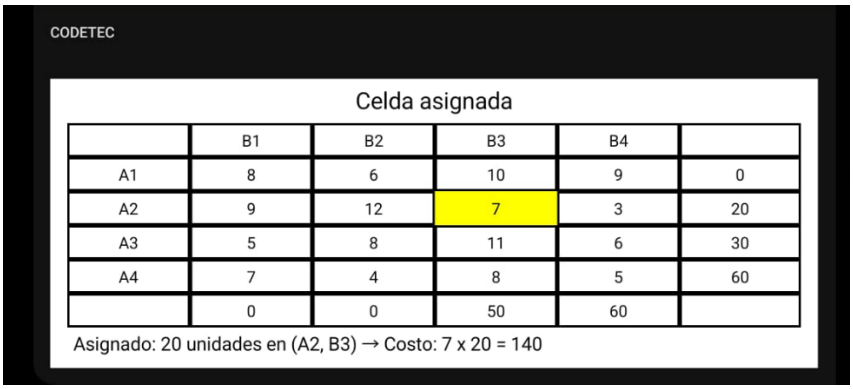


Figura 12. Cuarta iteración Fuente: Elaboración propia.

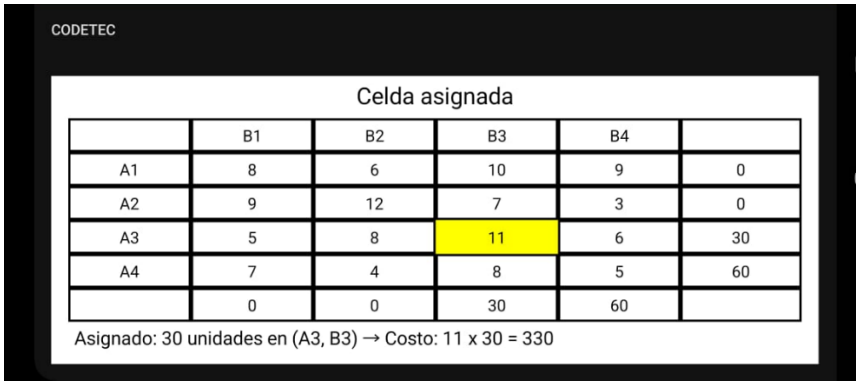


Figura 13. Quinta iteración Fuente: Elaboración propia.

Como última iteración muestra el costo total cada costo de las celdas asignadas multiplicadas por la máxima oferta disponible y al último el resultado de toda la suma de esas multiplicaciones.

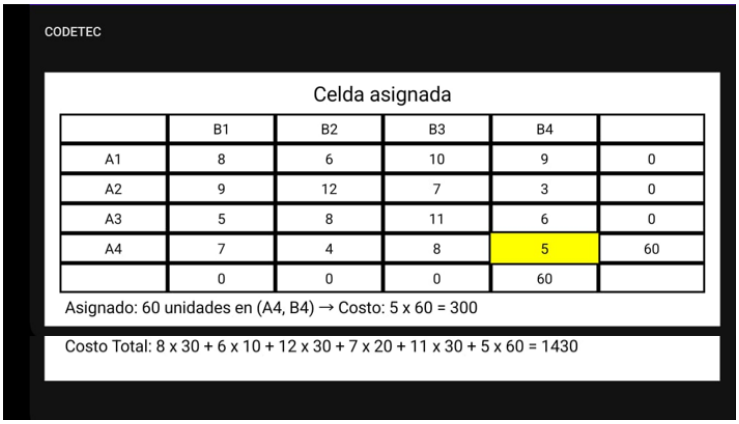


Figura 14. Muestra el costo total cada costo.

El proyecto resalta la importancia y la complejidad asociada con la selección del método heurístico más adecuado para resolver un problema de transporte. La falta de certeza sobre cuál método es el más efectivo subraya la necesidad de una investigación continua y el desarrollo de métodos heurísticos más avanzados y adaptables que puedan abordar las complejidades específicas del problema en tiempo real.

Se propone que la aplicación móvil podrá ayudar a los usuarios a tomar decisiones eficientes en la resolución de problemas de transporte utilizando los diferentes métodos heurísticos.

Referencias bibliográficas.

Comunicacion. (2018, 30 abril). Quienes somos – Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. https://www.tuxtla.tecnm.mx/quienes-somos/

Garzón Espinosa, C. P., & Llumiquinga Pachacama, D. A. (2019). Modelo de simulación para la optimización de rutas de transporte para recolectores de basura en la ciudad de salcedo (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC).) http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5437

Hernández Molina, S. M. (2022). Investigación Método Cruce de Arroyo . INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ, Veracruz. Obtenido de https://www.coursehero.com/file/116595838/Tarea-33pdf/?userType=student

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones (9ª ed.). McGraw-Hill.

Pacheco Molina, A. M. (2019). Propuesta de una red de transporte para atender la demanda de clientes aplicando el método de costo mínimo. [Examen Complexivo, Universidad Técnica de Machala].

Sánchez Gallegos, J. L. S. G. (2020). Determinación de un modelo de transporte en las plantas procesadoras de cajas de naranjas [Examen complexivo, UTMACH FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD].

Sánchez Guerrero, G. D. L. N., & Balderas Cañas, P. E. (2015). Ingeniería de sistemas: metodologías y técnicas. Plaza y Valdés. https://elibro.net.

Información de los autores.

Erick Alexis Velasco Montes de Oca. Ingeniero en Sistemas Computacionales titulado por la Tesis "Desarrollo de una aplicación móvil para los métodos de transporte de investigación de operaciones", el día 30 de septiembre del 2025, Participó como Integrante del equipo de Soporte Técnico en el Departamento de Centro de Cómputo para realizar mantenimiento correctivo y preventivo en los equipos del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, configurando equipos de cómputo en laboratorios, actualizando e instalando programas Trabajo (enero-junio del año 2024).

Roberto Cruz Gordillo obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en electrónica por parte del INAOE (instituto de Astrofísica Óptica y Electrónica) en 2004, Actualmente es profesor de tres cuartos de tiempo en la carrera de sistemas computacionales. Su área de especialización son aplicaciones en matemáticas educativa y didáctica actualmente enfocado en el desarrollo de nuevos métodos heurísticos y logísticos de aplicaciones en el área de ciencias básicas: fisicapp (2021), logicapp (2023), estadisticapp (2024), nolinealpps (2025) y también procesos de toma de decisiones en la cadena de suministros, en la distribución de bienes y servicios y en transporte en el diseño y optimización de costos y tiempos con las aplicaciones mediatech (2022), CODETEC (2024).

Jorge William Figueroa Corzo obtuvo el grado de Doctor en Administración en 2016, Actualmente es profesor de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México (campus Tuxtla Gutiérrez, Chiapas), además es Maestro en Administración e Ingeniero en Sistemas Computacionales. Su área de especialización es toda la línea Investigación y la cultura empresarial. Profesor con Perfil Deseable (PRODEP) desde el 2020.

Alicia González Laguna es Licenciada en Computación por la Universidad Autónoma de Tabasco (UJAT) y Maestra en Comunicación y Tecnologías Educativas por el Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (ILCE). Con casi tres

décadas de experiencia docente en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ha impartido asignaturas de programación, ingeniería de software y estructuras de datos. Ha ocupado diversos cargos académicos y administrativos, y cuenta con certificaciones en programación orientada a objetos y tecnologías educativas. Se ha distinguido por el desarrollo de software educativo registrado ante el INDAUTOR, orientado a facilitar la comprensión de conceptos de programación y UML. Su labor combina la experiencia técnica con la innovación pedagógica, lo que le ha permitido apoyar la formación integral de generaciones de estudiantes en el área de sistemas computacionales.

Mónica Laurent León Juárez obtuvo la Maestría de Telecomunicaciones en el 2023. Actualmente es docente en el Tecnológico Nacional de México (campus Tuxtla Gutiérrez, Chiapas), estudio la Carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales. Ha colaborado en la misma carrera en los campus de Frontera Comalapa y Comitán. Ha participado en eventos académicos como son: Expociencia en etapa Estatal y Nacional, InnovaTecnm Etapa local y Regional y en WERMéxico Etapa local y Nacional.

Desarrollo de aplicación web para comunicación aumentativa y alternativa dirigida a niños con trastornos de lenguaje.

Development of a web application for augmentative and alternative communication aimed at children with language disorders.

José Luis Hernández Ameca* (1).
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla.
joseluis.hdzameca@correo.buap.mx.

Melissa Valladares Hidalgo (2). Estudiante Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla,
melissa.valladaresh@alumno.buap.mx.

Luis Enrique Colmenares Guillén (3). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla,
enrique.colmenares@correo.buap.mx.

Carlos Armando Ríos Acevedo (4). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla,
carlos.riosa@correo.buap.mx.

Carlos Zamora Lima (5). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla,
carlos.riosa@correo.buap.mx.

Adriana Anel Téllez Méndez (6). Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, Puebla, anel.tellez@puebla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en diciembre 12, 2024; aceptado en febrero 18, 2025.

Resumen.

El presente trabajo trata sobre el desarrollo y evaluación de una aplicación web para Comunicación Aumentativa y Alternativa (CAA) basada en la metodología Modelado Evolutivo Iterativo. La aplicación se utilizó como herramienta de apoyo para mejorar la comunicación entre un alumno con trastornos de lenguaje y su profesor. Se trabajó con un alumno del quinto año del nivel primario de educación básica en el Centro de Atención Múltiple (CAM), región I de Huauchinango. La aplicación puede ejecutarse desde cualquier dispositivo con conexión a internet y reproduce audios correspondientes a imágenes pre contextualizadas por el alumno. Los resultados muestran que la metodología de Modelado Evolutivo permitió desarrollar la aplicación en función de los requisitos del alumno, logrando optimizar la comunicación con su profesor. Actualmente se realizan las gestiones para continuar mejorando la aplicación e involucrar a nuevos usuarios con sus propios requerimientos.

Palabras claves: Aplicación web, CAM, CAA, imagen precontextualizada.

Abstract.

This paper deals with the development and evaluation of a web application for Augmentative and Alternative Communication (AAC) based on the Iterative Evolutionary Modeling methodology. The application was used as a

support tool to improve communication between a student with language disorders and his teacher. We worked with a student in the fifth year of the primary level of basic education at the Centro de Atención Múltiple (CAM), region I of Huauchinango. The application can be run from any device with an internet connection and plays audios corresponding to images pre-contextualized by the student. The results show that the Evolutionary Modeling methodology allowed developing the application according to the student's requirements, optimizing communication with the teacher. Currently, efforts are being made to continue improving the application and to involve new users with their own requirements.

Keywords: CAA, CAM, pre-contextualized image, web application.

1. Introducción.

Se desarrolló FUNJAI, una aplicación de Comunicación Aumentativa y Alternativa (CAA), como asistente a usuarios con problemas de comunicación en la vida diaria. Los autores implementaron la aplicación tailandesa gratuita FUNJAI, disponible en plataformas iPhone Operating System (iOS) y el sistema operativo Android, para apoyar a personas con neurología atípica. Esencialmente, la aplicación desarrollada ha sido probada con profesores y usuarios de CAA los cuales reportan que es de fácil acceso y uso (Simakulthorn, Boontaganon & Aphiratsakun, 2023).

Las plataformas de prototipado "hágalo usted mismo" (DIY, por sus siglas en inglés) ofrecen oportunidades para involucrar a interesados de diferentes países y especialidades en el desarrollo y personalización de interfaces novedosas orientadas a personas con discapacidad en contextos médicos, terapéuticos, logopedia, etc. Estas plataformas deben diseñarse en colaboración con las partes interesadas para garantizar que sean relevantes, utilizables y sostenibles en cada contexto (Hamidi, 2019).

Este artículo describe el desarrollo de una aplicación basada en CAA para el desarrollo de niños con discapacidades del lenguaje. Los cuales presentan trastornos de lenguaje receptivo y expresivo. Los autores desarrollaron una aplicación Android utilizando Java y el lenguaje de marcado extensible (XML, por sus siglas en inglés) como lenguajes de programación. La aplicación ofrece varias interfaces como funcionalidad de texto a voz e imagen a voz en idioma inglés. Se utilizaron imágenes que representan acciones de la vida diaria. La usabilidad de la aplicación puede ayudar a alumnos con autismo o barreras de comunicación a mejorar su comprensión. La representación pictórica de actividades y objetos cotidianos mejorará aún más su comprensión visual (Kumar, Vats & Tanwar, 2023).

Se presenta un dispositivo (CAA) para personas con discapacidades del habla. Este sistema tiene dos características: 1) usabilidad de los tableros de comunicación y 2) comunicación oral natural de los comunicadores electrónicos. Para mejorar la comodidad de uso, la robustez y la versatilidad, el sistema está diseñado como dos bloques separados unidos por comunicación inalámbrica a través de una red inalámbrica de hojas de tableros de comunicación. Las hojas de comunicación, que son la interfaz con el usuario, son económicas, sencillas de utilizar y escalables para adaptar el número de símbolos y el vocabulario de las personas que utilizan el sistema. El sistema digital (sistema de grabación/reproducción) controla la red, identifica las hojas activas y los símbolos pulsados, y reproduce y graba todos los sonidos. Este sistema digital puede sustituirse fácilmente por otras interfaces digitales, como ordenadores, teléfonos inteligentes o tabletas, y puede aumentar la función del CAA con la posibilidad de utilizar la comunicación por Internet (correos electrónicos y Skype, entre otros). El prototipo ha sido evaluado en dos colegios de educación especial, a los que asisten niños con graves discapacidades motoras con o sin trastornos asociados y pluridiscapacidades. Las críticas positivas de las personas que utilizan el sistema de CAA abren la posibilidad del uso del sistema tanto en el hogar como en entornos educativos (Hornero et al., 2015).

Este documento expone una herramienta tecnológica construida bajo los lineamientos del sistema aumentativo y alternativo de comunicación (PECS, por sus siglas en inglés), la cual consta de seis fases y tiene como objetivo promover la comunicación independiente de niños con Trastornos del Espectro Autista. La herramienta obtenida es una aplicación para Windows desarrollada sobre las plataformas Unity y Arduino para facilitar la interacción física del usuario. La metodología utilizada fue el diseño iterativo, cuyo enfoque de desarrollo ágil permite mejorar el producto de forma incremental en cada iteración con la contribución de un equipo multidisciplinar formado por expertos en

tecnologías de la información y la comunicación, rehabilitación del lenguaje, educación y diseño gráfico. Como resultado se obtuvo un sistema de comunicación aumentativa y alternativa de fácil instalación, aprendizaje y configuración por parte del terapeuta. Su diseño e implementación se realizaron teniendo en cuenta los requisitos de los usuarios (Carvajal et al., 2024).

Un país en desarrollo como Bangladesh ha experimentado recientemente una transformación de la informática individualizada a una tecnología móvil versátil. Esto brinda la oportunidad de fabricar soluciones defendibles para las personas con problemas verbales y facilitar su método de correspondencia. Los dispositivos electrónicos inteligentes de bajo coste están presentando resultados potenciales de correspondencia más frescos que ni siquiera eran creíbles hace un par de años. En vista del efecto de estos dispositivos electrónicos inconcebiblemente prevalentes y sus tecnologías en los clientes, hemos desarrollado una aplicación Android llamada "Bolbo Kotha". El objetivo fue construir una aplicación eficaz, personalizada, flexible y de coste adecuado para el individuo con problemas verbales. La facilidad de uso y la viabilidad de la aplicación se han evaluado teniendo en cuenta cuatro criterios a saber, la capacidad de personalización de la aplicación en función de las necesidades del cliente, la capacidad de creación de la aplicación, la escasez de recursos y de tiempo necesario para adaptarse a la aplicación y el coste general de todo el marco, teniendo en cuenta el coste preferible de los usuarios. En la vida real, los resultados demuestran que la aplicación propuesta es muy apreciada por las personas con problemas verbales, y que puede utilizarse como solución definitiva para mejorar la capacidad de comunicación (Khan et al., 2019).

Con la finalidad de integrar a los menores con discapacidad, desaparecieron las escuelas de educación especial y en su lugar se crearon los CAM (Centros de Atención Múltiple), los cuales ofrecen ayuda temprana, educación básica (preescolar primaria y secundaria) y capacitación laboral para niños y jóvenes con discapacidad. El objetivo es beneficiar y atender a niños con alguna discapacidad y alcancen lo antes posible el grado escolar que les corresponde, a su edad. Para aquellos alumnos que no pueden alcanzar los beneficios de la educación regular existen el Cam-taller, en donde se les ayuda para que alcancen un nivel de independencia acorde a sus habilidades; es decir, los programas buscan el desarrollo de la autonomía, el autocuidado y el aprendizaje de los conceptos escolares básicos. Estas Unidades las integran maestros especialistas, psicólogos y técnicos, los cuales forman un equipo responsable de atender sistemáticamente a los alumnos. El CAM Chignahuapan cumple con dichos objetivos en la Sierra Norte del estado de Puebla (Gobierno de México, 2024).

Los profesores y especialistas que trabajan en este CAM diariamente enfrentan el reto de una alta población en el aula, elevados niveles de ruido y falta de contacto visual. Estas condiciones impiden la comunicación efectiva en tiempo y forma, provocando que las necesidades básicas de los alumnos no se atiendan oportunamente.
Los profesores del CAM presentaron esta problemática al Laboratorio SIRO, donde se ha propuesto una solución basada en software, buscando mejorar la comunicación entre profesores y alumnos.

2. Método.

Para proporcionar una experiencia satisfactoria al usuario la aplicación (modelo) debe ser responsiva, usable y compatible. Cada iteración debe ser evaluada con la finalidad de verificar que las características estén presentes. Como resultado de estas evaluaciones los requisitos pueden cambiar, aumentar o detallarse. Se concluye que el proceso de desarrollo es no lineal, se buscará obtener una primera versión limitada que cumpla con los requisitos iniciales y sirva de referencia para continuar mejorando el modelo. La metodología que mejor se adapta para el presente desarrollo es la del Modelado Evolutivo Iterativo, ya que se caracteriza por la manera en la que permite desarrollar versiones o prototipos cada vez más completos del sistema, en cada iteración.

En la figura 1, se muestra un gráfico con los pasos realizados en la primera iteración y obtención del presente prototipo de la aplicación. Posteriormente se describe lo realizado en cada paso.

Figura 1. Pasos realizados en cada iteración de la metodología de Modelado Evolutivo Iterativo.

Comunicación.

Se realizó una reunión con autoridades, docentes y padres de familia del CAM, para definir las condiciones de trabajo con el Laboratorio SIRO de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), las características del usuario final (estudiante del sexo masculino, de 11 años de edad, familiarizado con el uso de algunos dispositivos inteligentes y que padece parálisis cerebral) dadas por los docentes y algunas inquietudes sobre confidencialidad, autorización y expectativas por parte de los padres de familia.

Con la información obtenida se acordó desarrollar una aplicación web para (CAA) que permita comunicar de manera óptima al alumno antes mencionado con su profesor.

El entorno de aprendizaje donde seda esta interacción es un aula de 15 x 11 metros que alberga a diez alumnos con diferentes habilidades funcionales. Ahí se realizan diversas actividades de estimulación utilizando herramientas y materiales didácticos que en ocasiones generan elevados niveles de ruido. Otro factor es que al estar como responsable de grupo un único docente, es frecuente que se pierda el contacto visual. El horario escolar es de lunes a viernes de 8:00 a 14:00 horas.

Plan rápido.

Se organizó exclusivamente para esta primera iteración, en un periodo de seis meses, comprendiendo las seis etapas que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Actividades del plan rápido.

Mes	Actividad	Inicio	Fin
1	Comunicación (definición de requisitos)	01/02/24	01/03/24
2	Modelado de diseño rápido	02/03/24	01/04/24
3	Implementación del prototipo	02/04/24	01/05/24
4	Despliegue	02/05/24	01/06/24
5	Entrega	02/06/24	01/07/24
6	Retroalimentación	02/07/24	01/08/24

Modelado de diseño rápido.

Para realizar el diseño se definieron siete requisitos (R1…R7) que se enlistan a continuación:

- R1-Aplicación responsiva. La aplicación debe tener las características de accesibilidad y adaptación que permitan al usuario final una correcta visualización desde cualquier tipo de dispositivo con conexión a internet.
- R2-Usabilidad. Se define como el grado de facilidad para acceder y navegar por la aplicación en base tres parámetros (intuición, sencilles y rapidez).
- R3-Compatibilidad. La aplicación deberá mostrar su diseño original en diferentes navegadores.
- R4-Plantilla web. Debe contar con espacios bien distribuidos para cada elemento (imágenes, menús, botones y textos).
- R5-Menú. Debe estar visible y contener tres categorías (necesidades básicas, emociones y necesidades escolares).
- R6-Generación de imágenes. Se toman las imágenes que el alumno ya ha pre contextualizado y deben corresponder a las tres categorías del menú.
- R7-Reproducción de audios. Se deben reproducir cuando el usuario haga clic sobre cada imagen.

El diseño del funcionamiento de la aplicación web CAA se realizó mediante un diagrama de flujo que se muestra en la figura 2. El flujo indica que al cargar la página se muestra en pantalla el menú con las tres categorías (necesidades básicas, emociones y necesidades escolares) a seleccionar. Si el usuario desea visualizar una categoría, debe hacer clic sobre ella. Posteriormente se muestran las imágenes correspondientes a la categoría seleccionada. El usuario puede dar clic en cualquier imagen para reproducir el audio alusivo a ella las veces que lo requiera y siempre tendrá disponible la opción de salir de la aplicación o regresar a cualquiera de las tres categorías del menú.

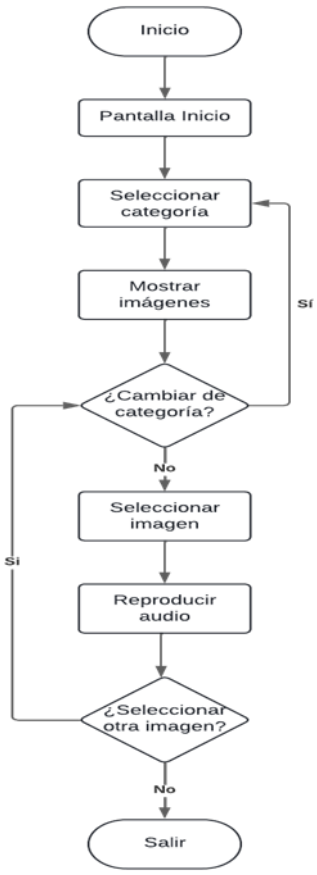


Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación web CAA.

Implementación del prototipo.

La programación se realizó en JavaScript, para hacer al diseño responsivo se usó la herramienta framework (Bootstrap), se incorporaron imágenes pre contextualizaron con el alumno. Audios e imágenes nuevas se generaron mediante herramientas gratuitas de (IA).

Despliegue, entrega y retroalimentación.

La primera entrega fue a las autoridades y directivos del CAM, los cuales manifestaron un alto interés por corroborar la usabilidad de la aplicación. La segunda entrega fue al profesor que trabaja con el alumno y tres docentes con casos similares. La tercera entrega fue al alumno (usuario final) y padres de familia donde se mostró, evaluó y registró información sobre la usabilidad de la aplicación web "SIRO_CAA".

Se utilizó una encuesta tipo Likert para obtener información de la aplicación con respecto a los siete requisitos del usuario final (R1…R7) y la mejorar la comunicación alumno-profesor.

3. Desarrollo.

De acuerdo con el plan rápido que se muestra en la Tabla 1, el desarrollo de la aplicación inició el 01 de enero con la etapa de comunicación donde se obtuvieron los requisitos R1 a R7, sirviendo como base para la realización del modelado de diseño rápido el cual ha quedado representado con el diagrama de flujo de la figura 2.

La implementación del prototipo se inició el 02 de abril del mismo año, programando la plantilla web donde se consideraron factores como: color de fondo, tipología y tamaños de fuente, distribución de imágenes, encabezado y diseño del menú. Se utilizó la herramienta framework (Bootstrap) para hacer responsivo el diseño de la aplicación web. El Menú se desarrolló con el lenguaje de programación JavaScript, con las tres categorías (necesidades básicas, emociones y necesidades escolares). Dentro de este menú se categorizaron las imágenes pre contextualizadas y se generaron nuevas imágenes con la herramienta gratuita (Microsoft Bing Image Creator) basada en IA. Los audios se generaron mediante una herramienta gratuita (Voicemaker) que utiliza (IA) para convertir textos en audios a un idioma específico, finalmente se creó una función con JavaScript para que al hacer clic en una imagen se reproduzca el audio correspondiente.

El 02 de mayo se inició la etapa de despliegue o exhibición que consistió en reuniones de trabajo con los actores principales del CAM, terminándose el 01 de junio. La entrega duró del 02 de junio al 01 de julio donde se llevaron algunos trámites administrativos relacionados a los usos de la aplicación. La retroalimentación inició el 02 de julio, brindando información sobre las instrucciones de llenado de la encuesta Likert y explicando la finalidad de medir y recabar datos sobre el cumplimiento de los siete requisitos; esta última etapa de la metodología se terminó el 01de agosto de 2024.

4. Resultados.

Actualmente es posible acceder a la aplicación desarrollada desde cualquier dispositivo inteligente con conexión a internet a través del siguiente enlace https://melissavalladares.github.io/SIRO_CAA.github.io/

La pantalla de inicio se muestra en la captura de pantalla de la figura 3, en el extremo superior derecho se encuentran los tres botones (necesidades básicas, emociones y necesidades escolares) del menú principal, al centro se encuentran las imágenes correspondientes a las necesidades básicas (comida, agua, baño, médico, descanso, lavar manos, cambio de actividad, silencio, ayuda, calor y frío) las cuales fueron pre contextualizadas por el alumno.

Figura 3. Inicio de la aplicación web "SIRO_CAA".

La captura de pantalla de la figura 4 muestra el contenido de imágenes de la categoría "Emociones" (felicidad, tristeza, enojo, sorpresa, confusión, miedo, aburrimiento, interés y amor). El menú principal sigue estando disponible.

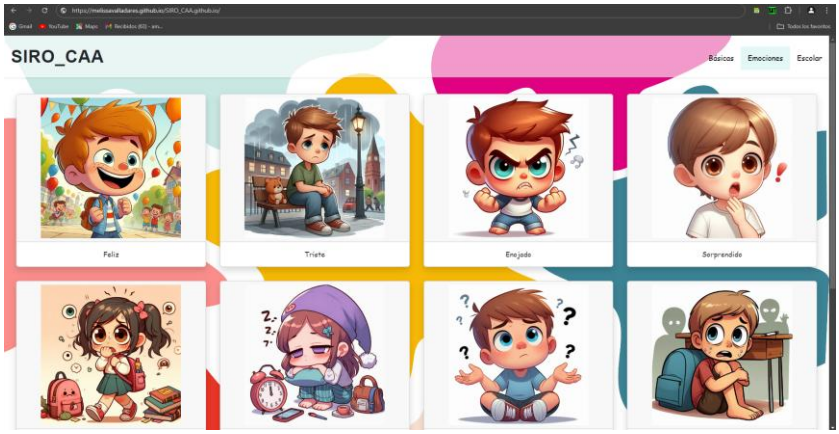


Figura 4. Imágenes pertenecientes a la categoría "Emociones".

La figura 5 corresponde a la captura de pantalla de las imágenes (libro, mochila, lápiz, libreta, goma, tijeras, material, repetir, ayuda categoría) contenidas en la categoría "Escolar", al igual que en las figuras 1 y 2 el menú principal sigue disponible.

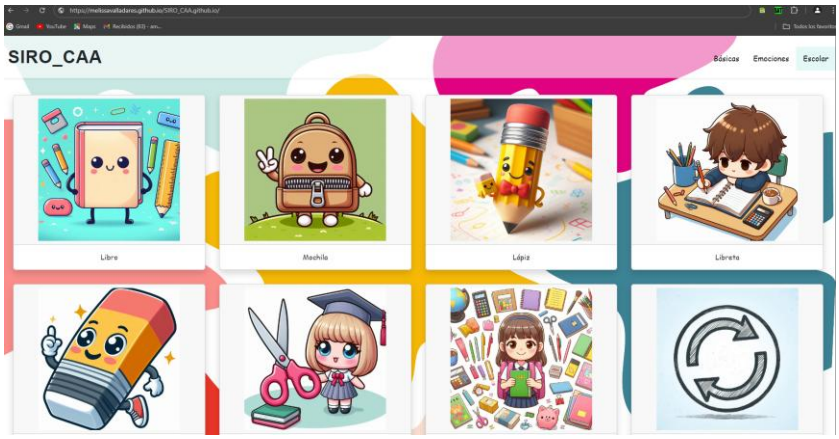


Figura 5. Imágenes de la categoría “Necesidades escolares”.

Resultados de la encuesta tipo Likert.

La encuesta fue contestada semanalmente durante un mes por el profesor responsable, donde se evaluó el sí cumplimiento, no cumplimiento y el cumplimiento parcial, de los siete requisitos del alumno. La tabla 1 muestra que, sí se cumplieron los requisitos R1, R2, R5, R6 y R7. El requisito R3 se cumplió parcialmente debido a que algunas de las imágenes no representaban exactamente la idea pre contextualizada por el alumno, lo cual repercutió directamente para que el R4 tuviera un cumplimiento parcial; el concentrado de esta información puede visualizarse en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la encuesta tipo Likert sobre los requisitos (usuario final).

Requisitos del alumno	Si cumple	No cumple	Cumplimiento parcial
R1-Plantilla web.	x		
R2-Menú.	x		
R3-Generación de imágenes.			X
R4-Reproducción de audios.			X
R5-Aplicación responsiva.	x		
R6-Usabilidad.	x		
R7-Compatible	x		

Conclusiones y trabajo futuro.

Se logró desarrollar la aplicación web (de Comunicación Aumentativa y Alternativa “SIRO_CAA”) en base a los requerimientos R1 a R7 del alumno de quinto año de primaria de educación básica del CAM región I de Huauchinango. La información obtenida de la encuesta tipo Likert contestada por el Profesor responsable, permitió corroborar el cumplimiento de cinco de los siete requisitos como usabilidad, compatibilidad, la característica de ser responsiva y contener un menú claro y conocido por el alumno-profesor.

Las características de la metodología de Modelado Evolutivo Iterativo permitieron planear las metas, actividades y tiempos necesarios para desarrollar la aplicación. Aunque solo se establece una etapa de retroalimentación**,** en la práctica se retroalimento en cada una de las seis etapas propuestas en el Plan rápido que corresponde a la segunda fase de la metodología, debido a que se suscitaban dudas continuamente. En la etapa de despliegue o exhibición el Profesor encargado manifestó que mediante la escucha de los audios realmente se mejoró la comunicación con el alumno, con lo que se concluye que la aplicación cumplió con su objetivo.

Como trabajo futuro se planea aumentar la intensidad del audio o brindar opciones para que se reproduzca en otros dispositivos, debido a que en ocasiones el ruido del salón de clases dificulta percibir los audios, trabajar la aplicación con o sin conexión a internet y actualizar las imágenes que no representaron exactamente la idea pre contextualizad del alumno-profesor.

Actualmente se realizan las gestiones para mejorar y actualizar la aplicación, además se está gestionando y analizando la incorporación de nuevos usuarios con sus profesores.

Agradecimientos.

A los participantes y autoridades del CAM por la confianza depositada en lo miembros y colaboradores del Laboratorio SIRO de la FCC-BUAP y las autoridades de la Facultad de Ciencias de la Computación.

Referencias bibliográficas.

Carvajal, F., Crespo Martínez, E., León Pesantez, A., Tapia, E., & Astudillo Rodríguez, C. (2024). *Alternative and Augmentative Communication System Focused on Children with Autism Spectrum Disorder*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/9516653

Gobierno de México. (2024). *Educación especial*. Gobierno de México. https://www.aefcm.gob.mx/que_hacemos/especial.html

Hamidi, F. (2019). *DIY Assistive Technology Prototyping Platforms: An International Perspective*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/8968791

Hornero, G., Conde, D., Quílez, M., Domingo, D., Peña Rodríguez, M., Romero, B., & Casas, O. (2015). *A Wireless Augmentative and Alternative Communication System for People with Speech Disabilities*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/7182269/authors#authors

Khan, M. N. R., Shahin, F. B., Sunny, F. I., Khan, M. R., Haque Mashuk, A. K. E., & Al Mamun, K. A. (2019). *An Innovative and Augmentative Android Application for Enhancing Mediated Communication of Verbally Disabled People*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/8944655/authors#authors

Kumar, M., Vats, Y., & Tanwar, P. (2023). *Communication Assistance Based on Augmentative and Alternative Communication*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/10100399

Simakulthorn, T., Boontaganon, M., & Aphiratsakun, N. (2023). *A Case Study on AAC Implementation: Funjai Application*. IEEE Xplore. https://ieeexplore.bibliotecabuap.elogim.com/document/10305600/authors#authors

Información de los autores.

José Luis Hernández Ameca, obtuvo el título de Ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico de Puebla en 2001. En 2005 recibió el título de Maestro en Ciencias de la Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). En 2017 obtuvo el título de Doctor en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología de la Universidad Popular Autónoma de Puebla (UPAEP). De 2002 a 2004 trabajó como Ingeniero en el departamento de implementación de proyectos de la empresa digital IUSACEL. Trabaja como Profesor-Investigador en la Facultad de Ciencias de Computación de la BUAP desde 2007, sus líneas de investigación son la Robótica y la Educación. Desde 2016 es el presidente del comité organizador del evento académico Torneo Nacional de Robótica "GUERRA DE DIOSES", en 2017 pertenece al comité organizador de Noche de la Estrellas BUAP hasta el presente 2024, es Consejero de Extensión y Difusión de la Cultura para el periodo 2024-2028. Actualmente tiene publicaciones Nacionales e Internacionales y dos patentes registradas.

Melissa Valladares Hidalgo, actualmente cursa la Licenciatura en Ingeniería en Tecnologías de la Información en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Se desempeña como Consejera Universitaria Suplente de la Facultad de Ciencias de la Computación. Ha participado en diversos proyectos, presentándose en eventos como Fepro 2024, y también ha colaborado como parte del staff en eventos organizados por su facultad.

Luis Enrique Colmenares Guillén, realizó sus estudios de la Licenciatura en Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). La Maestría en la Universidad de las Américas Puebla. El doctorado fue realizado en la Universidad Politécnica de Cataluña de Barcelona España. Actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP. Pertenece a un cuerpo académico PRODEP consolidado. Es miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados (RCEA). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) y a dos redes temáticas CONACYT. Pertenece al padrón de Investigadores y de Consultores de la BUAP. Actualmente tiene publicaciones nacionales e Internacionales, además tiene cuatro patentes registradas y dos títulos de patente. En la Facultad de Ciencias de la Computación ha impartido las cátedras de Sistemas Operativos, Administración de proyectos, Sistemas Distribuidos, Procesamiento Digital de imágenes, Sistemas de tiempo real. Actualmente ha desarrollado algoritmos y sistemas clasificadores para el área de la Inteligencia artificial y reconocimiento de patrones.

Carlos Armando Ríos Acevedo, realizó sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), igualmente realizó estudios de Maestría en Ingeniería. Desde hace 17 años es Profesor-Investigador de la FCC-BUAP. Cuenta con perfil PRODEP desde hace 10 años, cuenta con publicaciones en revistas nacionales e internacionales. A ocupado cargos como Coordinador de la Ingeniería en Tecnologías de la Información (ITI) y actualmente es el Secretario General de la asociación sindical ASPABUAP.

Carlos Zamora Lima, realizó sus estudios de la Licenciatura en Matemáticas Aplicada en la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT), realizó estudios de Maestría en Ciencias Matemáticas en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Desde hace 19 años es Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP. Cuenta con perfil PRODEP desde hace 10 años. Tiene publicaciones en Moderación Matemática de Motoneuronas y libros de texto de Álgebra Superior, Cálculo Diferencial, Fundamentos de Matemáticas y Matemáticas Elementales.

Adriana Anel Téllez, realizó sus estudios de Licenciatura en Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Puebla (ITP). La Maestría en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP). Actualmente es docente del Instituto Tecnológico de Puebla en el área de Ciencias Básicas y en la Universidad Tecnológica de Puebla (UTP) en la División de Ingeniería Industrial. Actualmente tiene publicaciones Nacionales e Internacionales.

Desarrollo de un controlador lógico programable de bajo costo basado en Raspberry PI.

Development of a low-cost programmable logic controller based on Raspberry Pi.

Raúl Moreno Rincón* (1).
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
raull.mr@tuxtla.tecnm.mx.

Luis Antonio Orellana Águila (2). Estudiante del Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, L20270626@tuxtla.tecnm.mx.

Álvaro Hernández Sol (3). Tecnológico Nacional de México//Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, alvaro.hs@tuxtla.tecnm.mx.

Osbaldo Ysaac García Ramos (4) Tecnológico Nacional de México//Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ogarcia@tuxtla.tecnm.mx.

Alexis de Jesús Flores García (5). Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx.

Roberto Ibáñez Córdova (6) Tecnológico Nacional de México//Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, roberto.ic@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 24, 2025; aceptado en diciembre 16, 2025.

Resumen.

El proyecto consiste en el diseño y construcción de un prototipo de controlador lógico programable (PLC) basado en una Raspberry PI que nos resulte a menor costo que los PLC's comerciales equivalentes en tamaño. Y además aproveche las características tecnológicas de la Raspberry PI la cual es una tarjeta con capacidad de manipular dispositivos de audio, video, memorias externas, etc. que la colocan cercana a un procesador muy por encima de los controladores. Durante el desarrollo de este proyecto se le dio al prototipo, las ventajas de construcción que presentan y potencializan a los PLC's comerciales como son; el diseño tipo modular que separan al CPU, A los módulos de Entrada/Salida y a la fuente de poder, así también se le instalo un software que proporcionara un acceso a su programación parecido a los que presentan los PLC's comerciales, el cual es amigable, simple y eficiente, para nuestro caso se podrá programar con el lenguaje denominado escalera, que es el mas utilizado actualmente y con una interface que simula a los que proporcionan los fabricantes de PLC.

Palabras claves: Diseño, modular, Raspberry, simular,

Abstract.

The project consists of the design and construction of a prototype programmable logic controller (PLC) based on a Raspberry Pi, which will be less expensive than equivalent-sized commercial PLCs. Furthermore, it leverages the technological characteristics of the Raspberry Pi, a board capable of handling audio and video devices, external storage, etc., placing it close to a processor and far superior to other controllers. During the development of this project, the prototype incorporates the construction advantages that commercial PLCs offer and enhance, such as a modular design that separates the CPU, the input/output modules, and the power supply. Software was also installed that provides programming access similar to that of commercial PLCs; this software is user-friendly, simple, and efficient. In our case, it can be programmed using ladder logic, the most widely used language today, with an interface that simulates those provided by PLC manufacturers.

Keywords: Design, modular, Raspberry Pi, simulate.

1. Introducción.

El sector tecnológico e industrial, con su marcado crecimiento a lo largo de los años, ha ido evolucionando en diferentes etapas hasta el punto actual, donde su siguiente migración se inclina a lo que se llama industria 4.0. La alta demanda de estos dispositivos, llamados PLC (por sus siglas en inglés) que son unidades de control de alto desempeño específicos al desarrollo industrial, esto conlleva a ser dispositivos de alta potencia y eficiencia, pero con un costo elevado. En este contexto, surge la necesidad de crear soluciones que permita al usuario tener una alternativa de un dispositivo (PLC) de costo más bajo, pero sin sacrificar la potencia y la eficiencia.

Esta investigación nos permitió adentrarnos en el desarrollo de un controlador lógico programable de bajo costo basado en Raspberry Pi y la plataforma CODESYS. La elección de la Raspberry Pi como plataforma central para el controlador lógico programable se fundamenta en su renombrada versatilidad y su adopción generalizada en proyectos de ingeniería y desarrollo. Complementando esta elección, la implementación del sistema CODESYS la cual añade una capa de sofisticación al permitir una programación avanzada y una gestión eficiente de los procesos industriales

Durante el desarrollo de esta investigación se exploró la reunión de estas tecnología y componentes que se fusionan en la creación de este PLC. Se analizaron los elementos claves, desde el diseño de las tarjetas de acoplamiento I/O, la configuración de la Raspberry Pi, la programación del sistema CODESYS y la implementación del prototipo demostrativo. A medida que avanzamos en el desarrollo de la investigación nos permitió caracterizar las limitaciones y alcances de esta propuesta, proporcionando una visión exhaustiva de la viabilidad y aplicabilidad de esta solución e incorporarnos al desarrollo en este sector en constante evolución.

2. Métodos.

Diseño, construcción e implementación de hardware del sistema.

Se optó por una Raspberry Pi 3B versión 2.0, por su bajo costo, portabilidad, disponibilidad de documentación y compatibilidad con software de automatización. Esta tarjeta posee un procesador ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos, puertos USB, HDMI, ranura para tarjeta microSD, y lo más importante: 40 pines GPIO, que permiten manipular señales digitales equivalentes a las entradas y salidas típicas de un PLC industrial, Halfacree (2020), ver figura 1.

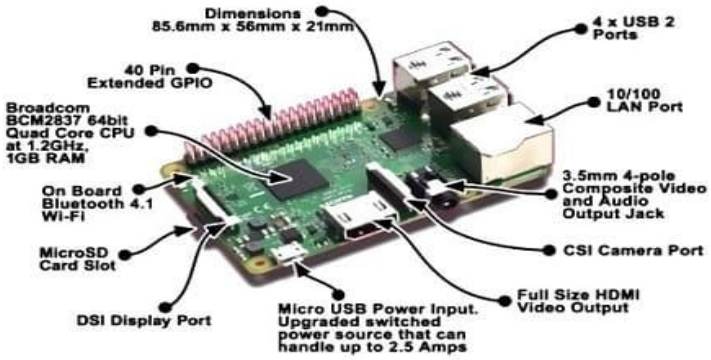


Figura 1. Raspberry PI 3B

Se determinó darle a nuestro PLC una estructura modular como la que presentan los PLC's comerciales, Salas (2017), por lo que se decidió diseñar y generar una Shell principal que permita conectársele de manera directa y fácil a la Raspberry y dar acceso a todos los recursos que esta tiene, así también se conecten las terminales de GPIO de la Raspberry a una serie de puertos de conexión para los módulos de entrada/salida (E/S) de nuestro PLC, dichos puertos serán de 8 E o de 8 S (GPIO) cada uno, ya que es el estándar que se utiliza en los PLC's comerciales, para nuestro caso solamente consideraremos un módulo de 8 entrada y un modulo de 8 salidas

Debido a que en el estándar industrial es la fuente de 24Vcd, Daneri (2008), este Shell recibirá a través de la tarjeta de entrada este valor de voltaje y por medio de 3 reguladores bajará la señal; uno para bajar este voltaje a 3.3Vcd que se requiere en el módulo de entrada, Otro para bajar el voltaje a 5Vcd que se requiere en el módulo de salida y un tercero para bajar el voltaje a 5Vcd para el circuito del propio Shell y para la Raspberry. Por lo que, como los módulos de E/S van a acoplar las señales ya sea leídas de la planta para nuestro PLC o señales de modificación que envíe nuestro PLC a la planta, necesitaran hacer el cambio de valor de voltaje y por lo tanto se le va a enviar al módulo de entrada la señal de 3.3Vcd para comunicarse con la Raspberry ya que el voltaje de 24Vcd para la comunicarse con la Planta lo recibe directamente de ella y él se lo envía al Shell principal, el módulo de salida solamente se le enviara la señal de 5Vcd.

Para el módulo de entrada, considerando que tienen optoacopladores en cada entrada, utilizara la fuente de 24Vcd antes del optoacoplador que es la parte del circuito que recibe la señal de la planta y la de 3.3Vcd después del optoacoplador que es la parte del circuito que envía señal a la Raspberry.

En el caso del módulo de salida que tiene acoplador por relevador, solamente requiere la señal de 5Vcd para activar el solenoide del relevador, ya que el cierre de contactos se encargara de conectar la fuente de 24Vcd presentes en la planta.

Instalación y Configuración del Sistema Operativo en Raspberry PI.

Para la instalación del sistema operativo, primeramente, se necesita una tarjeta microSD ya que ahí es almacenada. Para el proyecto se tomó la decisión de instalar Raspberry Pi OS, y la forma más simple de obtenerlo es mediante

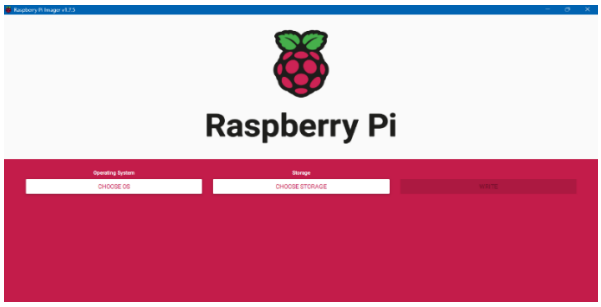


Figura 2. Raspberry Pi Imager, software oficial de Raspberry Pi para la instalación de sistemas operativos en tarjetas microSD.

Se puede descargar el software desde la web oficial de Raspberry Pi, donde se encuentra disponible diferentes versiones como Windows y MacOS. Desde la interfaz se puede seleccionar el sistema operativo dando clic en CHOOSE OS, ver figura 2. Existen diferentes sistemas operativos que se pueden instalar en una tarjeta microSD, entre los cuales se muestran las versiones de Raspberry Pi OS, Emulation and game o Media player OS, León (2021).

El siguiente paso es conectar la microSD a la computadora, y seleccionar que sistema operativo y seleccionar nuestra microSD en el cual será insertado el sistema operativo. Luego el software Raspberry Pi Imager descarga el sistema operativo, lo copia a la tarjeta microSD y verifica que la instalación se haya completado con éxito. Posteriormente se nos indica que se debe remover la microSD e insertarla en la Raspberry Pi. A continuación, se enciende la Raspberry Pi y se hace la configuración previa en el cual se pone usuario y contraseña para el acceso. Al estar dentro de la interfaz de Raspberry Pi OS, se procede a configurar la dirección IP estática y el SSH el cual serviría para comunicación entre CODESYS y Raspberry Pi.

3. Desarrollo.

Diseño, construcción e implementación de hardware del sistema.

Para el diseño de las PCB'S se necesitó tener previamente todos los diseños de los circuitos para así poder realizar de manera más fácil un esquemático. Como se definió que el PLC será de tipo modular y contara con 3 módulos de los cuales son entradas, Shell principal y salidas. En este caso en el esquemático se refleja la topología de la tarjeta, estableciendo conexiones eléctricas entre todos los componentes a emplear. El diseño implico utilizar un software especializado para trasladar el esquemático a una disposición física, en este caso se utilizó la plataforma EasyEDA.

Como primer paso fue realizar el esquemático del módulo de entrada, en la figura 3, se puede observar que cuenta con sus borneras de alimentación para el funcionamiento general del PLC de cual es de 24VDC y con sus borneras de entrada para los componentes que funcionan en ese voltaje. También cuenta con su protección eléctrica, basada por optoacopladores para que posteriormente lleguen las señales a los GPIO correspondientes de la Raspberry Pi y estas no sufran algún daño ya que funcionan a 3.3VDC. En la figura 3 se muestra el esquemático del módulo de entradas.

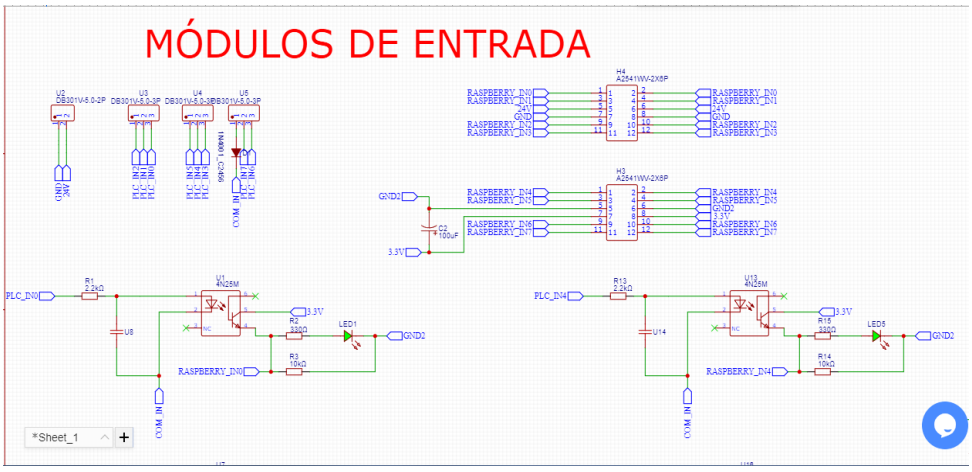


Figura 3. Esquemático del módulo de entrada.

En la figura 4 se puede observar el diseño final de la PCB, es decir, como quedaron acomodados los componentes, viendo que en la parte superior quedaron las borneras donde va la alimentación del PLC y las entradas para las señales de entrada y los componentes electrónico que conforma cada entrada, cabe mencionar que los pines en la parte inferior son los encargados de conectarse con la PCB del Shell principal. En esta imagen se muestra cómo se ve la PCB en 3D y tener una idea de cómo se verá físicamente, Halfacree (2020)

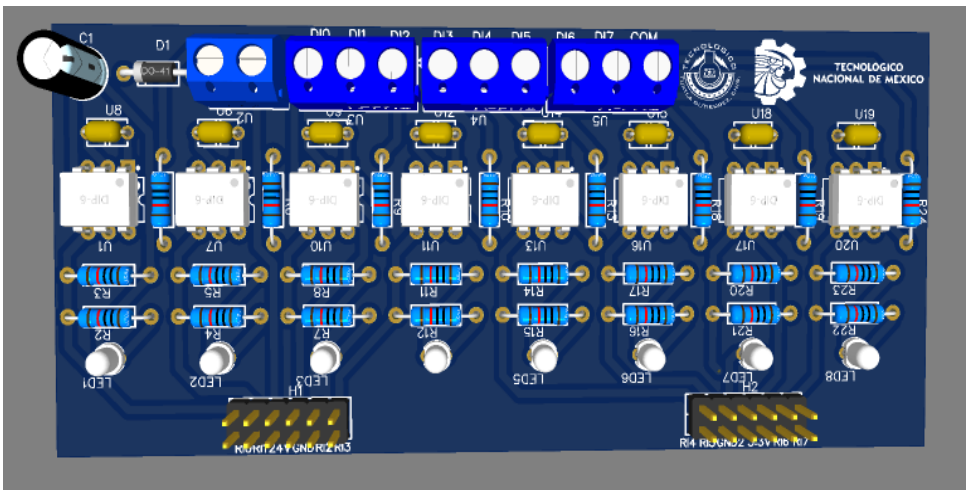


Figura 4. Diseño en 3D de la PCB del módulo de entrada.

De la misma forma, para la placa base del Shell principal, en la imagen 5 se muestran el circuito que lo conforma y podemos observar que están presentes los reguladores de voltaje, encargados de regular el voltaje de la fuente de alimentación de 24VDC que recibe a través de la tarjeta de entrada y alimenta a todos los componentes referenciándose al voltaje general del PLC (red de tierra) y así obtener un buen funcionamiento, de igual manera se observa en que forma será insertada la Raspberry Pi, cabe mencionar que será fácil montaje y desmontaje mediante sus pines haciéndolo una forma modular, figura 5.

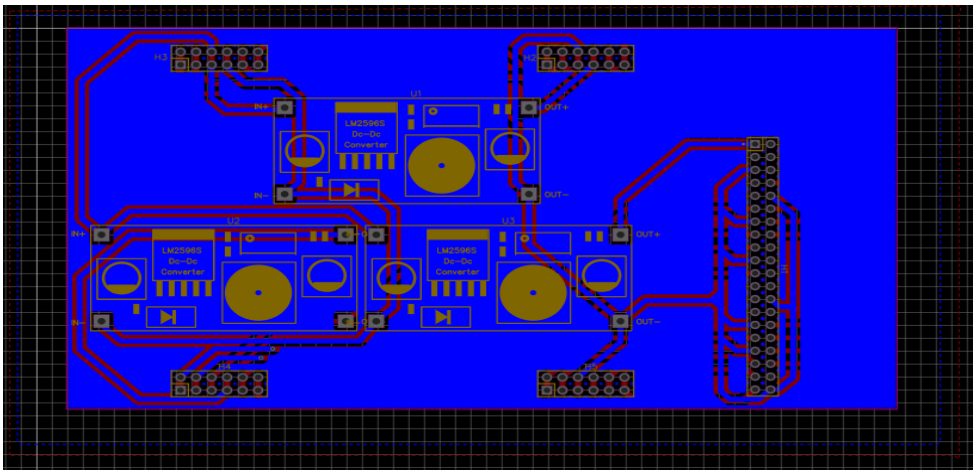


Figura 5. Esquemático del Shell principal.

En la figura 6 se puede tiene el diseño final de la PCB, es decir, como quedaron acomodados los componentes, viendo que en la parte superior quedaron las borneras donde se va a insertar la tarjeta de entrada y en la parte inferior las borneras de la tarjeta de salida, también se observan los componentes electrónico que conforma esta tarjeta, destacando los tres reguladores de voltaje antes mencionados, En esta imagen se muestra cómo se ve la PCB en 3D y tener una idea de cómo se verá físicamente

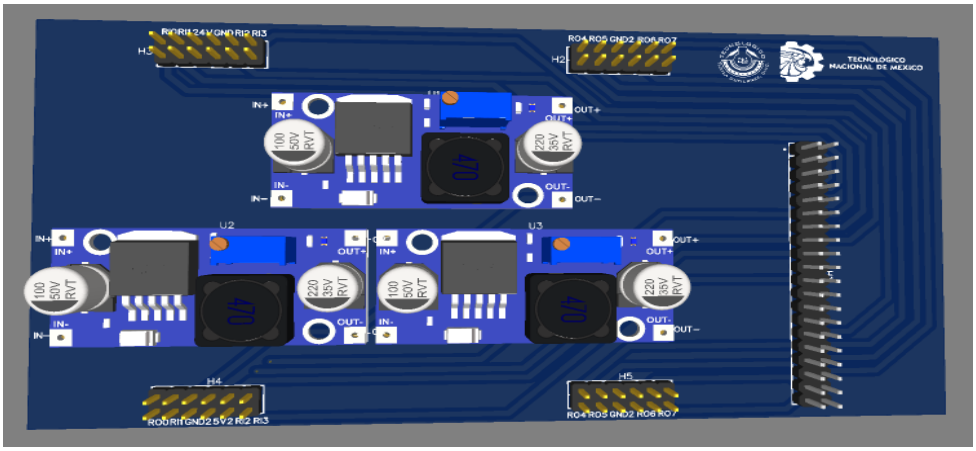


Figura 6. Diseño en 3D de la PCB del Shell principal.

Finalmente se realizó la PCB de la etapa de salidas, en la figura 7 se puede observar de qué manera quedo, en la parte inferior quedaron los pines de conexión los cuales serán conectados a la PCB de la Shell principal, también se muestra de qué forma se acomodaron los componentes electrónicos y principalmente las salidas a relevadores. En la parte inferior se muestra las borneras las cuales serán para conectar actuadores o indicadores.

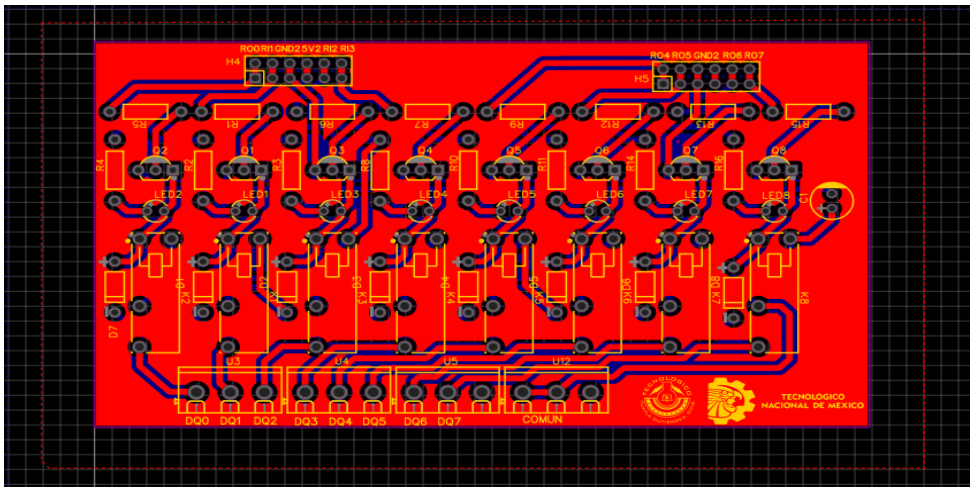


Figura 7. Esquemático del módulo de salida.

En la figura 8 se muestra su diseño en 3D del módulo de salida que nos permite tener la idea de cómo se verá físicamente la tarjeta terminada. Puede observarse que por cada salida se tiene un único pin, lo cual nos permite pensar que el valor de salida será único en cada módulo para sus 8 salidas

En la figura 9 podemos observar la distribución de las GPIO de la Raspberry PI con respecto a las terminales de entradas y de las salidas de nuestro PLC, mismas que quedaron conectadas físicamente a través de las borneras del Shell principal con las tarjetas de los módulos de entrada y salida y deberán considerarse al direccionar nuestras entradas y salidas cuando estemos programando. En la tabla 1 tenemos la lista de componentes usados en cada tarjeta.

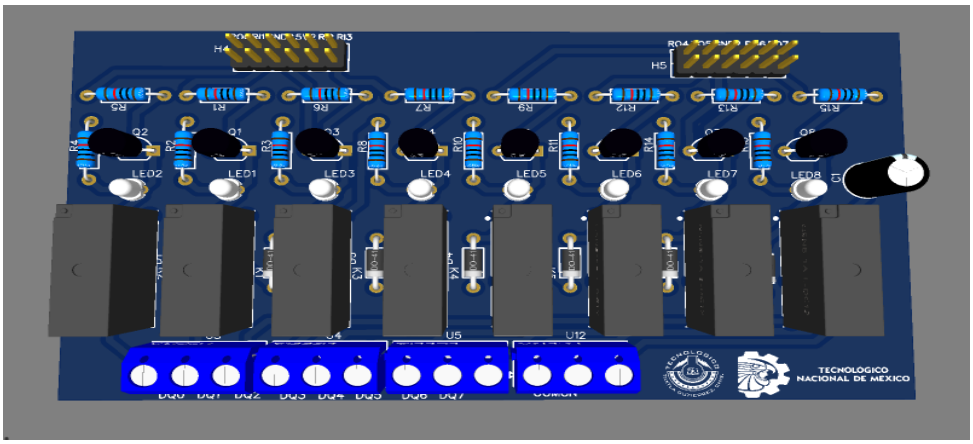


Figura 8. Diseño en 3D de la PCB del módulo de salida

MAPA DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL PLC			
ENTRADAS DEL PLC	GPIO DE LA RASPBERRY	SALIDAS	GPIO DE LA RASPBERRY
I0.0	GPIO4	Q0.0	GPIO18
I0.1	GPIO17	Q0.1	GPIO23
I0.2	GPIO27	Q0.2	GPIO24
I0.3	GPIO22	Q0.3	GPIO25
I0.4	GPIO5	Q0.4	GPIO12
I0.5	GPIO6	Q0.5	GPIO16
I0.6	GPIO13	Q0.6	GPIO20
I0.7	GPIO19	Q0.7	GPIO21

Figura 9. Distribución de las GPIO de la Raspberry PI con respecto a los módulos de E/S del PLC.

Tabla 1. Lista de componentes utilizados.

Módulo de Entrada		**Shell Principal**		**Módulo de Salida**	
Cantidad	**Descripción**	**Cantidad**	**Descripción**	**Cantidad**	**Descripción**
8	Resistencia de 2.2Kohms	3	Regulador de voltaje LM2596	8	Resistencia de 1Kohms
8	Capacitor de 10nF			8	Transistor 2N2222
8	Optoacopladores 4N25	2	Pin header hembra	8	Resistencia de 2.2 Kohms
8	Base para integrado 6 pin	1	Raspberry PI Model 4		
8	Resistencia de 330ohms			8	Led verde 3mm
8	Resistencia de 10Kohms			8	Diodo 1N4001
8	Led verde 3mm			1	Bornera 2 pines
1	Diodo 1N4001			3	Bornera 3 pines
1	Bornera 2 pines			1	Pin header macho
3	Bornera 3 pines			2	Módulo de relevadores
2	Capacitor electrolítico 100uF				
1	Pin header macho				

Instalación y configuración de la plataforma CODESYS en la Raspberry PI.

Antes de empezar con la instalación del programa CODESYS se debe cambiar la IP de nuestra computadora desde donde vamos a realizar la programación de CODESYS, ver figura 10.

- Para esto se debe tener encendida la Raspberry Pi conectada mediante un cable ethernet hacia la computadora,
- Posteriormente se va al apartado de conexiones de red y ahí seleccionar nuestro adaptador ethernet. Al momento de darle siguiente saldrá un apartado de propiedades de ethernet
- Ahí debemos buscar el protocolo de internet versión 4 (TCP/IPv4).

- Al realizar esto se configuro la IP, la máscara de subred y la puerta de enlace predeterminada
- En este caso en la Figura 10 se muestra la configuración propuesta.
- Al terminar esto se debe entrar al símbolo del sistema y verificar si hay comunicación con la Raspberry Pi.

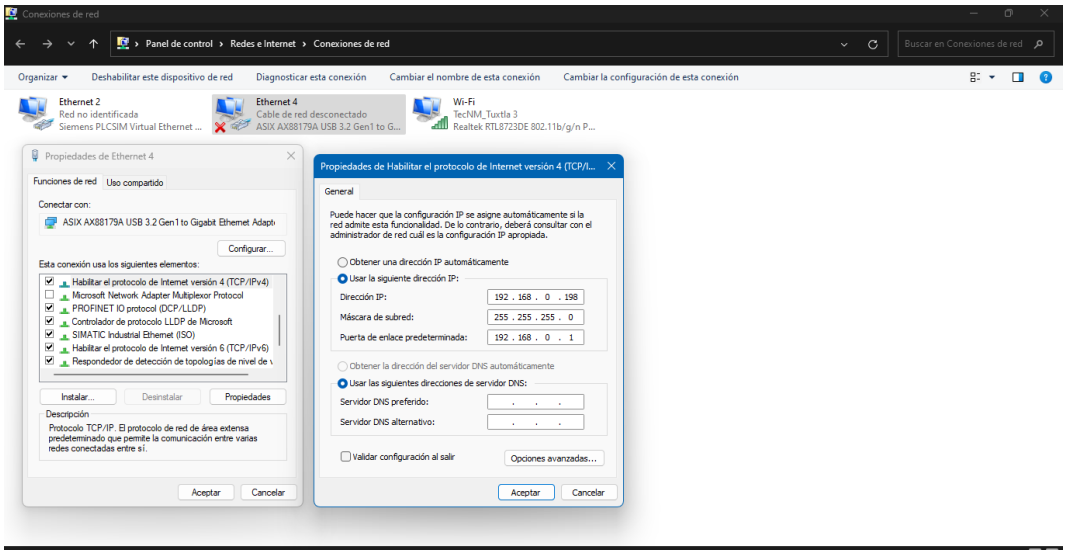


Figura 10. Configuración IP de la computadora.

Ahora si descargamos del sitio oficial al programa CODESYS y sus correspondientes sistemas SoftPLC de acuerdo con la versión determinada y los instalamos. También se descarga e instala desde la misma página la paquetería Control for Raspberry PI SL.

Al terminar la instalación, abrimos el apartado de administración de paquetería en CODESYS e insertamos las librerías deseadas, ver figura 11.

Y por último Solicitamos en el apartado de herramientas “actualizar Raspberry PI” buscamos a nuestra Raspberry y al encontrarla nos muestra su dirección IP lo cual nos permite saber que si se conectaron y continua la instalación.

Una vez configurado el entorno, ya podemos realizar algún programa para transferirlo a nuestro PLC lo cual se realiza en el programa CODESYS y respetando las direcciones que se conectaron como entradas y salidas en la Raspberry, se realizó una prueba con un programa de funcionamiento de un semáforo, ver figura 12.

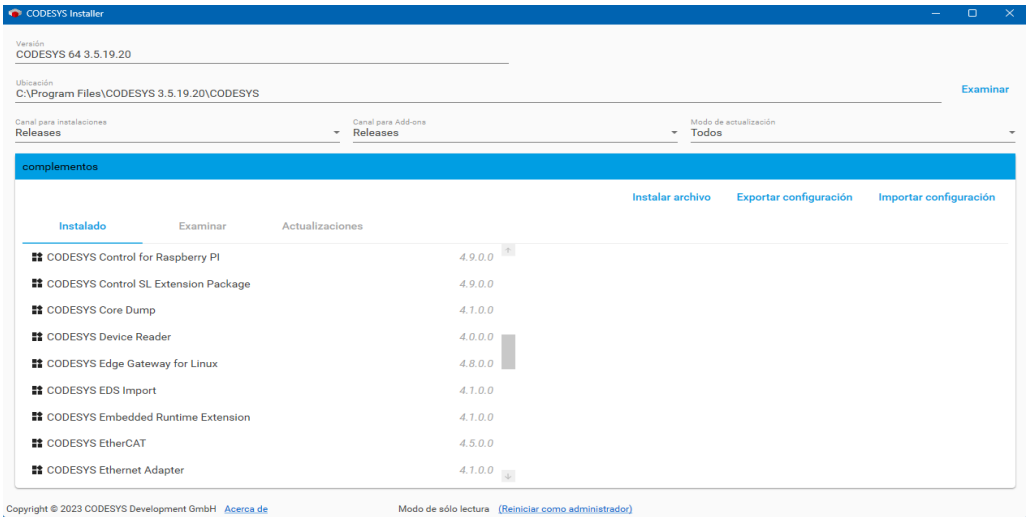


Figura 11. Instalación de la Paquetería de Raspberry Pi en CODESYS.

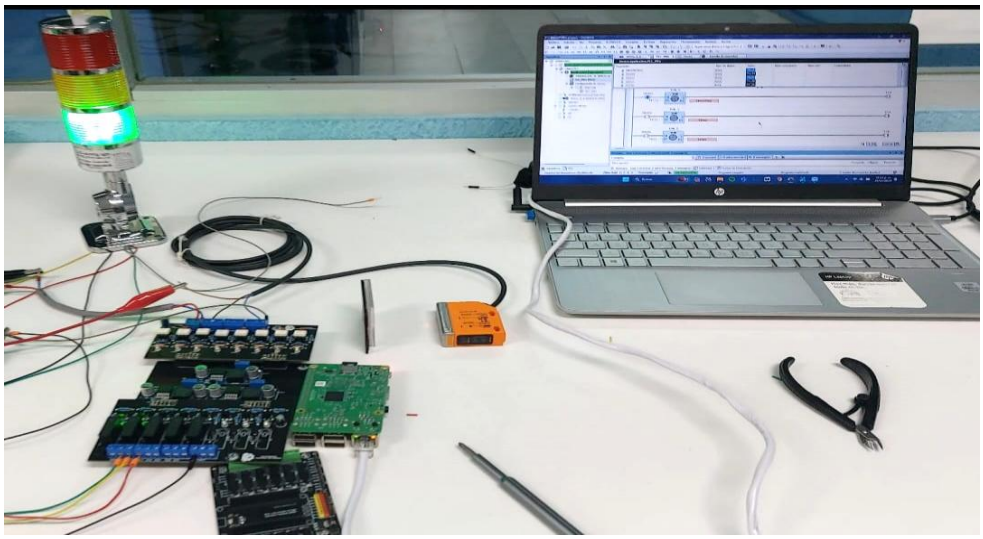


Figura 12. Prueba de funcionamiento, implementando un programa con CODESYS.

Ajustes finales.

Se diseño una carcasa protectora del PLC que abrazara a las 3 placas que conforman nuestro PLC, pero dejando descubiertas las borneras de conexión de los recursos de la Raspberry PI, así como las borneras de conexión de las tarjetas de entrada y salida en donde se conectaran los dispositivos externos del sistema a controlar. La carcasa permite observar los leds de las tarjetas de entrada y salida y la ventilación del PLC.

Resultados:

Para probar el funcionamiento de nuestro PLC y validarlo se necesitó realizar varias pruebas. Para esto se diseñó un kit de entrenamiento para prácticas de automatización en el cual se incorporó a nuestro PLC. Este kit cuenta con diversos componentes usados en la industria 4.0, como son 2 sensores de la marca IFM uno es de tipo inductivo y el otro de tipo fotoeléctrico los cuales operan a 24Vcd. Cuenta con 3 pistones neumáticos de la marca SMC el cual tienen sus electroválvulas 5/2 de la marca Festo que operan a 24Vcd. También el kit cuenta con una botonera de arranque y

paro, tiene un juego de indicadores en este caso es una torreta la cual consta de 3 diferentes colores y un buzzer. Este kit es alimentado a través de una fuente de 24Vcd, Sanchis (2010). Ver figura 13.

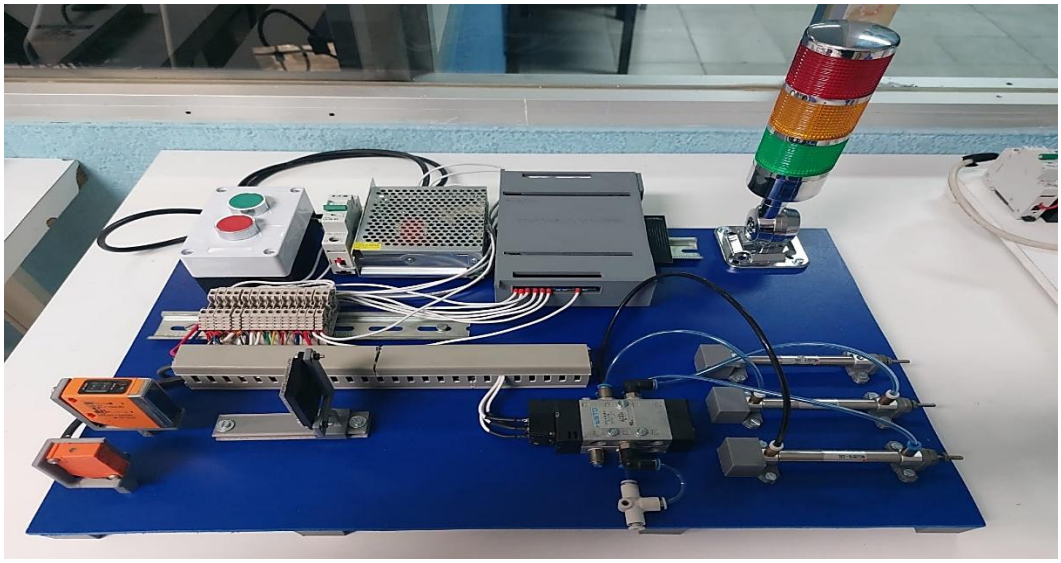


Figura 13. Kit de Entrenamiento Usando el PLC Basado en Raspberry Pi.

Una de las primeras pruebas fue la evaluación rigurosa de la complementación de hardware y software. La Raspberry Pi demostró ser una plataforma sólida y capaz de manejar las tareas asignadas con eficacia, mientras que CODESYS proporciono un entorno de desarrollo flexible y potente.

Se verifico el rendimiento del controlador mediante pruebas de respuesta en tiempo real y análisis de carga, los resultados destacaron un tiempo de respuesta dentro de los parámetros aceptables para entradas y salidas, cumpliendo con los requisitos estándar para la industria. Además, se observó una capacidad de procesamiento adecuada para manejar múltiples tareas simultaneas, esto lo hace un sistema para aplicaciones industriales de mayor complejidad.

También se llevó a cabo un análisis de estabilidad a largo plazo y la consistencia del controlador en condiciones de funcionamiento continuo. Durante el periodo de prueba extendido, no se observaron fallos significativos ni degradación del rendimiento, respaldando la fiabilidad del sistema en entornos industriales exigentes, Barrera (2004).

En una comparación con un PLC comercial equivalente, se determino que nuestro PLC que debido a los recursos que presenta la Raspberry PI presenta mayor accesibilidad, versatilidad y flexibilidad, mayor adaptabilidad al entorno industrial, alta gama de herramientas de programación y estabilidad.

Conclusiones.

El desarrollo de este proyecto ha alcanzado su objetivo al lograr un controlador lógico programable que aprovecha la potencia de una Raspberry Pi y la eficacia del sistema CODESYS. Esto PLC representa un avance en el mundo de la automatización industrial 4.0 aplicado a un enfoque económico.

Al unir la flexibilidad de la Raspberry Pi y la solidez operativa de CODESYS ha resultado en un sistema de control versátil y eficiente, el cual es capaz de desempeñarse a buen nivel en distintos entornos industriales. El uso de un hardware costeable y un software eficiente, no solo se ha logrado una reducción de costos, sino que se ha creado una solución que se adapta de manera óptima.

Esto se traduce en un recurso valioso para empresas de menor nivel que buscan optimizar sus operaciones. Este proyecto posibilita el comienzo de oportunidad en la que la tecnología se aplique como un facilitador accesible y poderoso para la mejora los procesos industriales en pequeñas empresas o en comunidades rurales que quieran automatizar las soluciones de sus necesidades.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto a través de la convocatoria de Proyecto de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2025.

Referencias bibliográficas.

Barrera, R., Cartagena, J. A., & Pocasangre, C. O. (2004,). *Diseño y construcción de un controlador lógico Programable PLC a base de un microcontrolador*. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/18186

Daneri, P. A. (2008). *PLC Automatización y Control Industrial*. https://www.academia.edu/47770770/Kupdf_net_plc_automatizacion_y_control_industrial_pablo_daneri

Halfacree, G. (2020). *LA GUÍA OFICIAL DE Raspberry Pi para principiantes*. McLibre.org. https://www.mclibre.org/descargar/docs/revistas/magpi-books/raspberry-pi-beginners-book-4-es-202011.pdf

León, J. D. (2021). *Diseño e implementación de un PLC basado en Raspberry Pi & Node-RED para aplicaciones industriales IOTT*. https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4861

Salas, G. E. (2017). *HISTORIA DE LOS INICIOS DEL PLC*. https://www.academia.edu/34381291/historia_del_plc

Sanchis, R., Romero, J. A., & Ariño Latorre, C. V. (2010). *Automatización industrial*. www.academia.edu. https://www.academia.edu/39128729/Automatizaci%C3%B3n_industrial

Información de los autores.

Raúl Moreno Rincón, Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, egresado de la ESIME-IPN, en la ciudad de México, D.F. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca. Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Chiapas. Certificado en SolidWorks Associate. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y jefe de Proyectos de Docencia de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 1999 y Colabora en la línea de investigación "Robótica" de Ingeniería electrónica y es parte del cuerpo académico en formación "Sistemas de control inteligentes". Ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, sistema de control de animatronic, entre otros.

Luis Antonio Orellana Águila, Estudiante de Ingeniería Electrónica en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, participo en el proyecto de investigación nacional denominado Diseño de un Controlador Lógico Programable de bajo costo basado en Raspberry PI y el Sistema Codesys para aplicaciones en tratamiento de agua durante su residencia, a participado también en proyectos de fin de materia que se han expuestos en el evento académico semestral denominado Exproyeca en el TecNM-ITTG

Álvaro Hernández Sol, es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundador y asesor del "Club de robótica del ITTG". Colabora en la línea de investigación de "Robótica"

Osbaldo Ysaac García Ramos, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Académico de Tiempo Completo en UVM desde 2005. Tiene 12 años de experiencia docente. Tiene Cursos especialización en Mecatrónica en Universidad de Esslingen Alemania, en la empresa Emco Salzburgo Austria, en la empresa Festo Estados Unidos y Festo México. Responsable técnico del proyecto de investigación "Consolidar un centro de investigación y desarrollo de vehículos eléctricos funcionales y confortables e impulsados por energía limpia" junto con la empresa Invemex S.A. de C.V., 2015. Ha desarrollado proyectos de investigación como 'Sistema de medición de hélices de barco para la secretaria de marina financiado por Conacyt y Semar', "Diseño y caracterización de Biomateriales a partir de macromicetos como alternativa al uso del unicel" en él año 2014 (financiados por Conacyt). Tiene participaciones en congresos internacionales como congreso Tecno láser Habana Cuba 2013 con artículo y ponencia 'Método de registro automático de imágenes de rango tridimensionales para restauración de piezas arqueológicas'.

Alexis de Jesús Flores García es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG, 2010) y Maestro en Ciencias en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Se desempeña como Docente en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del ITTG, con 11 años de experiencia docente. Posee certificaciones CSWA, CSWP y en Manufactura Aditiva por SolidWorks, además de un diplomado en Microsoft Teams. Es profesor con perfil deseable PRODEP, colaborador del cuerpo académico "Sistemas de Control Inteligentes", presidente de la Academia de Ingeniería Electrónica y miembro de la Academia de Ingeniería Mecatrónica.

Roberto Ibáñez Córdova, Ingeniero Industrial en Eléctrica por el I.T. Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Toluca, Doctor en Ingeniería Aplicada por el Colegio de Formación Educativa TENAM en Tuxtla Gutiérrez. Áreas de interés son: Automatización de procesos mediante el desarrollo de Sistemas embebidos Inteligentes (Hardware-Software), Sistemas de Control remoto vía WEB.

Desarrollo de un Phantom de músculo para la calibración de resolución espacial en equipo de ultrasonido.

Development of a muscle Phantom for spatial resolution calibration in ultrasound equipment.

Fredy Ocelotl Rodríguez López (1).
Estudiante Universidad Politécnica de Chiapas/U. P. Chiapas.
223013@ib.upchiapas.edu.mx.

César Gabriel Cigarroa Durán* (2). Estudiante Universidad Politécnica de Chiapas/U. P. Chiapas,
223012@ib.upchiapas.edu.mx.

Eglain Constantino Cortés (3), Docente de la Universidad Politécnica de Chiapas/U.P. Chiapas,
constantino@ib.upchiapas.edu.mx.

Jorge Alberto Rodríguez Ramírez (4), Docente de la Universidad Politécnica de Chiapas/U.P. Chiapas,
jrodriguez@ib.upchiapas.edu.mx.

*corresponding author

Artículo recibido en julio 07, 2025; aceptado en julo 21, 2025.

Resumen.

Se presenta el diseño y desarrollo de un phantom de músculo elaborado con agar, grafito, glicerina y agua bidestilada, con el fin de simular las propiedades acústicas del tejido muscular humano, particularmente la atenuación. Este phantom busca ofrecer una alternativa accesible para calibrar equipos de ultrasonido y apoyar la formación médica e investigación biomédica, utilizando materiales de bajo costo adaptados a contextos locales como Chiapas. Se complementa con un software desarrollado en Python, con interfaz gráfica en FLET, que permite analizar imágenes médicas en formato DICOM y calcular parámetros como resolución espacial, coeficiente de atenuación y distancias anatómicas. Se realizaron pruebas a 5 MHz, cuyos resultados fueron evaluados estadísticamente, evidenciando uniformidad, baja dispersión y alta confiabilidad. El proyecto ofrece una solución técnica viable, económica y eficaz para la calibración y enseñanza del ultrasonido médico.

Palabras claves: Atenuación, calibración, imágenes médicas, phantom, ultrasonido.

Abstract.

This paper presents the design and development of a muscle phantom made from agar, graphite, glycerin, and distilled water, aimed at simulating the acoustic properties of human muscle tissue, particularly attenuation. The phantom serves as an accessible alternative for calibrating ultrasound equipment and supporting medical training and biomedical research, using low-cost materials adapted to local contexts such as Chiapas. It is complemented by software developed in Python, featuring a graphical interface in FLET, which allows for the analysis of DICOM medical images and the calculation of key parameters such as spatial resolution, attenuation coefficient, and anatomical distances. Tests were conducted at 5 MHz, and the results were statistically analyzed, showing uniformity,

low dispersion, and high reliability. The project offers a technically viable, cost-effective, and efficient solution for ultrasound calibration and education.

Keywords: Attenuation, calibration, medical imaging, phantom, ultrasound**.**

1. Introducción.

Los **phantom** son dispositivos usados en la comunidad de investigación biomédica. Los **phantoms** de imágenes médicas se utilizan como sustitutos de los tejidos humanos para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas y métodos de obtención de imágenes del cuerpo humano (What Are Imaging Phantoms? | NIST, 2024).

La precisión en los diagnósticos se trata de una de las características más importantes a la hora de acudir con un médico, ya que influye directamente en el correcto tratamiento del paciente (Hendee & Ritenour, 2002). El ultrasonido se ha convertido en uno de los métodos principales para alcanzar un diagnóstico correcto, gracias a su capacidad de generar imágenes no invasivas en tiempo real (Szabo, 2004).

Desde su invención en la década de 1950s, esta tecnología ha evolucionado para cubrir con los requisitos de especialidades como la cardiología, obstetricia, radiología y medicina de urgencias (Hoskins et al., 2010). El éxito del ultrasonido se debe a la calidad y precisión de las imágenes que proporciona, lo que hace de la calibración un proceso esencial para asegurar diagnósticos fiables (American Institute of Ultrasound in Medicine [AIUM], 2021).

La calibración de los equipos de ultrasonido se debe realizar de manera continua, ya que factores como el desgaste de los transductores y las variaciones en las condiciones de operación afectan el resultado de la imagen obtenida (Fowlkes et al., 2008). Una calibración deficiente puede generar imágenes distorsionadas y de baja calidad dificultando el diagnóstico e interfiriendo en el tratamiento del paciente.

Para conocer que tan extendido este el uso de los **phantoms** en la calibración de equipos de ultrasonido, se diseño una encuesta dirigida a hospitales que cuenten con ingenieros biomédicos y personal encargado de la calibración de estos equipos en hospitales y empresas de servicio técnico ultrasonido en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. La encuesta incluyo preguntas como:

- ¿Conoce qué es un **phantom**?
- ¿Utilizan **phantoms** para la calibración de ultrasonido?

Los resultados mostraron que, aunque algunos conocen de la existencia del **phantom** como método de calibración, la mayoría desconoce de su existencia o no hace uso del **phantom** como método de calibración.

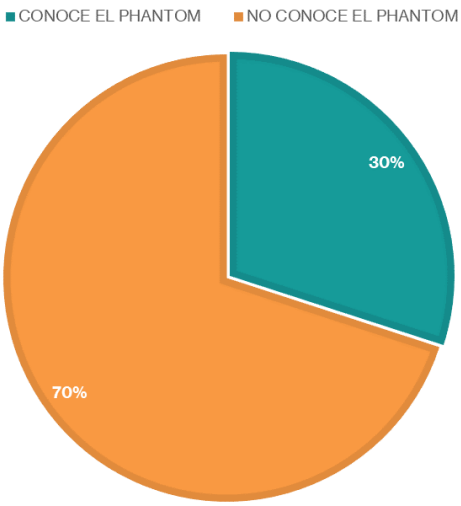


Figura 1. Resultados de la encuesta: conocimiento del **phantom** para calibración.

En la figura 2, se puede observar el nulo uso de los **phantoms** para calibración:

Figura 2. Resultados de encuesta: uso de **phantom** para calibración.

En este estudio se diseñó y desarrolló un phantom de grafito, el material fue seleccionado por su capacidad para simular el coeficiente de atenuación del tejido muscular humano (Teirlinck et al., 1998). A diferencia de otros **phantoms** elaborados con polímeros sintéticos, el grafito ofrece ventajas en términos de durabilidad y estabilidad acústica (Brown et al., 2003).

Para evaluar la resolución y calidad de las imágenes obtenidas del phantom, se utilizaron técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se desarrolló un software en Python utilizando Visual Studio Code, que permite calcular parámetros como resolución axial, lateral, profundidad de penetración de la onda y coeficiente de atenuación, facilitando la caracterización del phantom (Gonzalez & Woods, 2018).

Para la elaboración de nuestro phantom se hizo uso de:

- Agar vegetal.
- Grafito.

- Glicerina.
- Agua destilada.

2. Métodos.

Diseño del phantom.

El **phantom** se trata de una mezcla coloidal semisólida, de alta pigmentación, quebradiza y presenta una atenuación similar a la del tejido muscular liso ante el paso de las ondas sonoras. El cálculo de los componentes para la elaboración de los **phantoms** se realiza basándose en los porcentajes en masa de cada componente. Cada porcentaje masa se calcula con respecto a la masa de agua necesaria. Será X y Y los componentes a utilizar para la elaboración de un **phantom** a base de agua, donde X es sólido y Y es líquido, la cantidad de agua requerida está dada por

$$\mathbf{m_{agua}} = \frac{\%\mathbf{Agua} \times \mathbf{V_{total}}}{\mathbf{100}\%} \times \boldsymbol{\rho}_{\mathbf{agua}} \ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{Ecuación\ 1}.$$

Donde %Agua es el porcentaje en masa del agua, $\mathbf{V_{total}}$ es el volumen del **phantom** y $\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{agua}}$ es la densidad del agua. Sean %X y %Y los porcentajes en masa de los componentes X y Y, respectivamente, el porcentaje en masa del agua está dado por

$$\%\mathbf{Agua} = \mathbf{100}\% - \%\mathbf{X} - \%\mathbf{Y} \ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{Ecuación\ 2}.$$

La masa de los otros componentes se calcula a partir de la masa del agua y de los porcentajes en masa necesarios. La masa de X ($\mathbf{m_x}$) está dada por

$$\mathbf{m_x} = \frac{\%\mathbf{X} \times \mathbf{m_{agua}}}{\%\mathbf{Agua}} \ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{Ecuación\ 3}.$$

El volumen requerido de Y con base a su densidad $\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{y}}$esta dado por

$$\mathbf{V_Y} = \frac{\mathbf{m_Y}}{\boldsymbol{\rho}_{\mathbf{Y}}} \ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{Ecuación\ 4}.$$

Desarrollo del software.

El software fue hecho en Python con el objetivo de ayudar en el análisis de imágenes médicas en formato DICOM, que es el estándar que se usa para transmitir, guardar, imprimir, procesar y mostrar imágenes médicas (NEMA,2023). Desde el inicio, el programa permite abrir este tipo de imágenes, procesarlas, separar las zonas de interés, hacer mediciones importantes y guardar los resultados. Todo esto se puede hacer desde una interfaz gráfica. El proceso empieza cuando el usuario carga una imagen DICOM, para esto se usa una librería llamada **pydicom**, que permite leer tanto la imagen como los datos que trae, como el tamaño real de los píxeles, lo cual es muy útil para medir con precisión.

Después de cargar la imagen, el programa le aplica un proceso para eliminar el ruido, usando un filtro gaussiano. Esto ayuda a que la imagen se vea más clara y que los bordes estén mejor definidos. Luego se hace una segmentación, que significa que el programa separa la parte importante de la imagen del fondo. Para lograr esto se usa un umbral automático, basado en los valores promedio de la imagen. Esto es útil para resaltar la zona que se quiere estudiar.

Una vez que la imagen está segmentada, el software muestra el resultado en una ventana donde el usuario puede interactuar con ella. Ahí se pueden hacer mediciones, por ejemplo, marcando dos puntos en la imagen para saber la

distancia entre ellos. El programa muestra la distancia en píxeles, pero también la convierte a milímetros usando los datos originales del archivo, lo que hace que las mediciones sean más útiles y confiables.

Por último, el usuario puede realizar los cálculos del coeficiente de atenuación para posteriormente guardar todos los resultados. El software genera un reporte con la imagen y las mediciones, el cual puede guardarse como PDF. Todo el sistema está diseñado para que sea fácil de usar, incluso para quienes no tienen mucha experiencia en este tipo de herramientas. La interfaz fue hecha con **FLET**, que permite ir paso a paso en el análisis. En general, este desarrollo facilita mucho el trabajo con imágenes médicas y puede ser útil tanto para estudiantes como para profesionales de la salud o investigadores.

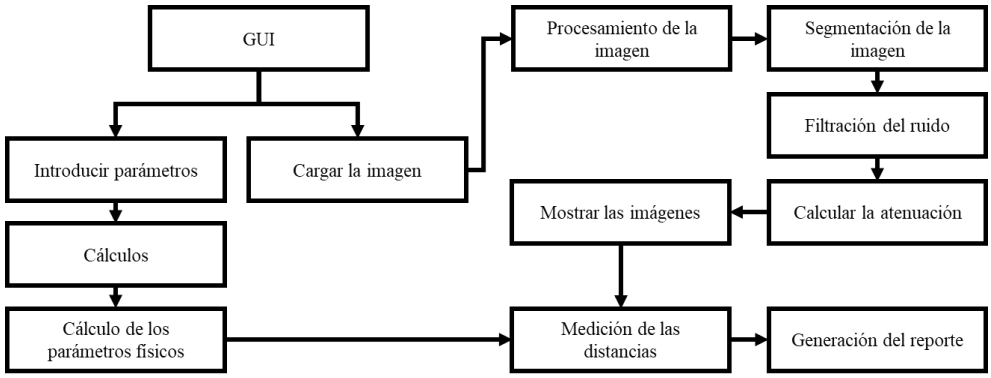


Figura 3. Diagrama de bloques del software de análisis DICOM.

Cálculo del coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación es un parámetro fundamental en la evaluación del comportamiento acústico de un medio, ya que representa la pérdida de intensidad de la onda ultrasónica conforme atraviesa un material. En el presente estudio, se diseñó un módulo dentro del software que permite calcular de forma automática dicho coeficiente a partir de una imagen médica en formato DICOM.

Para asegurar la validez de los resultados obtenidos con el **phantom**, se tomaron como referencia las recomendaciones dadas por entidades como la **American Institute of Ultrasound in Medicine** (AIUM) y la norma internacional IEC 61161, las cuales establecen los procedimientos estandarizados para la medición de parámetros acústicos en medios de prueba. Estas normas proporcionan criterios técnicos para evaluar propiedades como la atenuación y la resolución espacial, con el cual se estableció una base de datos sobre los cuales comparar los valores obtenidos experimentalmente. El **phantom** desarrollado busca alinearse con estas directrices.

El procedimiento inicia con la carga de la imagen, la cual es procesada con el fin de extraer información en la parte de intensidad. Se identifica el valor de intensidad inicial en la imagen (I_o) y se calcula el valor promedio de intensidad (I) en la región de interés. Estos valores son utilizados para estimar la atenuación de la señal mediante una fórmula logarítmica (ecuación 5) que se ajusta a los principios de propagación acústica:

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{10}{d} \cdot \log 10 \left(\frac{I_0}{I}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots \text{Ecuación 5}}$$

En esta expresión, α representa el coeficiente de atenuación expresado en decibeles por centímetro por megahertz [MHz] (dB/cm/MHz), mientras que d es la distancia que ha recorrido la onda dentro del medio (en centímetros). El cociente $\frac{I_0}{I}$ refleja la reducción de intensidad en el trayecto recorrido, ajustado a una escala logarítmica de base 10.

Los datos obtenidos de las mediciones de atenuación se analizaron haciendo uso de estadística descriptiva (media, mediana, moda, desviación estándar y rango intercuartil) para caracterizar la dispersión y tendencia central. Se hizo

uso de un intervalo de confianza del 95% para estimar el rango en el cual se espera que se encuentre el valor real de la media poblacional de la uniformidad.

3. Desarrollo.

El equipo de laboratorio necesario para la elaboración del phantom se indica en la siguiente tabla.

Tabla 1. Equipo de laboratorio.

Número	Material	Cantidad
1	Vaso de precipitado (250ml)	4
2	Termo agitador	2
3	Pastilla imantada	2
4	Pipeta graduada (10ml)	1
5	Propipeta	1
6	Espátula	2
7	Balanza analítica	1
8	Vidrio de reloj	4
9	Termómetro	1

La elaboración de la mezcla comienza vertiendo en uno de los vasos de precipitado el agua bidestilada, y en el segundo vaso una cuarta parte del volumen vertido en el primer vaso, manteniendo una relación 1:4. El vaso con mayor cantidad de agua se colocó sobre el termoagitador con la pastilla magnética en su interior a baja velocidad, y se dejó calentar hasta alcanzar una temperatura aproximada de 50°C.

Posteriormente, se midieron los reactivos teniendo el volumen de agua como la base: 0.04 gramos de agar y 0.056 gramos de grafito por cada mililitro de agua. El agar se añadió al vaso sobre el termoagitador de forma gradual para evitar la formación de grumos y elevando la velocidad de giro de forma gradual, asegurándose de que la temperatura no superara los 65 °C.

El grafito medido se incorporó al vaso con la menor cantidad de agua, mezclando lentamente hasta lograr obtener una mezcla homogénea y sin grumos. Luego, la mezcla del vaso con agar y agua fue vertido dentro del vaso con grafito, el cual se coloca sobre el termoagitador, moviendo la pastilla magnética hacia su interior. Se elevó la temperatura de la mezcla hasta alcanzar aproximadamente 70 °C, con este orden en el vertido se busca evitar pérdidas de grafito y así obtener un valor más aproximado al deseado.

Se midió la cantidad de glicerina usando una proporción de 0.0624 ml por cada ml de agua, y se dejó gotear dentro de la mezcla, una vez se terminó el vertido de la glicerina se apagó el calefacto del termoagitador, pero se mantuvo el giro continuo hasta lograr una mezcla uniforme. Finalmente, se dejó enfriar sin disminuir la velocidad de giro del termoagitador hasta alcanzar los 40 °C, una vez alcanzada esta temperatura se vertió la mezcla en el molde, para finalizar se deja reposar hasta que se solidifique.

Desarrollo del software.

El software fue evaluado a través de pruebas internas para verificar la efectividad de cada función. La interfaz, diseñada en FLET, permite al usuario seguir un flujo guiado para el análisis de imágenes, desde la carga del archivo hasta la exportación de resultados.

Figura 4. Interfaz gráfica del software desarrollado en FLET.

En ella se observa la opción de crear un nuevo proyecto. Incluye accesos rápidos a las principales funciones, como carga de imagen, procesamiento y exportación de resultados.

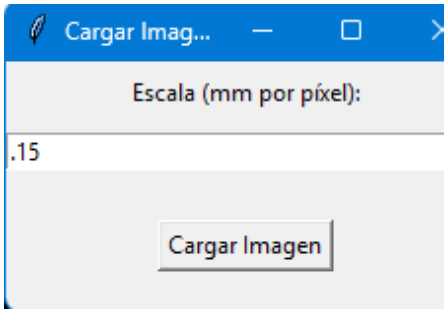
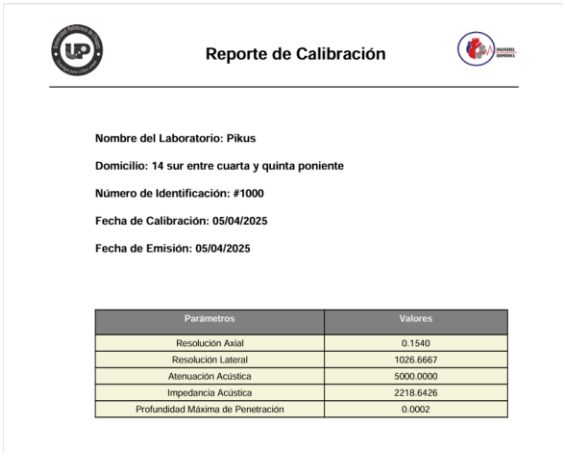


Figura 5. Carga de imagen.

Este apartado permite ajustar la escala del píxel y abrir el explorador de archivos de la computadora para cargar la imagen y automáticamente procesarla.



Reporte de Calibración

Nombre del Laboratorio: Pikus

Domicilio: 14 sur entre cuarta y quinta poniente

Número de Identificación: #1000

Fecha de Calibración: 05/04/2025

Fecha de Emisión: 05/04/2025

Parámetros	Valores
Resolución Axial	0.1540
Resolución Lateral	1026.6667
Atenuación Acústica	5000.0000
Impedancia Acústica	2218.6426
Profundidad Máxima de Penetración	0.0002

Figura 6. Ejemplo del reporte de calibración generado por el sistema.

Se genera a partir del ingreso de los datos solicitados al crear un nuevo proyecto y a los valores que se proporcionan para los cálculos.

Código del cálculo de atenuación en imagen.

```
def cargar_imagen_dicom(ruta):
      dicom = pydicom.dcmread(ruta)
      imagen = dicom.pixel_array.astype(np.float32)
      return imagen

ruta_imagen = "ruta/a/tu/archivo.dcm"
imagen = cargar_imagen_dicom(ruta_imagen)

print(f"Atenuación calculada: {atenuacion:.4f}")
```

Vistas superior del phantom | Vista lateral del phantom | Vista superior del phantom

Figura 7. Imágenes tomadas del **phantom.**

Figura 8. Phantom con inserción de objeto conocido (canica de 0.96 cm).

Se realizaron un total de 70 adquisiciones de imagen del **phantom** haciendo uso de un equipo de ultrasonido a una frecuencia de 5MHz Las imágenes obtenidas fueron almacenadas en formato **DICOM** (.DCM) y procesadas haciendo uso del software desarrollado, con el objetivo de calcular la atenuación acústica de parte del **phantom**.

A los valores obtenidos se les aplicación métodos de estadística descriptiva para evaluar la calidad y consistencia de las mediciones. Entre estos se incluyen: media, mediana, moda, desviación estándar, el cálculo de los rangos Inter cuartiles (Q1, Q3 y el IQR). También se calculó el error estándar y los intervalos de confianza del 95%.

Estas pruebas permiten determinar la precisión, dispersión y confiabilidad de los datos obtenidos, así como identificar posibles valores atípicos o tendencias en la distribución de los resultados. Esto nos permite asegurar que las mediciones reflejen adecuadamente las propiedades físicas del **phantom** bajo condiciones controladas.

Aunque no se tuvo acceso a un **phantom** de referencia comercial certificado, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos descritos en la literatura técnica para tejidos musculares simulados, lo cual respalda la validez funcional del prototipo propuesto.

Tabla 2. Datos obtenidos de las pruebas de uniformidad.

No. muestra	Valor de referencia	Atenuacion	Error de medida	Tolerancia (5%)
1	0.5	0.5080	0.0080	Cumple
2	0.5	0.5025	0.0025	Cumple
3	0.5	0.5062	0.0062	Cumple
4	0.5	0.5026	0.0026	Cumple
5	0.5	0.5072	0.0072	Cumple
6	0.5	0.5070	0.0070	Cumple
7	0.5	0.4988	-0.0012	Cumple
8	0.5	0.4991	-0.0009	Cumple
9	0.5	0.5080	0.0080	Cumple
10	0.5	0.4974	-0.0026	Cumple
11	0.5	0.4981	-0.0019	Cumple
12	0.5	0.5010	0.0010	Cumple
13	0.5	0.5061	0.0061	Cumple
14	0.5	0.4986	-0.0014	Cumple
15	0.5	0.5072	0.0072	Cumple
16	0.5	0.5076	0.0076	Cumple
17	0.5	0.5053	0.0053	Cumple
18	0.5	0.5073	0.0073	Cumple
19	0.5	0.4977	-0.0023	Cumple
20	0.5	0.4977	-0.0023	Cumple
21	0.5	0.5014	0.0014	Cumple
22	0.5	0.5020	0.0020	Cumple
23	0.5	0.5080	0.0080	Cumple
24	0.5	0.4983	-0.0017	Cumple
25	0.5	0.4980	-0.0020	Cumple
26	0.5	0.4975	-0.0025	Cumple
27	0.5	0.4983	-0.0017	Cumple
28	0.5	0.4994	-0.0006	Cumple
29	0.5	0.4980	-0.0020	Cumple
30	0.5	0.4991	-0.0009	Cumple
31	0.5	0.5070	0.0070	Cumple
32	0.5	0.5034	0.0034	Cumple
33	0.5	0.5096	0.0096	Cumple
34	0.5	0.5073	0.0073	Cumple
35	0.5	0.5037	0.0037	Cumple
36	0.5	0.5024	0.0024	Cumple
37	0.5	0.4984	-0.0016	Cumple
38	0.5	0.5050	0.0050	Cumple
39	0.5	0.5033	0.0033	Cumple
40	0.5	0.5039	0.0039	Cumple
41	0.5	0.5043	0.0043	Cumple
42	0.5	0.5043	0.0043	Cumple
43	0.5	0.5045	0.0045	Cumple
44	0.5	0.5030	0.0030	Cumple
45	0.5	0.5012	0.0012	Cumple
46	0.5	0.5001	0.0001	Cumple
47	0.5	0.4956	-0.0044	Cumple
48	0.5	0.4998	-0.0002	Cumple
49	0.5	0.5058	0.0058	Cumple
50	0.5	0.5031	0.0031	Cumple
51	0.5	0.5057	0.0057	Cumple
52	0.5	0.5035	0.0035	Cumple
53	0.5	0.5026	0.0026	Cumple
54	0.5	0.5015	0.0015	Cumple
55	0.5	0.5019	0.0019	Cumple
56	0.5	0.5056	0.0056	Cumple
57	0.5	0.4977	-0.0023	Cumple
58	0.5	0.5050	0.0050	Cumple
59	0.5	0.5040	0.0040	Cumple
60	0.5	0.5040	0.0040	Cumple
61	0.5	0.5006	0.0006	Cumple
62	0.5	0.5011	0.0011	Cumple
63	0.5	0.5020	0.0020	Cumple
64	0.5	0.5027	0.0027	Cumple
65	0.5	0.5025	0.0025	Cumple
66	0.5	0.4998	-0.0002	Cumple
67	0.5	0.5034	0.0034	Cumple
68	0.5	0.5035	0.0035	Cumple
69	0.5	0.5072	0.0072	Cumple
70	0.5	0.5030	0.0030	Cumple

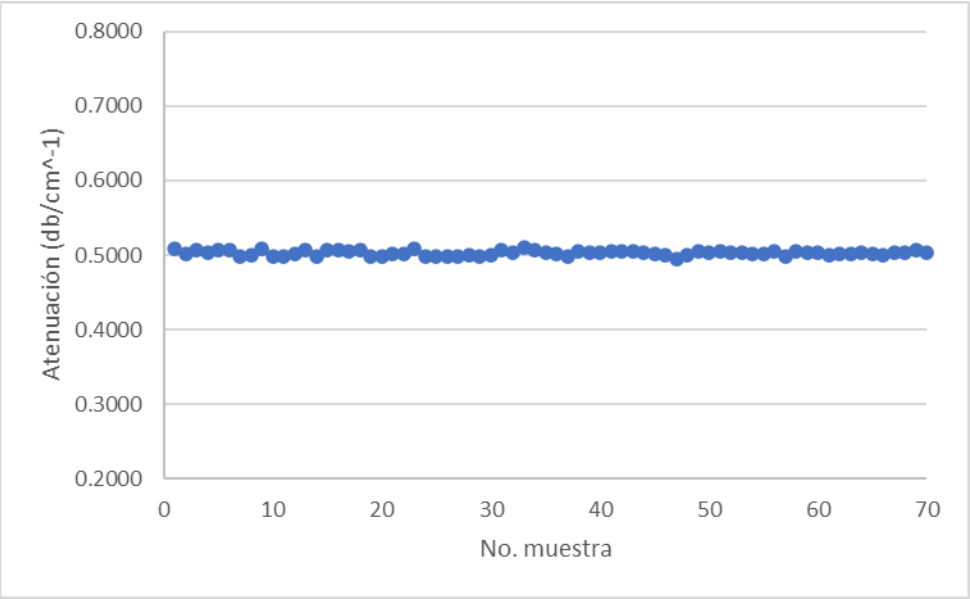


Figura 9. Gráfico de dispersión de las pruebas de uniformidad.

El análisis de los datos indica que la media (0.5027) cumple con una diferencia de 0.0027, lo que representa un desvío del 0.54%. Además, tanto la media como la mediana muestran una gran similitud, lo que nos sugiere que la distribución de los datos es simétrica (Tabla 4). Es coeficiente de variación y la estrechez del intervalo de confianza nos refuerza la idea de una alta precisión y una baja dispersión en las mediciones.

No se identificaron resultados atípicos fuera del rango Inter cuartil, esto nos indica que no existen errores sistemáticos ni mediciones extraordinariamente desviadas, por lo que la recolección de los datos puede considerarse adecuada.

Tabla 3. Análisis estadístico de las pruebas de uniformidad.

			Rango intercuartil				Intervalo de confianza		
Mediana	Media	Desviacion estandar	Q1	Q3	IQR	Coeficiente de variación	Límite inferior	Límite superior	Error estandar
0.50285	0.50266286	0.0033916	0.4998	0.505225	0.005425	0.67472653	0.50186832	0.50345739	0.00040537

Conclusiones.

El presente estudio logró desarrollar y validar un phantom de tejido muscular utilizando una mezcla, con el objetivo de simular propiedades acústicas similares a las del músculo humano. El diseño experimental permitió establecer proporciones precisas de los componentes, garantizando una atenuación adecuada para pruebas de calibración en equipos de ultrasonido.

Además, se diseñó un software en Python que facilita el análisis digital de imágenes médicas en formato DICOM. Esta herramienta permite calcular parámetros fundamentales como el coeficiente de atenuación, resolución espacial y distancias anatómicas, todo a través de una interfaz gráfica intuitiva. Su integración con técnicas de procesamiento de imágenes como el filtrado gaussiano y la segmentación automatizada contribuyó significativamente a la caracterización precisa del phantom.

Las pruebas realizadas, incluyendo más de 70 adquisiciones de imagen y el análisis estadístico correspondiente, demostraron que el phantom presenta una alta uniformidad en sus propiedades acústicas. Los resultados reflejan baja

dispersión, ausencia de valores atípicos y una alta confiabilidad en las mediciones obtenidas, lo que valida su uso como herramienta de calibración.

Este trabajo ofrece una alternativa accesible y funcional para laboratorios de enseñanza e investigación en ultrasonido, promoviendo el uso de phantoms caseros de alta precisión junto con soluciones digitales de análisis. Se recomienda continuar con pruebas en diferentes frecuencias y la expansión del software para incluir nuevas funcionalidades, como la comparación automática entre imágenes y la exportación de métricas adicionales.

Créditos.

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Chiapas por el apoyo de las instalaciones para realizar el presente proyecto. A la maestra Edith Ponce Recinos por su valioso apoyo en el CIDTER. A la doctora Tanya Champo Nieto por su valiosa colaboración en el uso del equipo de ultrasonido que fue de gran importancia para el desarrollo del proyecto.

Referencias bibliográficas.

American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM). (2021). *Medical Ultrasound Safety*. Recuperado de https://www.aium.org.

Brown, S. L., Nesse, R. M., Vinokur, A. D., & Smith, D. M. (2003). Providing social support may be more beneficial than receiving it. *Psychological Science*, 14(4), 320-327. https://doi.org/10.1111/1467-9280.14461.

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4ta ed.). Pearson Education.

Hendee, W. R., & Ritenour, E. R. (2002). *Medical Imaging Physics*. https://doi.org/10.1002/0471221155.

International Electrotechnical Commission (IEC). (2013). *IEC 61161: Ultrasonics — Power measurement — Radiation force balances and performance requirements*. Ginebra, Suiza: IEC.

National Electrical Manufacturers Association (NEMA). (2023). *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) Standard*. Recuperado de https://www.dicomstandard.org.

Szabo, T. L. (2004). *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*. Elsevier Academic Press.

Teirlinck, C. J. P. M., Bezemer, R. A., Kollmann, C., et al. (1998). Development of an example flow test object and comparison of five of these test objects, constructed in various laboratories. *Ultrasound in Medicine & Biology, 24*(1), 135–153. https://doi.org/10.1016/s0041-624x(97)00150-9.

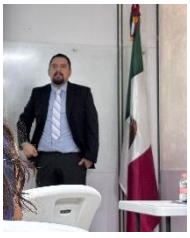
What are imaging phantoms? | NIST. (2024, 24 enero). NIST. https://www.nist.gov/health/what-are-imaging-phantoms#:~:text=In%20the%20biomedical%20research%20community,human%20body%20are%20operating%20correctly.

Información de los autores.

Fredy Ocelotl Rodríguez López estudiante de la carrera de ingeniería biomédica en la universidad politécnica de Chiapas.

César Gabriel Cigarroa Durán, estudiante de la carrera de ingeniería biomédica en la universidad politécnica de Chiapas

Eglaín Constantino Cortés es profesor y líder de la Academia de Ciencia Básica del programa de Ingeniería Biomédica de la Universidad Politécnica de Chiapas; Físico Médico, Encargado de Seguridad Radiológica y Secretario Técnico del Comité Hospitalario de Seguridad Radiológica del Hospital de Especialidades Pediátricas-IMSS-BIENESTAR, Asesor de Seguridad Radiológica para empresas particulares.eglaincc@hotmail.com.



Jorge Alberto Rodríguez Ramírez, Ingeniero Biomédico por la Universidad Politécnica de Chiapas, cuenta con Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Bioelectrónica, asimismo con el Doctorado en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Bioelectrónica. Forma parte del grupo académico de docencia en la Universidad Politécnica de Chiapas. Su área de especialidad es la bioinstrumentación y el uso de ultrasonido terapéutico en tejido vivo.

Desarrollo e implementación de ambientes virtuales para la difusión turística del patrimonio cultural de Campeche.

Development and implementation of virtual environments for the touristic dissemination of Campeche's cultural heritage.

Francisco Jesús Kantún Hernández* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega.
francisco.kantun@itsescarcega.edu.mx.

Damián Uriel Rosado Castellanos (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega,
damianrc@itsescarcega.edu.mx.

Ivette Stephany Pacheco Farfán (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega,
ipacheo@itsescarcega.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en junio 04, 2025; aceptado en junio 21, 2025.

Resumen.

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de ambientes virtuales orientados a la promoción turística del patrimonio cultural del estado de Campeche. A partir de modelos tridimensionales previamente diseñados en la primera fase del proyecto, se construyó una plataforma digital basada en Joomla , que permite la visualización interactiva de cuatro sitios emblemáticos: Edzná, la Catedral de Campeche, el Fuerte de San José el Alto y la Puerta de Mar. Los modelos fueron texturizados con materiales reales y empaquetados en formato FBX para su descarga, integrándose en un entorno web mediante tecnología WebGL a través de Spline. Además, se implementaron funciones de retroalimentación como la calificación con estrellas y el registro de visitas. Esta plataforma busca ampliar el acceso al patrimonio mediante experiencias inmersivas accesibles desde cualquier navegador, favoreciendo tanto la difusión cultural como el interés turístico. El proyecto constituye un ejemplo replicable de aplicación tecnológica con fines educativos, turísticos y de preservación patrimonial.

Palabras clave: Ambientes virtuales, modelado 3D, patrimonio cultural, tecnologías web, turismo digital.

Abstract.

This article presents the development and implementation of virtual environments aimed at promoting the cultural heritage of the state of Campeche through tourism. Building on the 3D models created during the project's initial design phase, a digital platform was developed using Joomla, enabling interactive visualization of four iconic sites: Edzná, Campeche Cathedral, San José Fort, and the Sea Gate. The models were textured with real materials and exported in FBX format for download, and integrated into a web-based environment via WebGL using Spline. Additional features, such as star rating and visitor tracking, were implemented to enhance user engagement. This platform aims to expand access to heritage through immersive experiences available via any web browser, supporting cultural dissemination and tourism promotion. The project stands as a replicable model of technological application for educational, touristic, and heritage preservation purposes.

Keywords: 3D modeling, cultural heritage, digital tourism, virtual environments, web technologies.

1. Introducción.

En las últimas décadas, las tecnologías digitales han transformado significativamente la manera en que se preserva, comunica y experimenta el patrimonio cultural. Entre estas herramientas, los ambientes virtuales interactivos destacan por su capacidad para reproducir espacios patrimoniales de manera accesible, realista e inmersiva, permitiendo a los usuarios explorar sitios de valor histórico sin requerir presencia física (Siddiqui et al., 2022). Esta evolución tecnológica ha generado nuevas oportunidades para el sector turístico, que cada vez más incorpora entornos virtuales en sus estrategias de promoción y difusión cultural (Komianos et al., 2024).

Particularmente, el uso de tecnologías web como WebGL, junto con plataformas de gestión de contenidos como Joomla y motores de visualización 3D como Spline, ha facilitado el desarrollo de sistemas accesibles desde cualquier navegador. Estas herramientas permiten la integración de modelos tridimensionales en sitios web institucionales, comerciales o educativos, sin estar limitadas a un entorno específico (Gaspari et al., 2023). Esto amplía las posibilidades de acceso y replicación, tanto para usuarios como para desarrolladores que buscan vincular turismo, educación y preservación digital del patrimonio.

El estado de Campeche, ubicado en el sureste de México, posee una riqueza arquitectónica y arqueológica significativa. En 2019, la ciudad de San Francisco de Campeche recibió aproximadamente 1.3 millones de visitantes, de los cuales el 82 % eran nacionales (Magaña Valencia et al., 2023). A nivel nacional, durante ese mismo periodo, se reportó la llegada de más de 3.5 millones de turistas internacionales, lo que representó un incremento del 4.3 % respecto al año anterior, de acuerdo con datos del INEGI y el Banco de México (INEGI & BANXICO, 2019). Estos indicadores reflejan tanto el interés creciente por el turismo patrimonial como la necesidad de consolidar nuevas formas de acceso digital a estos espacios.

Diversos estudios destacan que la implementación de tecnologías virtuales no solo mejora la experiencia del visitante, sino que también puede contribuir a la sostenibilidad cultural de los sitios arqueológicos y patrimoniales, especialmente en contextos donde la conservación física es limitada o el acceso presencial está restringido (Ambrosio Arias et al., 2020). En este sentido, la virtualización de destinos turísticos se plantea como una estrategia replicable que puede adaptarse a múltiples plataformas tecnológicas y contextos institucionales.

En este escenario, se diseñó y desarrolló una plataforma digital interactiva orientada a la difusión del patrimonio turístico y cultural del estado de Campeche. El proyecto integra modelos tridimensionales texturizados de cuatro sitios emblemáticos: la zona arqueológica de Edzná, la Catedral de Campeche, el Fuerte de San José el Alto y la Puerta de Mar. Para la creación de estos modelos se empleó el software de código abierto Blender, una herramienta profesional de modelado, texturizado y animación 3D ampliamente utilizada en los sectores educativo, artístico y de ingeniería (Blender Foundation, s. f.). Esta elección permitió garantizar calidad visual y compatibilidad técnica, además de fomentar el uso de tecnologías accesibles en entornos académicos.

Una vez desarrollados y empaquetados en formato FBX, los modelos fueron integrados mediante Spline, un motor de visualización WebGL, lo que permitió su despliegue en una plataforma navegable directamente desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Aunque la instancia actual está alojada en el sitio institucional del Tecnológico Nacional de México, campus Escárcega, el sistema ha sido concebido para ser fácilmente replicable en otros gestores de contenido y contextos tecnológicos.

Como parte del desarrollo, se incorporaron funcionalidades adicionales que enriquecen la experiencia del usuario, tales como un calificador de estrellas y un registro de visitas. Estas herramientas no solo fomentan la interacción, sino que ofrecen datos útiles para futuras evaluaciones de impacto y usabilidad. Así, se busca crear un entorno inmersivo y educativo, orientado tanto a la promoción turística como a la conservación digital del patrimonio.

El objetivo principal de este artículo es documentar el proceso técnico de desarrollo e implementación de dicha plataforma, detallando los métodos utilizados, los recursos tecnológicos empleados y las decisiones de diseño adoptadas. Asimismo, se busca analizar su alcance como recurso digital para la promoción turística, su potencial educativo y su viabilidad como modelo replicable en otras regiones con patrimonio cultural significativo.

2. Métodos.

El desarrollo de la plataforma digital para la difusión turística del patrimonio cultural de Campeche se llevó a cabo mediante un enfoque de **desarrollo secuencial estructurado**, basado en el **modelo en cascada** (Waterfall model). Este modelo fue elegido por su claridad en la definición de fases y entregables, lo cual resulta adecuado cuando los requisitos funcionales y técnicos están previamente establecidos y es necesario asegurar un control riguroso en cada etapa del proyecto (Sommerville, 2011).

El modelo en cascada permite dividir el proceso en etapas consecutivas y no superpuestas: análisis de requisitos, diseño del sistema, implementación, pruebas, despliegue y mantenimiento. Cada una de estas fases fue aplicada estrictamente para garantizar la calidad técnica, la compatibilidad tecnológica y la claridad documental del proceso.

Esta metodología se complementa con las observaciones de Saravanos y Curinga (2023), quienes destacan que, a través de simulaciones aplicadas al ciclo de vida de software, el modelo en cascada sigue siendo efectivo en entornos donde el alcance y los objetivos del sistema están bien definidos desde el inicio. En el presente proyecto, esta estructura permitió organizar las tareas de modelado 3D, integración WebGL, construcción de la interfaz web y habilitación de herramientas de interacción como el calificador de estrellas y el registro de visitas.

Figura 1. Modelo de Cascada.

Análisis de requisitos.

La primera etapa del proyecto se centró en la identificación y definición de los requisitos funcionales y técnicos necesarios para la construcción de la plataforma digital. Dado que el objetivo era crear un entorno virtual accesible, interactivo y educativo para promover el patrimonio turístico de Campeche, se establecieron como criterios esenciales:

- Accesibilidad desde navegadores web sin necesidad de instalación de software adicional.
- Visualización inmersiva e intuitiva de modelos 3D de sitios patrimoniales (Edzná, Catedral, Fuerte San José y Puerta de Mar).
- Inclusión de herramientas de interacción como calificador por estrellas y contador de visitas.
- Posibilidad de descarga de los modelos 3D en formato FBX para su reutilización.
- Alojamiento en un entorno estable y con dominio institucional verificable.

En este análisis también se contempló el uso de tecnologías interoperables y de código abierto, como **Blender** para modelado 3D, **Spline** para visualización en WebGL, y **Joomla** como sistema de gestión de contenidos. La elección de estas tecnologías se fundamentó tanto en su estabilidad como en la disponibilidad de soporte comunitario, documentación técnica y compatibilidad con navegadores modernos.

Para garantizar la viabilidad técnica y funcional de la plataforma, se realizó un análisis detallado de los requisitos necesarios. Estos fueron organizados en tres categorías: funcionales, no funcionales y técnicos. Los requisitos funcionales se centraron en las capacidades interactivas del sistema, como la visualización de modelos 3D y la interacción del usuario mediante calificaciones y conteo de visitas. Por su parte, los requisitos no funcionales abordaron la compatibilidad del sistema con diferentes dispositivos y navegadores, priorizando el acceso sin plugins adicionales. Finalmente, los requisitos técnicos definieron el uso de tecnologías específicas para asegurar la interoperabilidad y el rendimiento. La siguiente tabla resume dichos requisitos:

Tabla 1. Clasificación de los requisitos funcionales, no funcionales y técnicos de la plataforma digital.

Tipo de requisito	Descripción
Funcional	Visualización de modelos 3D interactivos (FBX)
Funcional	Calificación por estrellas
Funcional	Registro automático de visitas
No funcional	Acceso desde navegador sin plugins
No funcional	Compatibilidad multiplataforma (móvil/escritorio)
Técnico	Integración con Spline (WebGL)
Técnico	Modelado en Blender
Técnico	Alojamiento en Joomla 5 en dominio institucional

Diseño del sistema.

Una vez establecidos los requisitos funcionales, no funcionales y técnicos, la segunda fase del modelo en cascada consistió en el diseño detallado de la arquitectura de la plataforma. Esta etapa tuvo como finalidad definir la estructura lógica, visual y operativa del sistema, garantizando una base sólida para su posterior implementación.

El diseño se organizó en tres niveles:

1. **Arquitectura general del sistema**:
   Se estableció una arquitectura cliente-servidor donde los modelos 3D alojados en un hosting institucional pueden ser accedidos desde cualquier dispositivo mediante un navegador web. Para ello, se utilizó Joomla como gestor de contenido, facilitando la administración modular del sitio, y se integró Spline como motor de renderizado WebGL para los modelos tridimensionales.
2. **Diseño de la interfaz de usuario (UI)**:
   Se optó por una interfaz limpia y responsiva, desarrollada con tecnologías web estándar como HTML5, CSS3 y JavaScript. El diseño priorizó la experiencia del usuario mediante botones accesibles, navegación intuitiva y una disposición jerárquica de los contenidos. Se incorporaron pestañas de navegación para explorar cada modelo y textos informativos con fuentes verificables sobre los sitios patrimoniales.
3. **Componentes funcionales**:
   Se diseñaron e integraron dos módulos interactivos clave:
   - **Calificador de estrellas**, que permite valorar la experiencia en cada sitio virtual.
   - **Contador de visitas**, que registra el número de accesos por día sin duplicar vistas por sesión, utilizando almacenamiento local del navegador.

Estas decisiones de diseño no solo responden a los requisitos iniciales, sino que también aseguran la escalabilidad del proyecto para futuras incorporaciones de más sitios o funcionalidades. El enfoque modular adoptado permite que nuevos modelos, datos o secciones puedan ser añadidos sin alterar la estructura principal.

Implementación del sistema.

La fase de implementación correspondió a la ejecución técnica de los elementos planificados en las etapas anteriores. En este proceso se concretó la integración de modelos 3D de los lugares seleccionados de Campeche, el desarrollo de la interfaz web interactiva y la incorporación de funcionalidades que permiten evaluar el impacto y la usabilidad del entorno.

Incorporación de modelos 3D mediante Blender.

Los modelos tridimensionales de los cuatro sitios seleccionados (Edzná, Catedral de Campeche, Fuerte de San José el Alto y Puerta de Mar) fueron desarrollados utilizando **Blender**, un software libre de código abierto ampliamente utilizado en el ámbito profesional del modelado y animación 3D. Se aplicaron texturas optimizadas y se cuidó la representación geométrica para lograr un balance entre fidelidad visual y rendimiento web. Cada modelo fue exportado en formato **FBX**, conservando materiales, coordenadas UV y dimensiones escalares.

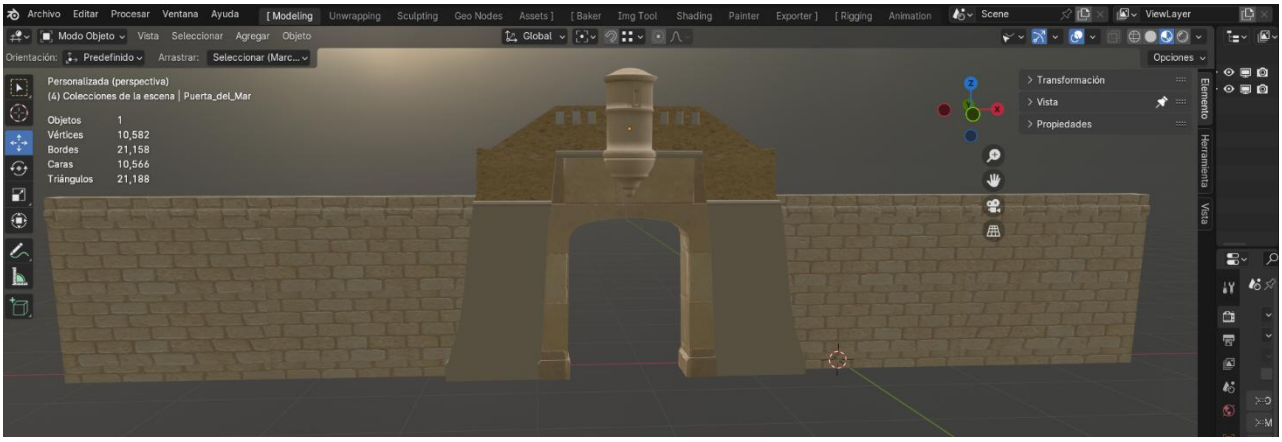


Figura 2. Modelado 3D de la Puerta de Mar en Blender, con texturas aplicadas y configuración para exportación en formato FBX.

Visualización inmersiva en Spline (WebGL).

Los modelos exportados se integraron en **Spline**, un motor visual compatible con WebGL que permite crear experiencias tridimensionales interactivas. Esta herramienta fue seleccionada por su capacidad de renderizado eficiente, su compatibilidad con navegadores modernos y la facilidad para insertar escenas directamente en páginas web a través de iframes.

En cada escena, se configuró la iluminación, los controles de cámara y la interacción básica (rotación, zoom, desplazamiento) para que el visitante pudiera explorar los sitios seleccionados de forma fluida desde cualquier dispositivo.

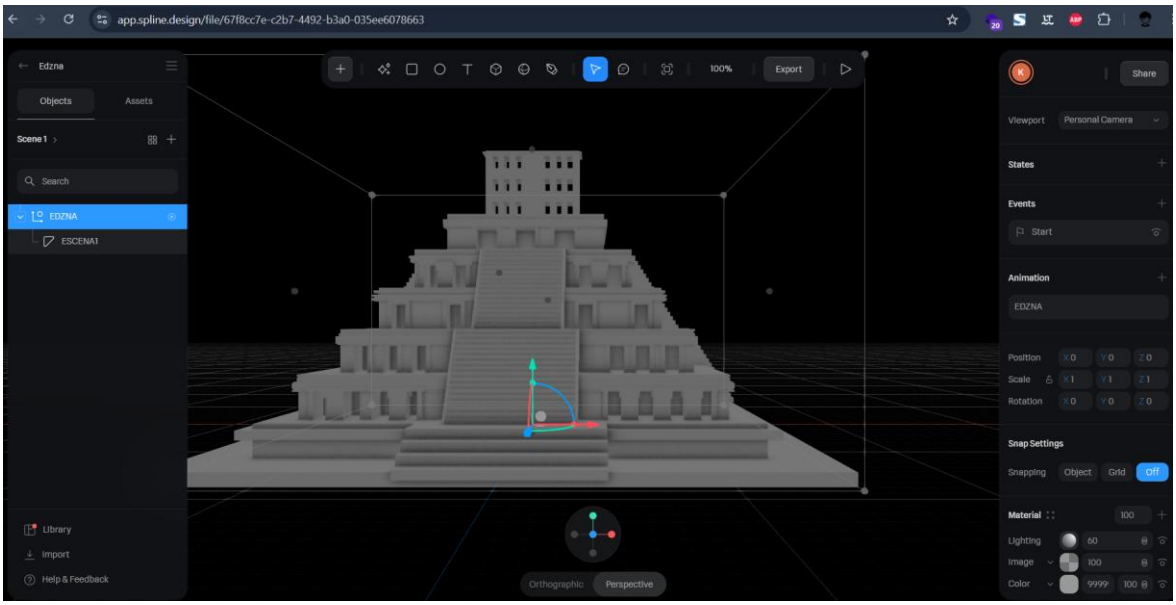


Figura 3. Integración del modelo 3D de Edzná en el motor Spline, visualizado en entorno WebGL con navegación interactiva.

Desarrollo de la plataforma web y funcionalidad.

Una vez construidos los escenarios tridimensionales, estos fueron embebidos en páginas web gestionadas desde **Joomla 5**, un sistema de gestión de contenidos (CMS) modular que permitió estructurar el sitio institucional. Se utilizaron tecnologías estándar como **HTML5**, **CSS3** y **JavaScript**, junto con scripts en **PHP** para el manejo del calificador de estrellas y el conteo de visitas por sesión.

El sitio fue diseñado para ofrecer navegación por pestañas, permitiendo al usuario acceder a cada lugar modelado desde una vista específica. Junto a cada modelo, se desplegaron textos descriptivos con información histórica obtenida de fuentes verificables y enlaces a entidades culturales oficiales.

Además, se programaron dos módulos clave:

- **Calificador de estrellas**: que almacena valoraciones anónimas de los usuarios.
- **Registro de visitas**: que cuenta accesos únicos utilizando almacenamiento local para evitar duplicidades.

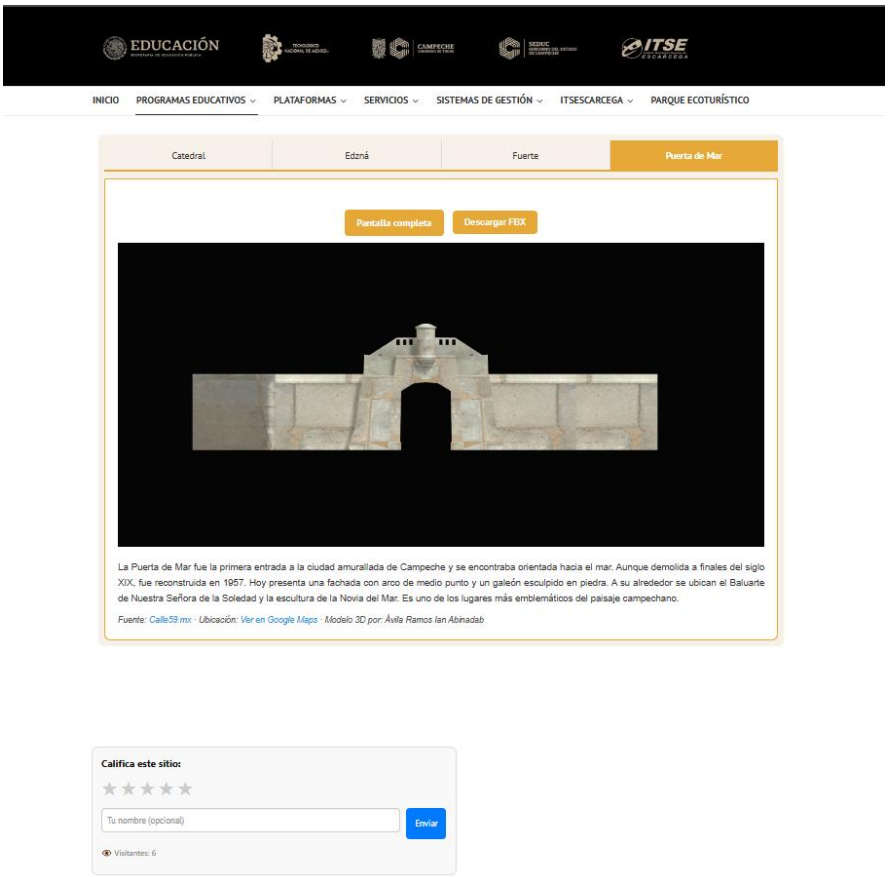


Figura 4. Interfaz web final en Joomla con navegación por pestañas, calificador de estrellas y contador de visitas, junto al modelo 3D renderizado.

Esta implementación permitió consolidar una plataforma funcional, accesible y replicable, lista para ser evaluada en cuanto a su usabilidad, alcance y utilidad como herramienta de promoción digital.

Pruebas y validación del sistema.

La fase de pruebas tuvo como propósito verificar el correcto funcionamiento de todos los componentes desarrollados e identificar posibles errores en el despliegue web de los modelos 3D y los módulos interactivos. Se realizaron pruebas funcionales, de compatibilidad y de rendimiento sobre distintos dispositivos y navegadores, siguiendo un enfoque de caja negra basado en los requisitos definidos previamente.

Las pruebas funcionales incluyeron la correcta carga de los modelos FBX mediante Spline, la navegación por pestañas, la interacción con el calificador de estrellas, el contador de visitas y la descarga de modelos. En cuanto a compatibilidad, se probó el sitio en navegadores como Chrome y Firefox, tanto en versión de escritorio como móvil. También se validó el comportamiento del sitio ante distintos anchos de pantalla, verificando su adaptabilidad y legibilidad.

La siguiente tabla resume los principales escenarios de prueba y sus resultados:

Tabla 2. Resultados de pruebas funcionales y de compatibilidad.

Escenario de prueba	Resultado esperado	Resultado obtenido
Carga de modelos FBX en todos los tabs	Renderizado correcto y sin errores en cada pestaña	Correcto
Funcionamiento del calificador de estrellas	Almacenar valoración sin necesidad de autenticación	Correcto
Registro de visitas por sesión	Registrar una sola visita por usuario/sesión	Correcto
Visualización en Chrome y Firefox (PC/móvil)	Interfaz adaptada y navegación funcional	Correcto
Adaptación a distintos tamaños de pantalla	Elementos reorganizados sin pérdida de funcionalidad	Correcto
Descarga de modelos 3D (FBX)	El archivo se descarga correctamente y es funcional	Correcto

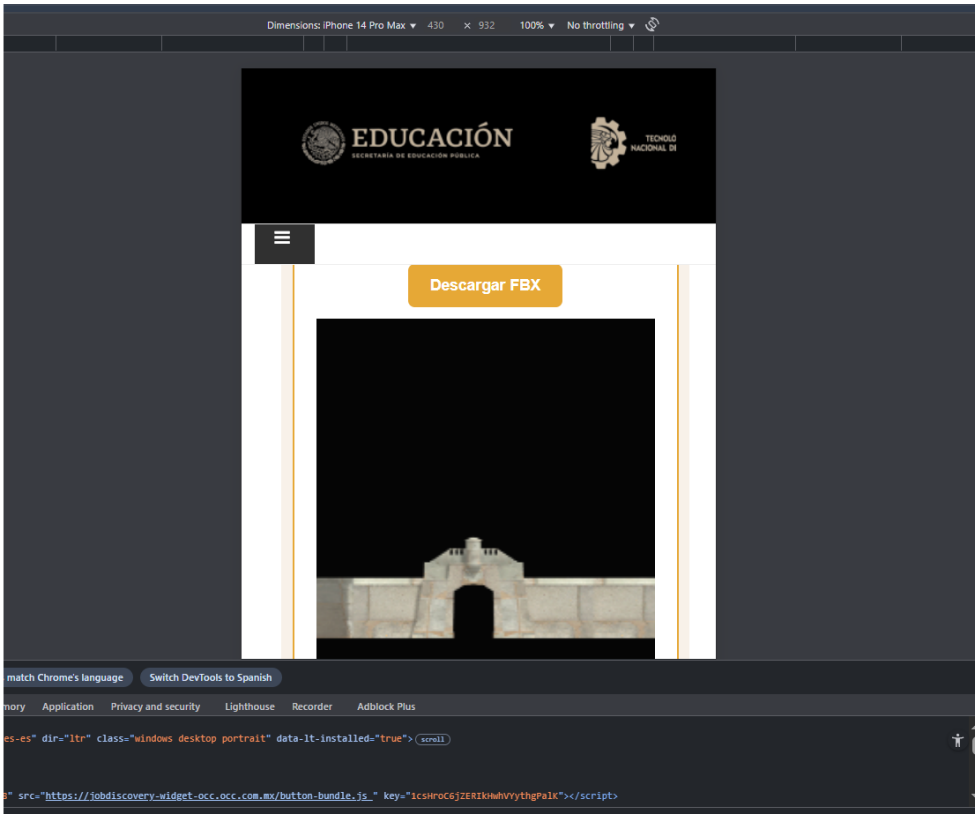


Figura 5. Captura de prueba en dispositivo móvil mostrando correcta adaptación de los modelos 3D y botones interactivos.

Las pruebas confirmaron que la plataforma es funcional, multiplataforma y accesible. Además, se verificó que los archivos FBX pueden descargarse correctamente y abrirse en software compatible como Blender, asegurando su reutilización por parte de usuarios interesados en fines educativos, técnicos o turísticos.

Mantenimiento y escalabilidad.

Una vez implementada la plataforma y validadas sus funcionalidades, se procedió a establecer una estrategia de mantenimiento orientada a garantizar su operatividad a largo plazo y facilitar futuras actualizaciones. Esta fase contempla tareas de mantenimiento preventivo, correctivo y evolutivo.

En cuanto al mantenimiento preventivo, se planificaron revisiones periódicas del rendimiento del sitio, de la visualización de los modelos 3D y de los scripts asociados a los módulos interactivos, como el calificador de estrellas y el contador de visitas. Estas revisiones buscan anticipar posibles fallos por obsolescencia tecnológica, garantizar la compatibilidad con navegadores modernos y asegurar la accesibilidad desde diferentes dispositivos.

Para el mantenimiento correctivo, se activó el sistema de depuración integrado en Joomla, lo que permitió monitorear el tiempo de carga de los distintos componentes del sitio y detectar cualquier comportamiento anómalo. La Figura 6 muestra el análisis de una sesión real, donde se confirma que la carga total del sitio es eficiente (aproximadamente 200 ms), incluyendo la visualización de escenas interactivas desarrolladas en Spline. Esta herramienta permite identificar con precisión los componentes que puedan generar retrasos o conflictos en el futuro.

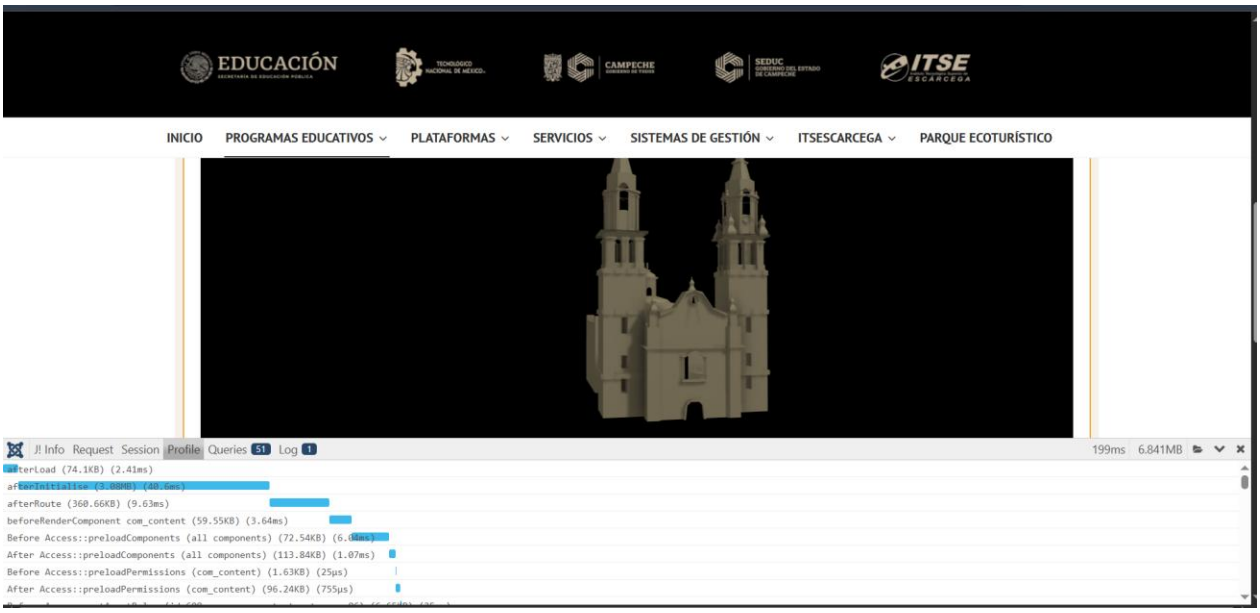


Figura 6. Vista del panel de depuración de Joomla mostrando tiempos de carga y ejecución de scripts en el entorno web del proyecto.

En cuanto al mantenimiento evolutivo, la plataforma fue diseñada con una estructura modular que facilita la adición de nuevos modelos 3D, contenido histórico o funcionalidades interactivas sin necesidad de reestructurar el sitio completo. El uso de tecnologías de código abierto como Blender, Spline y Joomla garantiza una alta disponibilidad de soporte, actualizaciones continuas y compatibilidad con futuras extensiones. Esto permite escalar la solución hacia otros sitios turísticos del estado de Campeche o incluso replicarla en proyectos similares a nivel regional o nacional.

La base técnica y estructural lograda en este proyecto posiciona a la plataforma no solo como una herramienta funcional, sino como un entorno digital sostenible, flexible y apto para su uso académico, turístico o institucional.

Conclusiones.

El desarrollo e implementación de una plataforma digital interactiva con modelos 3D de sitios representativos de Campeche demuestra que es posible generar soluciones tecnológicas viables y sostenibles para la difusión del patrimonio local. La adopción de una metodología estructurada, como el modelo en cascada, permitió organizar y ejecutar con claridad cada una de las etapas del proyecto, desde la definición de requisitos, el modelado tridimensional en Blender, la integración con Spline para la visualización WebGL, hasta el despliegue funcional dentro de un entorno Joomla 5. Todo ello culminó en un sistema accesible desde cualquier navegador web, sin necesidad de instalación adicional.

A nivel técnico, la plataforma cumple con los objetivos de accesibilidad, interacción y descarga libre de los modelos. Los usuarios pueden recorrer virtualmente espacios significativos como Edzná, la Catedral de Campeche, el Fuerte de San José El Alto y la Puerta de Mar, con la posibilidad de calificar su experiencia e incluso reutilizar los modelos descargables para fines educativos. La integración de estas funcionalidades refuerza el valor de la herramienta como recurso dinámico y no estático, capaz de adaptarse a contextos formativos, turísticos o de divulgación cultural.

Pero más allá de su funcionamiento técnico, este trabajo representa una apuesta por el uso de la tecnología como puente entre la ciudadanía y su entorno histórico. En un momento donde la digitalización puede marcar la diferencia entre lo accesible y lo olvidado, iniciativas como esta buscan acercar el conocimiento, incentivar la exploración y fomentar el respeto por el legado cultural. En este sentido, el proyecto se concibe como un aporte inicial, un modelo replicable que puede escalarse a otros lugares y realidades similares.

Además, esta iniciativa se alinea con los esfuerzos institucionales del Tecnológico Nacional de México campus Escárcega, que no solo brindó el espacio para alojar el sitio web, sino que permitió articular tecnología, formación profesional y compromiso regional en un solo producto digital. La plataforma puede consultarse desde el sitio institucional a través del siguiente enlace: https://escarcega.tecnm.mx/index.php/programas-educativas/ingenieria-en-animacion-digital-y-efectos-visuales/3d-campeche

A futuro, se plantea como deseable seguir fortaleciendo este tipo de desarrollos desde el ámbito académico, integrando nuevas tecnologías emergentes como la realidad aumentada o la inteligencia artificial para enriquecer la experiencia del usuario. No obstante, el mayor valor de esta experiencia radica en haber demostrado que, incluso con recursos limitados, es posible construir herramientas digitales significativas que dejen una huella y contribuyan a preservar y difundir aquello que forma parte de nuestra historia compartida.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de Escárcega por las facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto.

Referencias bibliográficas.

Ambrosio Arias, A. G., Moreno Escobar, J. J., Tejeida Padilla, R., & Morales Matamoros, O. (2020). Historical-cultural sustainability model for archaeological sites in Mexico using virtual technologies. *Sustainability, 12*(18), 7337. https://doi.org/10.3390/su12187337

Blender Foundation. (s. f.). *Home of the Blender project – Free and open source 3D creation suite*. https://www.blender.org/

Gaspari, F., Ioli, F., Barbieri, F., Rivieri, C., & Dondi, M. (2023). Rediscovering cultural heritage sites by interactive 3D exploration: A practical review of open-source WebGL tools. *International Archives of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-2, 661–668. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-661-2023

INEGI, & BANXICO. (2019). *Llegada de turistas internacionales en enero 2019 fue de 3.5 millones, un incremento de 4.3 % respecto a 2018*. Datatur RAT-2019-01. Secretaría de Turismo – Gobierno de México. https://www.datatur.sectur.gob.mx/RAT/RAT-2019-01%28ES%29.pdf

Komianos, V., Tsipis, A., & Kontopanagou, K. (2024). Introducing digitized cultural heritage to wider audiences by employing virtual and augmented reality experiences: The case of the v-Corfu project. *Technologies, 12*(10), 196. https://doi.org/10.3390/technologies12100196

Magaña Valencia, K. G., López Caamal, M. E., Ruíz de Chávez Figueroa, M. C., Muñoz González, D. A., & Cauich Uicab, M. C. (2023). El posicionamiento de servicios turísticos de San Francisco de Campeche y sus relaciones de consumo. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 5*(1), 926–945. https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1643

Saravanos, A., & Curinga, M. X. (2023). Simulating the software development lifecycle: The waterfall model. Applied System Innovation, 6(6), 108. https://doi.org/10.3390/asi6060108

Siddiqui, M. S., Syed, T. A., Al Hassan, A. N., & Nawaz, W. (2022). Virtual tourism and digital heritage: An analysis of VR/AR technologies and applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13*(7), 1–9. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130739

Sommerville, I. (2011). Software engineering (9.ª ed.). Pearson Education.

Información de los autores.

Francisco Jesús Kantún Hernández. Ingeniero en Sistemas Computacionales con especialidad en Tecnologías de la Información, estudiante de la Maestría en Diseño y Gestión de Proyectos Tecnológicos. Se desempeña como docente y presidente de academia de la Ingeniería en Animación Digital y Efectos Visuales en el Instituto Tecnológico Superior de Escárcega. Colaborador de la Línea de Investigación de Ingeniería de Software.

Damián Uriel Rosado Castellanos. Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Campeche en 2017. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Computación por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 2019. Profesor Investigador de la Línea de Investigación de Ingeniería de Software de la Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México campus Escárcega. Fundador de la empresa DensCode de Escárcega,

Campeche. Desarrollador del sistema de trayectoria escolar del Instituto Tecnológico Superior de Escárcega. Ha participado como asesor del Evento Nacional Estudiantil de Innovación Tecnológica.

Ivette Stephany Pacheco Farfán. Ingeniero en Sistemas Computacionales por la Universidad Autónoma de Campeche (2008) con Maestría en Informática de la Universidad Hispanoamericana (2017) y actualmente es estudiante de Doctorado en Proyectos por la Universidad Internacional Iberoamericana. Docente Investigador del Instituto Tecnológico Nacional de México campus Escárcega de la Ingeniería en Sistemas Computacionales. En el 2018 obtuvo el reconocimiento como Docente con Perfil Deseable por el Programa de Desarrollo Profesional Docente. Líder de la Línea de Investigación de Ingeniería de Software. Ha participado en diversos congresos con exposición de carteles científicos y ponencias nacionales e internacionales. Asesor de proyectos del Evento Nacional Estudiantil de Innovación Tecnológica y la Feria Nacional de Ciencias.

Desinfección con lámpara UVC usando robot móvil omnidireccional.

Disinfection with UVC lamp using omnidirectional mobile robot.

Álvaro Hernández Sol (1).
Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.
alvaro.hs@tuxtla.tecnm.mx.

Simei Ibar José de la Cruz* (2). Estudiante del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.
L19270675@tuxtla.tecnm.mx.

Raúl Moreno Rincón (3). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, raull.mr@tuxtla.tecnm.mx.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (4). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Herrera Galicia (5). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, ruben.hg@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 17, 2025; aceptado en diciembre 18, 2025.

Resumen.

Este artículo presenta el proceso utilizado en la desinfección de espacios cerrados mediante el robot móvil omnidireccional "LUMUSVOT". Se programó en el robot las rutinas necesarias para realizar la desinfección en áreas de baja, media y alta contaminación con patógenos activos (Bacterias, Virus y hongos). El prototipo de robot móvil presenta como ventaja principal una estructura mecánica sólida y eficiente para manejar de manera segura una lámpara UVC de 40W Las pruebas de desinfección se llevaron a cabo en negocios, consultorios médicos, laboratorios clínicos y salones de escuelas tanto de la ciudad e Tuxtla Gutiérrez, San Cristóbal, San Fernando y Ocozocoautla.

Palabras claves: Bacterias, desinfección, hongos, lámpara UVC, omnidireccional, virus.

Abstract.

This article presents the process used for disinfecting enclosed spaces using the omnidirectional mobile robot "LUMUSVOT." The robot was programmed with the necessary routines to perform disinfection in areas with low, medium, and high levels of contamination with active pathogens (bacteria, viruses, and fungi). The mobile robot prototype's main advantage is its solid and efficient mechanical structure for safely handling the 38W UVC lamp. Disinfection tests were carried out in businesses, medical offices, clinical laboratories, and school classrooms in the cities of Tuxtla Gutiérrez, San Cristóbal, San Fernando, and Ocozocoautla.

Keywords: Bacteria, disinfection, fungi, omnidirectional, UVC lamp, viruses.

1. Introducción.

Derivado de la pandemia del COVID19 que sufrió el mundo, la limpieza y desinfección de superficies y ambientes interiores se ha convertido parte importante de la salud pública (Motta-Ávila et al., 2022). Los microorganismos patógenos tienen la capacidad de transmitirse tanto por el aire como por contacto con superficies contaminadas, lo que resalta la necesidad de métodos de esterilización altamente efectivos, especialmente en entornos de alto riesgo como hospitales y centros de salud (Ordoñez-García et al., 2021).

La presencia de microorganismos patógenos, incluyendo virus, bacterias y hongos, en superficies y en el ambiente, representa un riesgo significativo para la salud pública. Estos agentes pueden ser responsables de la propagación de enfermedades infecciosas, tanto en entornos clínicos como comunitarios. La implementación de protocolos de limpieza y desinfección rigurosos es una medida fundamental en el control de infecciones, con el objetivo de reducir la carga microbiana a niveles seguros (Jiménez-Rojas, 2021; Mollik, 2019).

En entornos de atención médica, como hospitales, laboratorios clínicos y consultorios, la desinfección es crucial para prevenir las infecciones asociadas a la atención de salud (IAAS) o nosocomiales, que constituyen un problema de salud pública a nivel global (Acosta, 2005; Jiménez-Rojas, 2021). Las guías de práctica clínica establecen que el mantenimiento de la higiene ambiental y la desinfección adecuada del instrumental y las superficies son pilares para garantizar la seguridad del paciente y del personal de salud.

Más allá del ámbito clínico, la desinfección efectiva cobra relevancia en espacios de alta concurrencia como oficinas y salones de clases, donde la proximidad física y el uso compartido de superficies de alto contacto pueden facilitar la transmisión de patógenos respiratorios y gastrointestinales. La selección de agentes desinfectantes debe basarse en su eficacia comprobada contra diversos microorganismos, su compatibilidad con las superficies y la seguridad para los usuarios, siguiendo las indicaciones del fabricante respecto a la concentración y el tiempo de contacto para asegurar su efectividad.

El objetivo principal de la desinfección es eliminar o inactivar la mayoría de los microorganismos patógenos en superficies y objetos inanimados, reduciendo así la carga microbiana a niveles seguros y previniendo la propagación de infecciones. Se tiene que en los Entornos de atención médica (hospitales, laboratorios clínicos y consultorios) son los lugares donde se presentan altos riesgo biológico debido a la concentración de pacientes con diversas patologías y la manipulación de muestras potencialmente infecciosas. Una desinfección rigurosa es crucial para prevenir las infecciones nosocomiales o asociadas a la atención de salud (IAAS) y garantizar la fiabilidad de los resultados de laboratorio. Mientras que en los entornos no clínicos (oficinas y salones de clases) se consideran de menor riesgo que los entornos clínicos, siguen siendo lugares donde virus y bacterias pueden propagarse rápidamente a través de superficies de contacto frecuente, como pomos de puertas, teclados o mesas. La desinfección adecuada en estos espacios puede disminuir la propagación de enfermedades comunes hasta en un 70%.

Es esencial comprender que la desinfección difiere de la limpieza. La **limpieza**, que debe realizarse siempre antes de desinfectar, se centra en eliminar la suciedad y la materia orgánica (polvo, líquidos corporales). La suciedad puede inactivar los desinfectantes, por lo que la limpieza previa es un paso imprescindible para la eficacia del proceso de desinfección.

La selección del agente desinfectante (hipoclorito de sodio, alcohol al 70%, etc.) y el nivel de desinfección (bajo, intermedio o alto) dependerán del tipo de superficie, el nivel de riesgo del área y el tipo de patógeno a combatir, ya que no todos los desinfectantes eliminan las esporas bacterianas. En respuesta a estas limitaciones, la tecnología de luz ultravioleta C (UVC) ha emergido como una solución eficaz y segura, capaz de inactivar un amplio espectro de microorganismos, incluyendo bacterias y virus, al dañar su material genético (ADN y ARN). Este es un proceso físico que elimina la necesidad de productos químicos peligrosos.

La exposición a las longitudes de onda germicidas de la luz UV impide la capacidad de reproducción e infección de bacterias, virus y protozoos. Se ha comprobado la eficacia de la luz UV contra patógenos responsables de enfermedades

como el cólera, la polio, la fiebre tifoidea y la hepatitis, ofreciendo una solución integral frente a diversas enfermedades bacterianas, virales y parasitarias.

El uso de robots móviles para llevar a cabo una desinfección UVC ofrece una propuesta innovadora para automatizar y salvaguardar la integridad física del personal de limpieza sin tener que demeritar los protocolos de desinfección, garantizando una cobertura y eficiencia superiores a los métodos manuales (Quispe Ramos, 2022).

A estos robots se les dota de capacidad de navegar por entornos predefinidos, como salas de cuidados intensivos o salones de clase, y aplicar la dosis de radiación UVC necesaria sin exponer al personal humano a los riesgos asociados con la radiación ultravioleta.

El presente artículo describe el proceso y resultados obtenidos al realizar la desinfección de diversos establecimientos usando el Robot móvil "LUMUSVOT" que cuenta con una lampara UVC de 38 W. Una de las ventajas de este móvil es su capacidad de ubicarse el entorno a desinfectar vía remota, para reducir el factor de riesgo en el uso de la luz UVC durante el proceso de erradicación de patógenos en superficies contaminadas. La investigación realizada busca validar el prototipo capaz de realizar protocolos de desinfección en espacios cerrados, contribuyendo a la seguridad y bienestar en áreas de alta afluencia (Otálora Riaño, 2020).

2. Métodos.

El proceso de desinfección de superficies y aire en diversos entornos utilizando lámparas UVC germicidas, empieza con la caracterización de la lampara UVC que se utilizará durante la desinfección.

Si se considera que la radiación UVC (longitud de onda de aproximadamente 200 a 280 nm) inactiva virus, bacterias y hongos al dañar su ADN y ARN, impidiendo su reproducción y replicación (Philips lighting, 2024; Amezquita-Tovar, 2023). También hay que estar conscientes de que es un método complementario a la limpieza manual tradicional, no un sustituto.

Las áreas de aplicación donde se pueden llevarán a cabo las pruebas de desinfección fueron seleccionadas considerando su grado de contaminación y fueron agrupados de la siguiente manera: Oficinas, laboratorios clínicos, consultorios, salones de clases y hospitales (áreas no críticas). Al realizar la desinfección se deben seguir ciertos protocolos de seguridad consideraciones sobre todo en lo que corresponde a la exposición directa a la luz UVC que es peligrosa para la piel y los ojos humanos. El personal que realiza la desinfección debe estar ausente durante la operación de la lámpara, y se deben implementar medidas de seguridad tales como: temporizadores y sensores de movimiento, para prevenir la exposición accidental (UNE, 2020). Por lo tanto, se debe tener como parte importante en los equipos de desinfección.

- Lámpara(s) UVC germicida(s) (preferiblemente con longitudes de onda de 254 nm).
- Señalización de advertencia para las áreas en uso.
- Equipo de Protección Personal (EPP) para el operador (si es necesario un acceso breve y controlado, aunque no es recomendable): gafas de protección UV certificadas y ropa de manga larga.

El proceso debe realizarse, de la siguiente manera, después de la limpieza manual con detergentes y desinfectantes químicos tradicionales, ya que la materia orgánica puede inactivar la luz UVC (MADSIG, 2021).

1. **Limpieza Previa:** Limpiar y secar minuciosamente todas las superficies (mesas, equipos, pisos) para eliminar la suciedad visible y la materia orgánica, que interfieren con la eficacia de la UVC.
2. **Evacuación:** Asegurar que no haya personas, animales o plantas en la habitación o área a desinfectar.
3. **Posicionamiento:** Colocar la lámpara UVC de manera estratégica para maximizar la cobertura del área, considerando que la luz UVC solo desinfecta las superficies que ilumina directamente (línea de visión directa). Múltiples posiciones pueden ser necesarias para áreas complejas (Del Cura-Bilbao, 2021).
4. **Activación:** Activar la lámpara UVC utilizando un control remoto o temporizador programado, retirándose inmediatamente del área.
5. **Tiempo de Exposición:** El tiempo de irradiación depende del tamaño de la habitación, la potencia de la lámpara y la distancia a las superficies. Estudios sugieren tiempos de entre 20 a 40 minutos para habitaciones.

La dosis efectiva para inactivar microorganismos patógenos (virus, bacterias, hongos) varía, pero dosis bajas pueden inactivar hasta 3 unidades logarítmicas de ciertos patógenos (Beltran-Zarza, 2007).

6. **Ventilación (Opcional):** Si la lámpara UVC produce ozono (común en algunas lámparas de cuarzo), se debe ventilar el área después de la desinfección antes de la reocupación.
7. **Desactivación:** Apagar la lámpara.
8. **Reingreso:** Permitir el reingreso del personal.
9. **Almacenamiento:** Almacenar la lámpara de forma segura.

La luz ultravioleta se localiza en el espectro más lejano de la luz visible en el rango de los 100nm a los 400nm de longitud de onda, situado entre el espectro visible y los rayos X, esta se puede clasificar en sus cuatro principales subdivisiones *UV-A, UV-B, UV-C y UV-V*.

Por la ecuación de energía de Planck se difiere que la energía resultante es inversamente proporcional a la longitud de onda así mientras menor sea esta la energía será mayor.

$$E=h\cdot C\lambda$$

El efecto microbicida y biocida de la UV-C radica en que es la capaz de tener interacción con las bases nitrogenadas, principalmente porque es absorbida por el ADN y el ARN, las cuales son las principales estructuras moleculares básicas para la replicación y las funciones metabólicas de los microorganismos.

El ADN y ARN se componen de cuatro bases nitrogenadas fundamentales la Adenina (A), Timina (T), Citosina (C) y Guanina (G). estas se emparejan mediante puentes de hidrogeno formando la característica doble hélice de forma que la Adenina se une con Timina con 2 puentes de hidrogeno y la Citosina con Guanina con 3 puentes de hidrogeno. Estas bases tienen el espectro de absorción mostrado en la tabla 1.

Con esto se puede observar que la absorbancia de las bases del ADN y ARN se encuentran entre los 230nm y los 280nm de longitud de onda, por lo tanto, quedan en el espectro que comprende al espectro de la UV-C (100nm-280nm).

Tabla 1. Espectro de absorción de bases de ADN y ARN.

Base	Máximo de absorción (λ máx.)	Rango de absorción (aproximado)
Adenina(A)	~260 nm	230–270 nm
Guanina(G)	~250 nm	230–270 nm
Citosina(C)	~270 nm	240–280 nm
Timina (T)	~265 nm	240–280 nm

Al incidir radiación UV-C sobre algún microorganismo ya sea virus o bacteria, la absorción provoca que energía en grandes cantidades den paso a reacciones de degradación en las bases de primidina (T-A) principalmente produciendo su ruptura dando paso a sitios que contienen un par de primidinas adyacentes, esto genera la formación de dímeros moleculares ciclobutanos (alcanos en forma de anillo), por lo tanto lo que se obtiene es una molécula que se forma a partir de dos moléculas idénticas o cercanamente similares que se entrelazan a través de enlaces químicos sean covalentes o no covalentes, en este caso covalentes. Figura 1.

Cuando la radiación UV-C incide sobre el ADN en resumen un par de bases Timina adyacentes pueden unirse formando un dímero ciclobutánico, esto se traduce como una distorsión o daño en la secuencia del ADN provocando mutaciones o un bloqueo en la secuencia lo cual impide la replicación de la célula. Figura 2.

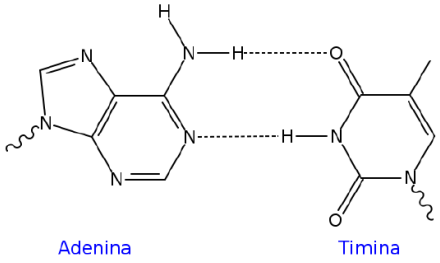


Figura 1. Par de bases Adenina-Timina (A-T).

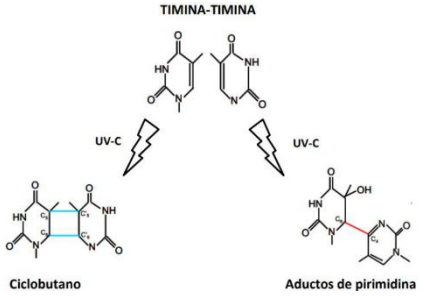


Figura 2. Foto-productos formados por radiación UV-C.

Robot móvil.

Bajo todas esas consideraciones que se necesitan para realizar la desinfección en espacios contaminados, se diseñó un robot móvil omnidireccional "LumUsVot" controlado de forma remota que emplea la tecnología de rayos UV para la desinfección de áreas controladas, marcando un hito en el campo de la limpieza y la sanitización. Este innovador dispositivo está equipado con una lámpara UV-C de 38W con una vida útil de 10,000 horas, que garantiza una desinfección efectiva y continua. Para el manejo adecuado de la lampara se considero que la lampara se guardara dentro del robot, mientras no fuera usada, y se desplegara cuando se realizara la desinfección, esto para evitar daños al ámpula que contiene el gas de mercurio, principal agente de desinfección. Figura 3.

Además de su potente sistema de desinfección, LumUsVot cuenta con características que lo hacen destacar en el mercado. Por un lado, ofrece una transmisión de video en vivo que permite supervisar el proceso de desinfección en tiempo real a través de una plataforma web intuitiva y fácil de usar. Asimismo, su capacidad de ser controlado remotamente a través de una WebApp proporciona flexibilidad y comodidad en su operación.

La movilidad es otro aspecto clave de LumUsVot, ya que está equipado con 4 llantas omnidireccionales que le permiten desplazarse con facilidad y precisión en diferentes tipos de espacios, asegurando una cobertura completa en la desinfección de áreas de cualquier tamaño y complejidad.

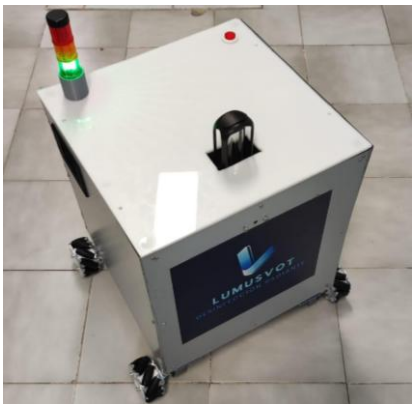
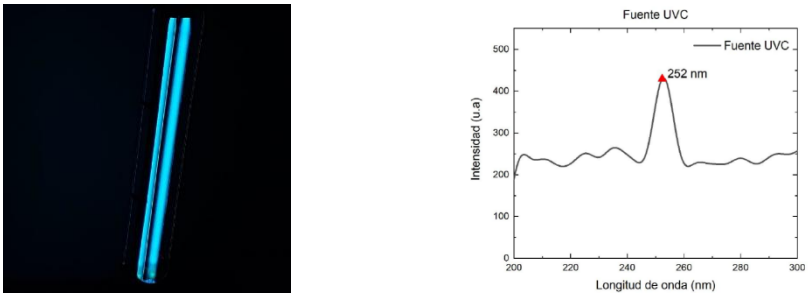


Figura 3. Robot móvil omnidireccional LUMUSVOT.

3. Desarrollo.

Para caracterizar la lámpara UVC de 38W se sometió a pruebas de funcionamiento en periodos de 8 horas para verificar su funcionamiento y desempeño sin cuantificar, esperando su respuesta luego de periodos constantes de actividad e interrupción periódica y constante, siendo estas las de mayor cuidado y atención, se realizaron intervalos de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos con un total de 10 pruebas por cada intervalo de tiempo (figura 4), así también se realizaron pruebas de intermitencia por cada 5 segundos, la temperatura máxima de operación alcanzó los 43.7°C en su punto máximo a una temperatura ambiente de 24°C y una temperatura media de operación de 40.7°C a una temperatura ambiente de 24°C, en observación general el dispositivo muestra el comportamiento en el rango de operación esperada hablando de forma generalizada.



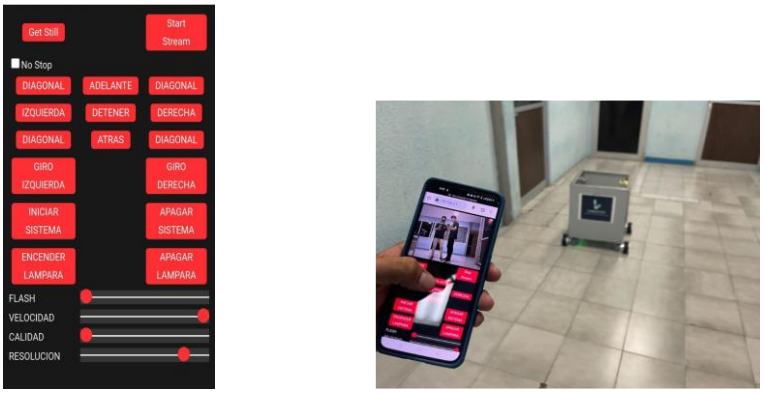
a) b)

Figura 4. Lámpara LBT-UVYMD-38W. a) Funcionamiento. b) Espectro de frecuencia.

Después de realizar la caracterización de la longitud de onda especifica de la lampara LBT-UVYMD-38W se determinó que es una lámpara UV-C de 38w de potencia teóricamente de un aproximado a un espectro de emisión de 252nm, siendo su tecnología un encapsulado de mercurio a baja presión en una ampolla de cristal de cuarzo.

Control movimientos.

Como parte del proyecto se desarrolló el programa de control de movimientos básicos, tanto movimientos básicos del robot omnidireccional (adelante, atrás, giro derecho, giro izquierdo, lateral derecha, lateral izquierda) como los movimientos de elevación y descenso del soporte e la lampara UVC (Figura 5). El control de movimiento desarrollado fue realizado como una página web, para lo cual el robot genera su propia red WIFI de manera local, a la cual cualquier celular, tableta o PC se puede conectar a dicha red para controlar los desplazamientos del robot. Además de proporcionar el video de una cámara con la que el operador del robot puede ver los obstáculos que tiene enfrente para evadirlos y evitar que el robot quede bloqueado.



a) b)_

Figura 5. Página WEB de control de movimientos. a) Diseño. b) Uso.

Resultados.

Para llevar a cabo las pruebas de desinfección se contactaron con empresas de atención al público, médicos que dan consultas, laboratorios clínicos, escuelas en donde se imparte la carrera de enfermería, escuelas con laboratorios de química y laboratorios de cómputo, etc. Esto con la finalidad de proporcionarles el servicio de desinfección y poder validar el funcionamiento del prototipo. Figura 6.

En total se contactaron a 2 establecimientos privados, 2 consultorios médicos, 1 laboratorio clínico, 2 escuelas con laboratorios de enfermería, 3 escuelas con laboratorios de química, laboratorios de computo y bibliotecas; en los cuales se hicieron un total de 50 procesos de desinfección, Considerando el área que cubre la lampara UVC (≈ 35 M²) en la tabla 2 se muestran la cantidad de procesos de desinfección que se necesitan para espacios cerrados.

Tabla 2. Cantidad de procesos de desinfección realizados.

Espacio cerrado	Núm. de procesos de desinfección
Barberia	1
Salón de clase (≈ 40 m²)	1
Consultorio médico (≈ 30 m²)	1
Laboratorio clínico (≈ 90 m²)	3
Laboratorio de enfermería (≈ 90 m²)	3
Laboratorio de química (≈ 90 m²)	3
Laboratorio de cómputo (≈ 90 m²)	3
Biblioteca (≈ 250 m²)	8

a)

b)

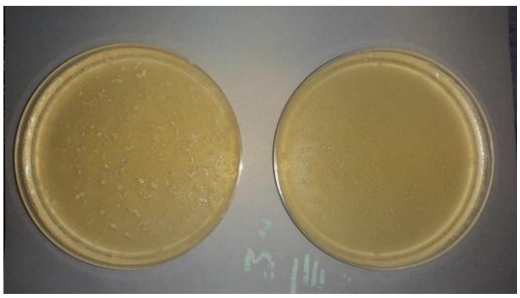
c)

Figura 6. Procesos de desinfección. a) Sala urgencias. b) Laboratorios secundaria la salle. c) Óptica Nucamendi, Hospital Rojas, Laboratorios CONALEP 312.

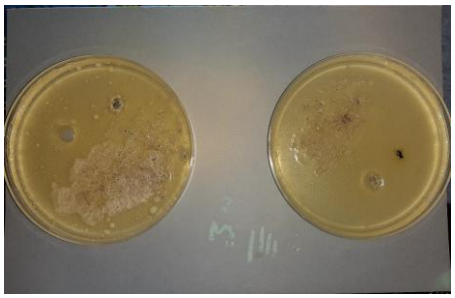
En cada desinfección se realizó una recolección de una muestra en un área de 100mm x 100mm y se resguardo en un medio de transporte. Posterior a ello se procede a realizar la irradiación con LumUsVot por un periodo dependiendo el entorno. Seguidamente del proceso de irradiación, se toman nuevas muestras del entorno de la misma forma antes mencionada en un área de las mismas dimensiones.

Para la realización de estas pruebas en el presente caso se realizó siguiendo el método antes mencionado con isopos con medio de transporte multipropósito como medio de recolección y medios de cultivo multipropósito sin selectivos ni reactivos de manera que se desarrollen todas las colonias posibles de las muestras recolectadas.

Después de 12h y 24h de la irradiación se revisaron el estado del cultivo para ver su comportamiento, características y crecimiento, esto tras haber estado en una temperatura promedio de 35°C libre de iluminación y agentes contaminantes o que alteren de cualquier manera en cultivo. En la figura 7 se puede ver la diferencia entre la muestra no irradiada (izquierda) y la muestra irradiada con UVC (derecha).



a)



b)

Figura 7. Crecimiento de colonias. a) 12 hrs. b) 24 hrs.

Discusión.

Se realizó el proceso de verificación de desinfección usando el robot móvil omnidireccional "LUMUSVOT", en diferentes espacios con diferentes niveles de contaminación por bacterias, virus y hongos. Obteniendo una reducción en el crecimiento de colonias de diferentes tipos de patógenos. En todas las muestras que se tomaron se logra apreciar de manera visual la reducción en el crecimiento de las colonias. Considerando que este método de desinfección es el más adecuado, aun considerando que para que esta reducción se dé la luz ultravioleta debe incidir en los patógenos, al ser una lampara de alta potencia, se genera una cantidad de ozono considerable, que también permite incrementar el nivel de inhibición aun sin tener la incidencia de la UVC de forma directa.

También se comprobó que el usar el robot, podemos tener la seguridad de que el operador está a salvo de los efectos dañinos de la UV. Ya que puede estar ubicando el robot afuera del espacio a desinfectar.

De igual forma, se comprobó el buen funcionamiento de los sistemas de alerta que fueron incluidos, como son la torreta luminosa y la alarma sonora para indicar que se está procediendo a iniciar un proceso de desinfección.

Créditos.

Los autores agradecen las facilidades del Tecnológico Nacional de México y del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Acosta-Gnass, S., & Andrade Stempliuk, V. 2008. *Manual de esterilización para centros de salud*. Organización Panamericana de la Salud. https://www.pediatria.gob.mx/archivos/burbuja/7_OPS_Manual_de_esterilizacion.pdf

Amezquita-Tovar, J.C., Carvajal-Ahumada, L.A. (2023). *Generalidades sobre métodos de desinfección mediante radiación UV*. Revistas *Reto*, *2*(3), 85-94. https://revistas.sena.edu.co/index.php/RETO/article/download/5463/5956

Beltran-Zarza, N.A. (2007). *Aplicación de luz ultravioleta para desinfección de efluentes secundarios con alto contenido de patogenos*. UNAM. Tesis de licenciatura no publicada. https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/pd2007/0612246/0612246.pdf

Del Cura-Bilbao, A., Martin-Sánchez, J.I. (2021). *Sistemas de desinfección con luz ultravioleta C para la reducción de las infecciones nosocomiales*. Ministerio de sanidad. Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud (IACS). https://www.iacs.es/wp-content/uploads/2021/11/IACS_TE_60_UV-C_Informe_DEF_NIPO.pdf

Jiménez-Rojas, A., Valderrama-Beltrán, S.L. 2021. *Limpieza y desinfección de equipos y superficies ambientales en Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud*. Asociación Colombiana de Infectología (ACIN). http://acin.org/images/guias/LIMPIEZA_Y_DESIN_2022_2_ACINcap_central_SDS.pdf

MADSIG Sistema integrado de gestión. (2021). *Guía de limpieza y desinfección*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/GUIA_DE_LIMPIEZA_Y_DESINFECCION.pdf

Mollyk, P.; 2019. *Mejores prácticas de limpieza ambiental en centros de atención médica*. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC). Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. https://www.cdc.gov/healthcare-associated-infections/media/pdfs/es/BestPracAfrica-for-MLS-US-ES-508.pdf

Motta-Ávila, C. A., Flores-Sánchez, M. G., & Hernández-Vargas, J. A. 2022. Robot terrestre autónomo auxiliar en la desinfección o sanitización de interiores mediante luz UV-C. *Memorias del Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, *8*(1), 38-39. https://doi.org/10.26457/mclidi.v8i1.3153

Ordoñez García, J. E., Salvatierra Bravo, L. F., & Cagua Quiñonez, C. I. 2021. Uso de la robótica como medio para la esterilización y desinfección con luz ultravioleta en el contexto del COVID-19. *RECIMUNDO*, *5* (especial 1), 68-77. dialnet.unirioja.es

Otálora, D; 2020. Desarrollo de un sistema de monitoreo y planificación de procesos de desinfección para ambientes COVID-19. Tesis profesional. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.

Philips lighting. (2024). *Desinfección del aire con UV-C*. https://www.lighting.philips.com.en2es.search.translate.goog/application-areas/specialist-applications/uv-disinfection

Quispe Ramos, C. M. 2022. *Robot UVC para desinfección hospitalaria - Ultravioleta* [Presentación]. Scribd. https://fr.scribd.com/presentation/689805541/Robot-movil-de-desinfeccion-con-luz-UVC

UNE. (2020). *Requisitos de seguridad para aparatos UV-C utilizados para desinfectar aire y superficies en locales. Especificaciones de seguridad* [Documento técnico]. Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social. https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Especificacion_UNE_0068-2020.pdf

Información de los autores.

Álvaro Hernández Sol es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundo y asesora el Club de robótica "Engineers Bots" del ITTG". Colabora en la línea de investigación de "Robótica" de Ingeniería electrónica. Dirige el área de trabajo en "Robótica" y es parte del cuerpo académico "sistemas de control inteligentes". Ha realizado investigaciones en el área de los sistemas alternativos de comunicación y en sistemas robóticos, Así como en sistemas traductores de lenguaje.

Simei Ibar José de la Cruz, estudiante del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, pasante de la carrera ingeniería electrónica con especialidad en instrumentación y control, cuenta con la certificación CSWA de solidworks, tiene como campos de interés: modelado, programación, robótica, pruebas clínicas.

Raúl Moreno Rincón, Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, egresado de la ESIME-IPN, en la ciudad de México, D.F. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca. Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Chiapas. Certificado en SolidWorks Associate. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y jefe de Proyectos de Docencia de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 1999 y Colabora en la línea de investigación "Robótica" de Ingeniería electrónica y es parte del cuerpo académico en formación "sistemas de control inteligentes". Ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, sistema de control de animatronic, entre otros.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Cuenta con la certificación CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks; así como un Diplomado en el motor de desarrollo de videojuegos UNREAL, Diplomado en Microsoft Teams y Diplomado en competencias para la enseñanza de las ciencias. Acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación (PEI Conacyt) para empresas privadas, desarrollo de patentes con desarrollos tecnológicos en el Estado de Chiapas y fue parte del cuerpo de investigación de la Universidad del Valle de México Campus Tuxtla hasta el 2022. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación "Sistemas de control inteligentes" del I.T.T.G. con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y el TecNM. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.

Rubén Herrera Galicia, obtuvo el título de doctor en ciencias técnicas con especialidad en electrónica por la Technical University of Warsaw, Polonia. Es profesor de tiempo completo adscripto al departamento de ingeniería eléctrica y electrónica del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Es investigador desde 1985 y colabora en la línea de investigación de "Robótica" de Ingeniería electrónica. Es parte del cuerpo académico "sistemas de control inteligentes".

Diseño de móvil omnidireccional para desinfección de espacios cerrados.

Omnidirectional mobile design for disinfecting enclosed spaces.

Álvaro Hernández Sol (1).
Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez.
alvaro.hs@tuxtla.tecnm.mx.

Bruno Damián Gálvez Méndez* (2). Estudiante del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, L20270646@tuxtla.tecnm.mx.

Jerson Enrique Pérez Grajales (3). Estudiante del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, L20270383@tuxtla.tecnm.mx.

Raúl Moreno Rincón (4). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, raull.mr@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Herrera Galicia (5). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, ruben.hg@tuxtla.tecnm.mx.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (6). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 27, 2025; aceptado en diciembre 16, 2025.

Resumen.

Este artículo presenta el proceso de desarrollo, diseño y construcción de un móvil omnidireccional con ruedas mecanum, además de un sistema de elevación//descenso de una lámpara UVC montado en la parte interna, todo controlado por medio inalámbrico (red WIFI autogenerada). Se programó en Arduino usando un microcontrolador ATMEGA 2560 y un ESP-CAM 32. El prototipo desarrollado presenta como ventaja principal una estructura mecánica sólida y eficiente para las pruebas básicas de control, Se desarrollo con la finalidad de realizar la desinfección de espacios contaminados por agentes patógenos (virus, bacterias y hongos) además para que alumnos de la licenciatura en electrónica y mecatrónica puedan utilizarlo en la aplicación de métodos de navegación y control robustos.

Palabras claves: Desinfección, lámpara UVC, modelo 3D, omnidireccional, ruedas mecanum.

Abstract.

This article presents the design and construction process of an omnidirectional mobile using mecanum wheels, in addition to internally mounted UVC lamp raising/lowering system, all controlled by wireless via a self-generated WI-FI network. It was programmed using an Atmega 2560 microcontroller and an ESP-CAM 32microcontroller. The developed prototype presents as its main advantage a solid and efficient mechanical structure for basic control tests. It was developed with the purpose of disinfecting spaces contaminated by pathogens (viruses, bacteria and fungi), in addition to allowing undergraduate students in electronics and mechatronics to use it in applying robust navigation and control methods.

Keywords: 3D model, disinfecting, mecanum wheels, omnidirectional, UVC lamp.

1. Introducción.

La persistencia en el tiempo de diversos microorganismos en superficies se ve influenciada por una combinación de factores intrínsecos y ambientales. La variabilidad en las características físicas de los microorganismos, junto con condiciones ambientales como humedad y temperatura, así como el tipo de materiales superficiales, desempeñan un papel crucial en la supervivencia y persistencia de estos agentes patógenos.

La limpieza y desinfección de superficies y ambientes interiores se ha convertido en un desafío crítico para la salud pública, exacerbado por la reciente emergencia sanitaria mundial (Motta-Ávila et al., 2022). Los microorganismos patógenos tienen la capacidad de transmitirse tanto por el aire como por contacto con superficies contaminadas, lo que resalta la necesidad de métodos de esterilización altamente efectivos, especialmente en entornos de alto riesgo como hospitales y centros de salud (Ordoñez García et al., 2021).

Las bacterias, generalmente, conservan su capacidad infecciosa durante períodos más extensos en comparación con los virus. En condiciones ambientales favorables, las bacterias pueden perdurar desde varios días hasta años en superficies diversas. Esta diferencia temporal tiene implicaciones importantes para la gestión de la higiene y la prevención de enfermedades, ya que la longevidad de los microorganismos en las superficies puede afectar directamente la propagación y transmisión de enfermedades infecciosas.

En este contexto, se observa que los microorganismos tienden a sobrevivir por períodos más prolongados en superficies duras y lisas en comparación con aquellas que son blandas y porosas. Esta diferencia en la persistencia puede atribuirse a la capacidad de los microorganismos para adherirse y encontrar condiciones más propicias para su supervivencia en sustratos sólidos y no porosos.

Tradicionalmente, la desinfección se ha basado en métodos químicos, pero estos pueden implicar el manejo de sustancias tóxicas o corrosivas, además de requerir tiempo y mano de obra considerable. En respuesta a estas limitaciones, la tecnología de luz ultravioleta C (UVC) ha emergido como una solución eficaz y segura, capaz de inactivar un amplio espectro de microorganismos, incluyendo bacterias y virus, al dañar su material genético (ADN y ARN). Este es un proceso físico que elimina la necesidad de productos químicos peligrosos.

La exposición a las longitudes de onda germicidas de la luz UV impide la capacidad de reproducción e infección de bacterias, virus y protozoos. Se ha comprobado la eficacia de la luz UV contra patógenos responsables de enfermedades como el cólera, la polio, la fiebre tifoidea y la hepatitis, ofreciendo una solución integral frente a diversas enfermedades bacterianas, virales y parasitarias.

La integración de la robótica móvil con la desinfección UVC ofrece una propuesta innovadora para automatizar y optimizar estos protocolos, garantizando una cobertura y eficiencia superiores a los métodos manuales (Quispe Ramos, 2022). Estos robots autónomos pueden navegar por entornos predefinidos, como salas de cuidados intensivos o salones de clase, y aplicar la dosis de radiación UVC necesaria sin exponer al personal humano a los riesgos asociados con la radiación ultravioleta.

El presente artículo describe el diseño e implementación de un robot móvil de desinfección con lámpara UVC, centrándose en su sistema de ubicación en el entorno a desinfectar vía remota, para reducir el factor de riesgo en el uso de la luz UVC durante el proceso de erradicación de patógenos en superficies contaminadas. La investigación realizada busca validar un prototipo capaz de realizar protocolos de desinfección en espacios cerrados, contribuyendo a la seguridad y bienestar en áreas de alta afluencia (Otálora Riaño, 2020).

El diseño mecánico, electrónico y la teoría de control son diciplinas que se conjuntan para el desarrollo de robots móviles. (Barrientos, 2007). En dichas disciplinas se deben tener conocimientos de los diferentes elementos

tecnológicos usados en el diseño y construcción de los robots, tales como materiales, medio de locomoción, sensores, actuadores, microcontroladores y métodos de control.

Como dice Hernández (2023), la decisión de qué tipo de locomoción utilizar depende de varios factores como lo son: la maniobrabilidad (facilidad en el manejo del robot), controlabilidad (relacionada con las posibles trayectorias que el robot pueda seguir), tracción (tipo de suelo), capacidad de subir pendientes, estabilidad (estabilidad estática y dinámica), eficiencia (tracción vs consumo), mantenimiento y alimentación (batería, gasolina, etc.) e impacto ambiental (motores eléctricos, motores de gasolina, etc.).
En la construcción del robot omnidireccional para desinfección de espacios cerrados se construyó una estructura robusta basada en perfiles de aluminio, además del diseño de un sistema de elevación / descenso de la lampara UVC. Se diseño la tarjeta de control usando un ATMEGA 2560, además del uso de una tarjeta ESP-CAM 32.

2. Métodos.

La cinemática de un móvil con ruedas Mecanum describe la relación matemática entre las velocidades de cada rueda y el movimiento resultante del robot (velocidad lineal en los ejes X, Y y velocidad angular alrededor del eje Z). Considerando que los robots con ruedas Mecanum logran un **movimiento omnidireccional** gracias a la orientación de 45° de los rodillos en cada rueda. Figura 1.

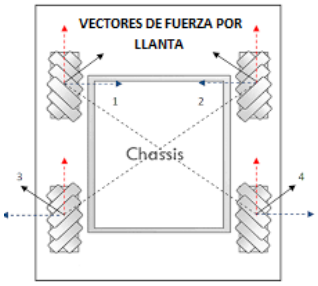


Figura 1. Chasis de robot omnidireccional con llantas mecanum.

El movimiento **Omnidireccionalidad de**l robot (hacia adelante/atrás, de lado, giro en su propio eje o mientras se desplaza) se logra con la combinación de diferentes velocidades y direcciones de giro en cada una de las cuatro ruedas. Al realizar la suma de los vectores de fuerza generados por cada una de las cuatro llantas es lo que permite el movimiento resultante en cualquier dirección.\

Todo el control de dirección de la estructura esta basado en la **Cinemática Directa e Inversa, se usa una o la otra para determinar** la velocidad y orientación general del robot a partir de las velocidades individuales de sus ruedas. O bien determina qué velocidades debe tener cada rueda para lograr un movimiento deseado del robot (Santiago, 2009).

Para un robot con cuatro ruedas Mecanum, el modelo cinemático inverso permite calcular las velocidades angulares $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)$ de cada rueda (generalmente etiquetadas como frontal izquierdo, frontal derecha, trasera izquierda, trasera derecha) necesarias para alcanzar una velocidad lineal deseada en el plano (V_x, V_y) y una velocidad angular de rotación (ω_z) del chasis.

Las ecuaciones simplificadas para las velocidades de las ruedas, asumiendo un robot simétrico con distancia L del centro a las ruedas a lo largo del eje X y W a lo largo del eje Y, y un radio de rueda R, son (las constantes k_1, k_2, k_3 representan combinaciones de L, W, R y están sujetas a la configuración específica 'A' o 'B' de las ruedas):

$$\omega_1 \text{ (Rueda delantera izquierda)} = k_1 V_x + k_2 V_y + k_3 \omega_z$$
$$\omega_2 \text{ (Rueda delantera derecha)} = k_1 V_x - k_2 V_y - k_3 \omega_z$$
$$\omega_3 \text{ (Rueda trasera izquierda)} = k_1 V_x - k_2 V_y + k_3 \omega_z$$

$$\omega_4 \text{ (Rueda trasera derecha)} \quad = k_1 V_x + k_2 V_y - k_3 \omega_z$$

Diseño mecánico.
El diseño y modelado de la base estructural del móvil omnidireccional se realizó considerando las dimensiones mínimas en las cuales la lampara UVC pudiera estar protegida dentro del robot por lo que se siguió un procedimiento para adaptarlo a estas medidas.

Móvil Omnidireccional con llantas mecanum.
Para la estructura de la base se optó por usar 8 perfiles de aluminio en ángulo de 30x30mm perforado con un largo de 444.5 mm, con los cuales se construyó 2 cuadros: uno para la parte inferior y otro para la parte superior, más 4 perfiles, también de aluminio tipo C perforados, con dimensiones de 444.5mm de largo por cada arista vertical que fungen como columnas que unen los 2 cuadros antes descritos. Figura 2.

Figura 2. Estructura de soporte del robot omnidireccional

Se utilizaron soportes metálicos para cada motorreductor Modelo NFP-5840-31ZY 12V_40 rpm en donde se montaron las llantas mecanum de 4” (Figura 3).

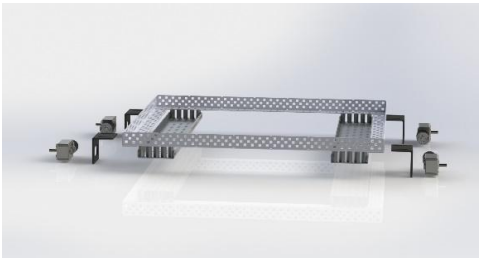


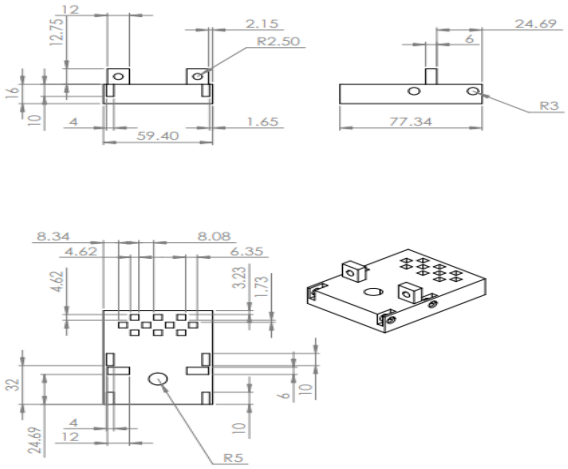
Figura 3. Soportes metálicos y motores en la estructura del móvil omnidireccional.

En la figura 4 se muestra el diseño del sistema de elevación/descenso del soporte de la lampara UVC

Figura 4. Sistema de elevación/descenso diseñado en SOLIDWORKS.

Para poder acoplar este sistema de elevación/descenso con la estructura base, se tuvieron que diseñar e imprimir piezas con PLA, de soporte tanto para la parte inferior del sistema como para la parte superior. Figura 5

a)



b)

Figura 5. Diseño Mecánico. a) Abrazaderas inferiores. b) Soporte superior del sistema de elevación.

En la figura 6 podemos ver el diseño completo del sistema de elevación/descenso

Figura 6. Sistema de elevación completo.

En la figura 7 se presenta la ubicación de todos los elementos para la comunicación, control y adquisición de datos: Microcontrolador ATMega 2560, batería litio 12v 10MAh, módulos puente h L298N, modulo bluetooth HC-05, Driver Motor A Pasos Tb6600 y elementos eléctricos de protección. El robot se cubrió con panel de aluminio, de 6mm de grosor, en cada una de las superficies, por lo que se procedió a diseñar dichas cubiertas.

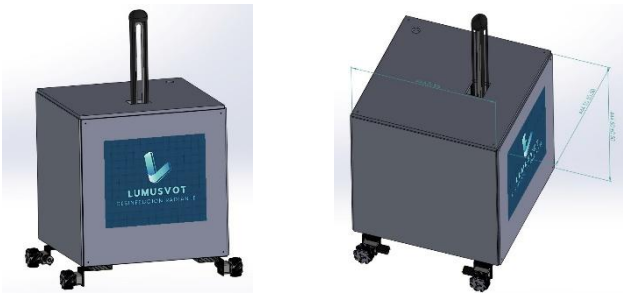


Figura 7. Diseño y ensamble de paneles de aluminio.

3. Desarrollo.

Una vez establecido el diseño mecánico, se procedió a la construcción del prototipo, empezando con la construcción de la estructura del móvil omnidireccional, con herramientas de corte para la adaptación de tamaños de los perfiles de aluminio y su posterior fijación para conformar las estructuras donde se colocarán los elementos restantes, Figura 8.

Figura 8. Construcción de la estructura del móvil omnidireccional.

Para continuar con la construcción del sistema de elevación/descenso de la lampara UVC, figura 9.

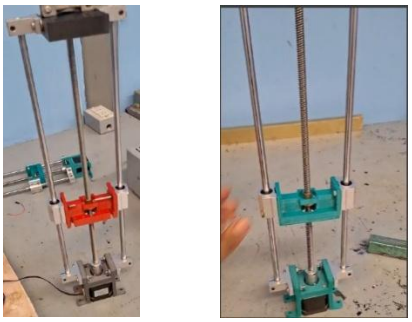


Figura 9. Proceso de construcción del sistema de elevación.

Continuación del proceso, en la figura 10 se observa el proceso de implementación de los elementos mecánicos, eléctricos y de monitoreo/control.

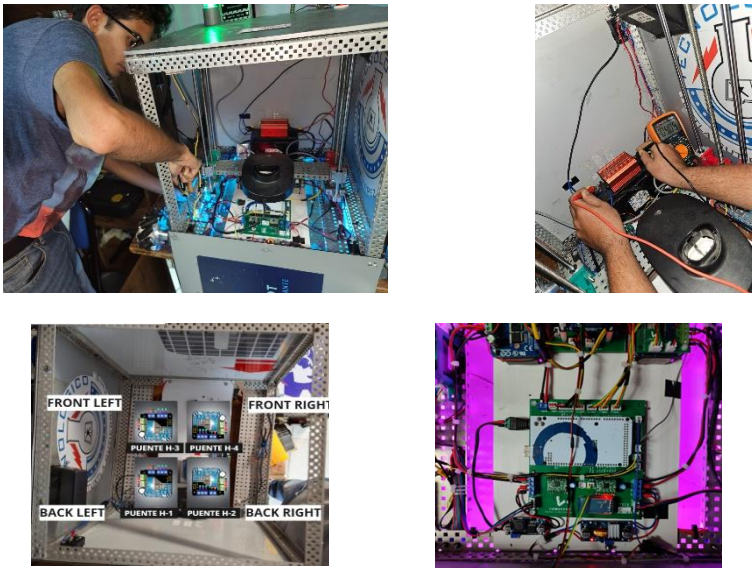


Figura 10. Implementación de los elementos mecánicos, eléctricos y de monitoreo/control.

Una vez implementado los elementos mencionados anteriormente, se procede a recubrir el móvil omnidireccional con panel de aluminio con sus medidas correspondientes, además de realizar el conexionado (figura 11) adecuado de cada elemento eléctrico/mecánico.

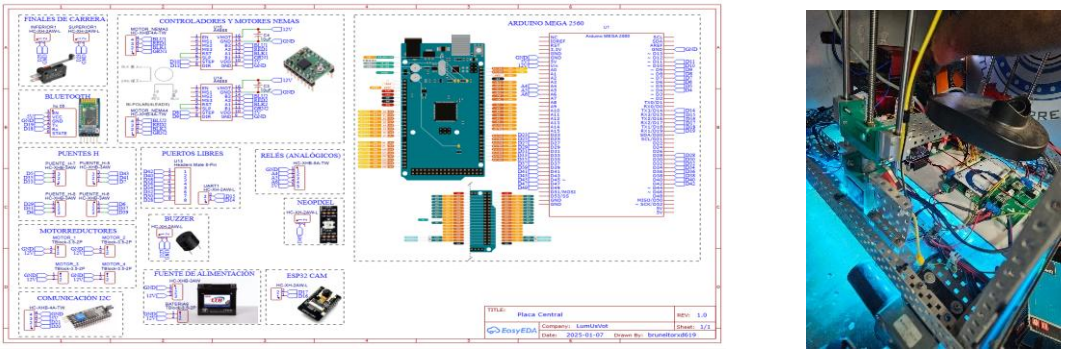
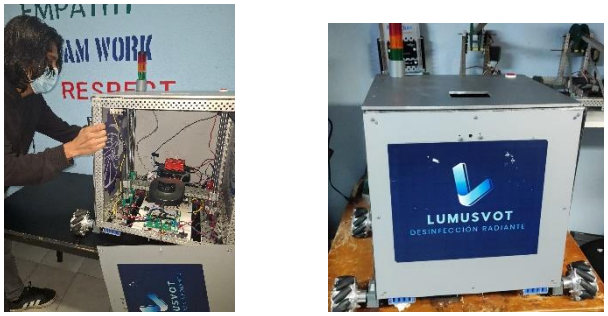


Figura 11. Conexiones eléctricas de los elementos de comunicación y control.

En la figura 12 se puede ver el robot móvil omnidireccional, con llantas mecanum, para desinfección de espacios cerrados terminado, listo para empezar a programarlo.



a)

b)

Figura 12. Proceso final. a) Recubrimiento del móvil. b) Móvil omnidireccional con todos los elementos implementados.

Programación.

Como parte del proyecto se desarrolló el programa de control de movimientos básicos, tanto movimientos básicos del robot omnidireccional (adelante, atrás, giro derecho, giro izquierdo, lateral derecha, lateral izquierda) como los movimientos de elevación y descenso del soporte e la lampara UVC (Figura 13). La programación se elaboró en el IDE de Arduino, configurando un dispositivo inalámbrico bluetooth instalado en el móvil omnidireccional.

Figura 13. Programación del control de movimientos móvil omnidireccional.

Para realizar las pruebas de funcionamiento de todos los movimientos que puede realizar el robot se utilizó una app desarrollada en APPInventor denominada CONTROL_BT.

En la figura 14 se observa la pantalla final de la aplicación, que incluye todos los botones necesarios para controlar los movimientos programados en el móvil.

Figura 14. Interfaz final de la apk.

Resultados.

Como parte del diseño del robot se obtuvo el dibujo técnico final de todo el móvil omnidireccional con llantas mecanum con su sistema de elevación de lampara UVC usando la herramienta Drawings de SolidWorks, y se tomaron a consideración las modificaciones y correcciones finales en la colocación de elementos, con un margen de error de ±1% en las dimensiones.

Todas las medidas fueron establecidas con el estándar CGS (centímetro, gramo, segundo), obteniendo una dimensión final del montaje de 94.5cm x 94.5 cm para la base y una altura variable de 114.5 cm (lampara oculta) o de 144.5 cm (con la lampara extendida).

También se construyó un móvil robusto y versátil que al realizar la pruebas se encontró que cumplía con todas las características propuestas en el proyecto (figura 15).

Figura 15. Vistas de robot construido.

Discusión.

Se diseñó y construyo un robot móvil omnidireccional con llantas mecanum, el cual cuenta con una lampara de 38 Watts UVC integrada que puede protegerse dentro del móvil, que puede realizar su traslación en cualquier dirección, cambiando su dirección o moviéndose de forma lateral o en diagonal, a diferentes velocidades al utilizar como medio de locomoción llantas mecacum de 6 pulgadas. Pudiendo la lampara extenderse a una altura de 120 cm, con lo cual se puede abarcar una superficie de 1 metro de alto fácilmente.

Se realizaron diferentes movimientos programados por medio de una app instalada en un celular. Comprobando que el robot realiza los movimientos predeterminados de manera fluida, logrando una buena repetitividad, aunque se

encontró que los soportes metálicos ubicados en la parte inferior del chasis tuvieron unos detalles al momento de estas pruebas, y se tuvieron que modificar para evitar que las llantas se inclinaran.

De la misma manera, el sistema de elevación/descenso de la lampara, se tuvieron que realizar varias adecuaciones para lograr un funcionamiento adecuado a la necesidad, y aunque el tiempo de elevación y de descenso es lento, esto no influiría en el funcionamiento general del robot desinfectante.

Estos errores se han venido corrigiendo durante este 2025, concluyendo que dichos soportes lo mejor es sujetarlos sobre un perfil tubular para incrementar su rigidez y mejorar la posición de los motores y de la caja de engranes.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México y las facilidades del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Barrientos, A. Peñin, L.F. 2007. *Fundamentos de robótica*. Madrid, España: McGraw Hill.

Hernández, A; Lopez, ; Garcia, O; 2023. Sistema de Control de Movimiento de Móvil con Tracción Basada en Llantas Mecanum. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Puebla TecNM 2023.

Motta-Ávila, C. A., Flores-Sánchez, M. G., & Hernández-Vargas, J. A. 2022. Robot terrestre autónomo auxiliar en la desinfección o sanitización de interiores mediante luz UV-C. *Memorias del Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, *8*(1), 38-39. https://doi.org/10.26457/mclidi.v8i1.3153

Ordoñez García, J. E., Salvatierra Bravo, L. F., & Cagua Quiñonez, C. I. (2021). Uso de la robótica como medio para la esterilización y desinfección con luz ultravioleta en el contexto del COVID-19. *RECIMUNDO*, *5*(especial 1), 68-77. dialnet.unirioja.es

Quispe Ramos, C. M. 2022. *Robot UVC para desinfección hospitalaria - Ultravioleta* [Presentación]. Scribd. https://fr.scribd.com/presentation/689805541/Robot-movil-de-desinfeccion-con-luz-UVC

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2015). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Desinfección con luz ultravioleta* (EPA 832-F-99-064).

Información de los autores.

Álvaro Hernández Sol, es Ingeniero en electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y es investigador desde 1997. Certificado en SolidWorks Associate. Jefe de proyectos de investigación de ingeniería electrónica desde el 2001. Fundo y asesora el Club de robótica “Engineers Bots” del ITTG”. Colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica. Dirige el área de trabajo en “Robótica“ y es parte del cuerpo académico “sistemas de

control inteligentes". Ha realizado investigaciones en el área de los sistemas alternativos de comunicación y en sistemas robóticos, Así como en sistemas traductores de lenguaje.

Bruno Damián Gálvez Méndez, estudiante del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, pasante de la carrera ingeniería electrónica con especialidad en mecatrónica, cuenta con la certificación CSW de solidworks, tiene como campos de interés: diseño, modelado y animación en 3D, programación, robótica.

Jerson Enrique Pérez Grajales, estudiante del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, pasante de la carrera ingeniería electrónica con especialidad en mecatrónica, cuenta con la certificación CSW de solidworks, tiene como campos de interés: Diseño, modelado en 3D, automatización, construcción de prototipos electromecánicos.

Raúl Moreno Rincón, Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, egresado de la ESIME-IPN, en la ciudad de México, D.F. Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca. Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Chiapas. Certificado en SolidWorks Associate. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y Jefe de Proyectos de Docencia de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 1999 y Colabora en la línea de investigación "Robótica" de Ingeniería electrónica y es parte del cuerpo académico en formación "sistemas de control inteligentes". Ha realizado proyectos como: Sistema de alarma para personas con deficiencia auditiva basado en XBEE, robot de cafetería, araña hexápoda, sistema de control de animatronic, entre otros.

Rubén Herrera Galicia, obtuvo el título de doctor en ciencias técnicas con especialidad en electrónica por la Technical University of Warsaw, Polonia. Es profesor de tiempo completo adscripto al departamento de ingeniería eléctrica y electrónica del Tecnológico

Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Es investigador desde 1985 y colabora en la línea de investigación de “Robótica” de Ingeniería electrónica. Es parte del cuerpo académico “sistemas de control inteligentes”.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Cuenta con la certificación CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks; así como un Diplomado en el motor de desarrollo de videojuegos UNREAL, Diplomado en Microsoft Teams y Diplomado en competencias para la enseñanza de las ciencias. Acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación (PEI Conacyt) para empresas privadas, desarrollo de patentes con desarrollos tecnológicos en el Estado de Chiapas y fue parte del cuerpo de investigación de la Universidad del Valle de México Campus Tuxtla hasta el 2022. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes” del I.T.T.G. con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y el TecNM. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.

Diseño de un sistema de extracción de jugo para productores de limón persa.

Design of a juice extraction system for persian lemon producers.

Ignacio Arrioja Cárdenas* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
ignacio.ac@tuxtla.tecnm.mx.

José Manuel Rasgado Bezares (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
jose.rb@tuxtla.tecnm.mx.

Erick Arrioja Castillo (3), Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
L23270462@tuxtla.tecnm.mx.

Vitta Marlene Castillo Sánchez (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
vitta.cs@tuxtla.tecnm.mx.

Saul de Jesús Molina Domínguez (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
saul.md@tuxtla.tecnm.mx.

Juan Carlos Niños Torres (6). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. juan.nt@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 12, 2025; aceptado en diciembre 17, 2025.

Resumen.

Este proyecto presenta el diseño de una máquina despulpadora de limón persa para procesar hasta 500 kg de fruta por hora. El proyecto parte de una investigación previa sobre máquinas similares y se enfoca en desarrollar un prototipo eficiente y confiable, adecuado para las necesidades de productores locales en Tuxtla Gutiérrez y alrededores. Se realizan distintas etapas en la operación del sistema: clasificación, corte, transporte, exprimido y expulsión de residuos. El diseño también contempla recomendaciones para su correcto funcionamiento y mantenimiento, con énfasis en la seguridad y la limpieza. Los costos de fabricación son menores en comparación con las máquinas comercializadas en el mercado, lo que puede beneficiar a pequeños productores al ofrecer una alternativa más económica y eficiente.

Palabras claves: Despulpadora, diseño, máquina, prototipo.

Abstract.

This project presents the design of a persian lemon pulping machine capable of processing up to 500 kg of fruit per hour. The project is based on prior research on similar machines and focuses on developing an efficient and reliable prototype, suitable for the needs of local producers in the city of Tuxtla Gutiérrez. Different stages are carried out in the system's operation: classification, cutting, transportation, juicing, and waste expulsion. The design also includes recommendations for proper operation and maintenance, with an emphasis on safety and cleanliness. The

manufacturing costs are lower compared to commercially available machines, which can benefit small producers by offering a more economical and efficient alternative.

Keywords: Design, machine, prototype, pulping machine.

1. Introducción.

En el mercado nacional existen diferentes máquinas que tienen como función la extracción de jugo, estas pueden ser manuales o eléctricas, siendo estas últimas las que brindan mejores prestaciones para los usuarios. Un factor negativo de estas de máquinas es un costo demasiado elevado. El desarrollo de este proyecto tiene como propósito el diseño de un sistema de extracción de jugo para productores de limón persa de Tuxtla Gutiérrez y zonas de influencia, eficiente y económico (Hernández, 2016).

El desarrollo está sustentado en la aplicación de teorías de diseño mecánico y validado mediante el diseño asistido por computadora, en particular se usa el software de SolidWorks (licencia institucional).

El sistema de extracción de jugo para limón persa está conformado con un motor eléctrico que es el encargado de trasmitir la energía al sistema, esta es transmitida mediante un sistema de poleas y bandas al mecanismo de extracción de jugo. El proceso de corte se realiza mediante un tornillo sin fin de paso variable, el despulpado o la extracción del jugo se realiza mediante un agitador doble paleta y las cascaras son expulsadas por medio de dos paletas soldadas al eje principal ubicadas a la salida de la máquina. Todos los materiales son de acero inoxidable o de grado alimenticio.

Finalmente se evalúan los costos de los materiales, manufactura y se determina la rentabilidad a comparación de las que se comercializan en el mercado nacional. Diseño de las piezas del prototipo usando el software de SolidWorks.

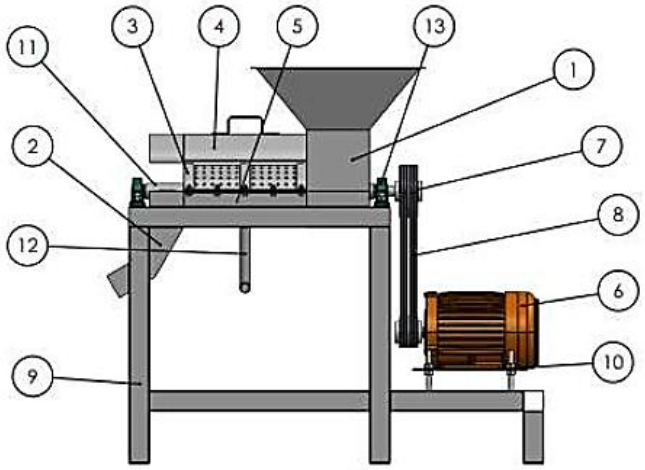


Figura 1. Componentes principales de la máquina.

Tabla 1. Accesorios de máquina.

Numero	Componente
1	Tolva
2	Tolva salida de los desechos
3	Tamiz
4	Tapa del tamiz
5	Base del tamiz
6	Motor eléctrico
7	Polea
8	Banda
9	Estructura
10	Base del motor
11	Eje
12	Tubería
13	Chumacera

2. Métodos.

Mediciones y características del limón persa.

Para el diseño de la maquina se realizaron diferentes pruebas de mediciones, las cuales corresponden al diámetro y el peso del limón (Hernández, 2016). Los resultados promedios fueron, diámetro = 5.91 centímetros y la masa = 99.33 gramos.

Figura 2. Mediciones del diámetro y masa del limón.

Para el cálculo de la potencia del motor se realizaron pruebas para conocer la resistencia a la compresión del limón, estas se realizaron mediante el uso de pesos conocidos, el resultado promedio es de 50 kilogramos para reventar el limón.

Figura 3. Medición de la resistencia a la compresión.

Modelado.

La mayoría de los elementos de maquina se modelaron con el software SolidWorks, así como los ensambles de los sistemas, estos se muestran en las figuras 4 y 5. Los nombres de los componentes se listan en la Tabla 1.

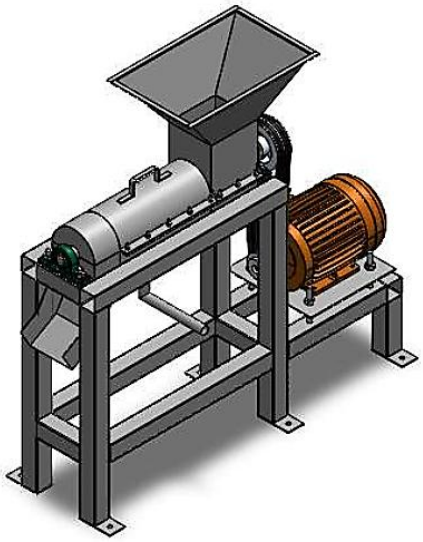


Figura 4. Modelado final de la máquina.

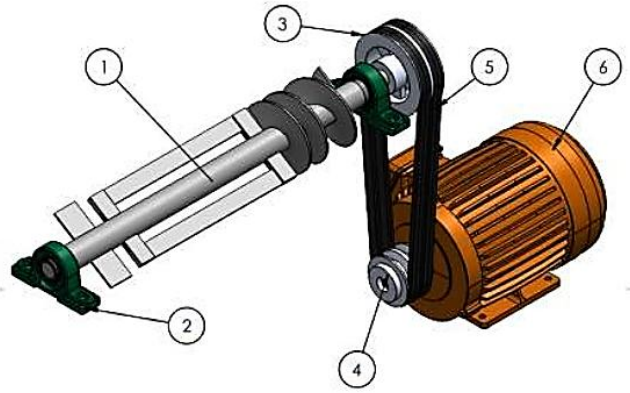


Figura 5. Sistema motriz de la máquina.

Cálculo potencia para selección del motor.

Se planteó una capacidad de extracción de 500 kilogramos por hora de limón persa que es igual a 139 gramos por segundo, los datos utilizados en este apartado corresponden al peso y resistencia a la compresión promedio. Para la selección del motor eléctrico de la máquina se consideraron los siguientes parámetros: velocidad angular de 280 rpm-1735 rpm y una potencia 1.16 hp-1.5 hp. Se selecciona un Monofásico Siemens Electromex 1.5 Hp 115-230v y 1735 RPM (Shigley, 2012).

Diseño del sistema de extracción.

El sistema de extracción de la maquina está conformado por cuatro elementos, el eje motriz, el tornillo sin fin, las paletas de despulpado y las paletas de remoción de cascaras, como se puede visualizar en la figura 6. Se realizaron los cálculos y simulaciones por el método de elemento finito para conocer el factor de seguridad de cada uno de los elementos (Bladimir, 2019).

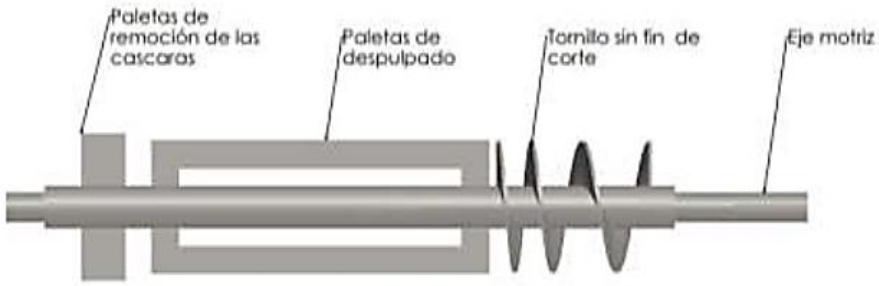


Figura 6. Sistema de extracción de la máquina.

Diseño del eje.

Para este análisis el eje está sometido a una carga distribuida w_1 generada por el peso de los elementos soldados y el peso de almacenamiento de la tolva, también está sometido a una fuerza P_1 generada por a las tensiones de las bandas, además está apoyado en dos chumaceras como se muestra en el diagrama de cuerpo libre. El eje fue modelado con un diámetro 38.1 mm. y una longitud de 0.701 m. Las masas de los elementos soldados al eje se obtuvieron por medio del software de SolidWorks, este valor es de 1.5 kg.

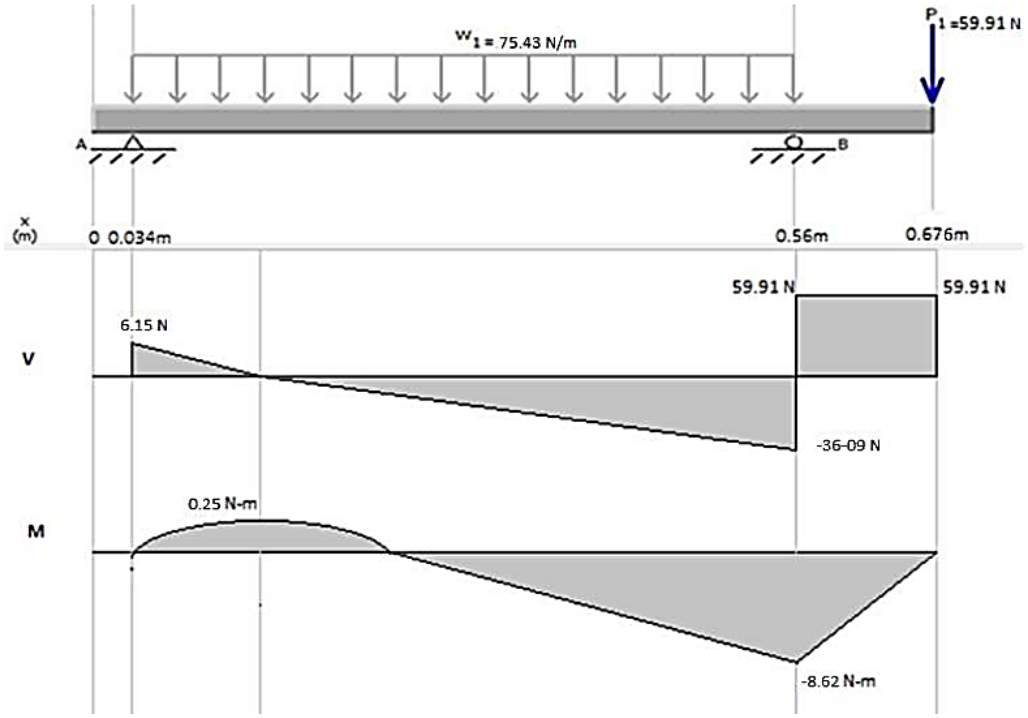


Figura 7. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes.

Los resultados son:

Esfuerzo normal por flexión: $\boldsymbol{\sigma_{xx} = 0.46\ MPa}$
Esfuerzo cortante por torsión: $\boldsymbol{\tau_{xy} = 1.639\ MPa}$

Esfuerzos de von Mises: $\boldsymbol{(\sigma_e)_a = 0.46\ MPa}$ y $\boldsymbol{(\sigma_e)_m = 2.83\ MPa}$

Se emplea acero inoxidable AISI 304, Sut = resistencia última =517.017 MPa y Sy=límite de fluencia = 206.807 Mpa

El límite de resistencia a la fatiga es $\boldsymbol{S_e = 117.29\ MPa}$

Empleando el criterio de Soderberg para fallas por fatiga:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

El factor de seguridad es n = 71

El análisis estático del eje por el método de elemento finitos mediante el software de SolidWorks arroja los siguientes resultados:

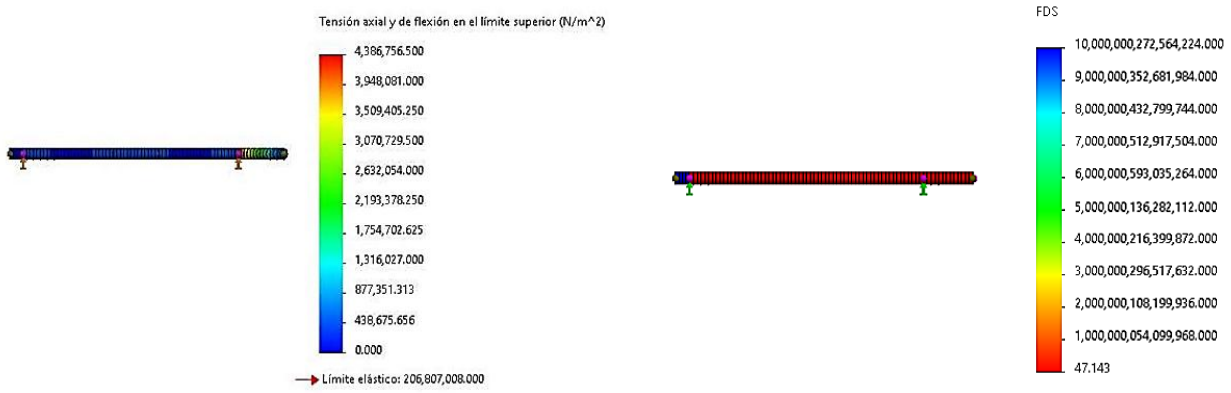


Figura 8. Modelado del eje en SolidWorks.

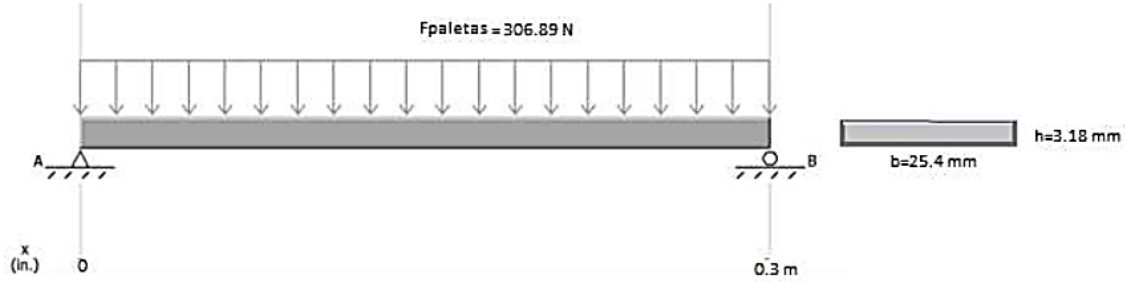
Diseño de las paletas de despulpado.

Las paletas generan un movimiento rotativo transmitido por un sistema formado por un motor, poleas, bandas y eje. Este movimiento rotativo es transmitido a la fruta previamente cortada, esta, con ayuda de las paletas entra en contacto con el tamiz, generando la salida del jugo de limón. Para el cálculo de la fuerza sobre las paletas se utiliza la potencia ya calculada. Las paletas de despulpado se modelaron con solera de acero inoxidable AISI 304 de 1 pulgada y calibre 1/8. Usando r = radio de las paletas en la ecuación

$$\boldsymbol{F_{paletas} = \frac{T}{r} = \frac{178\ N.m}{0.059\ m} = 306.89\ N}$$

La paleta está sometida a una carga distribuida de 306.89 N en sus 30 centímetros de longitud. Se analiza como una viga apoyada como se muestra en la figura 9.

Posteriormente se muestran los esfuerzos en la paleta de despulpado para el calculo del factor de seguridad (FDS o n_s). Se usa la resistencia de fluencia de 206.807 Mpa.



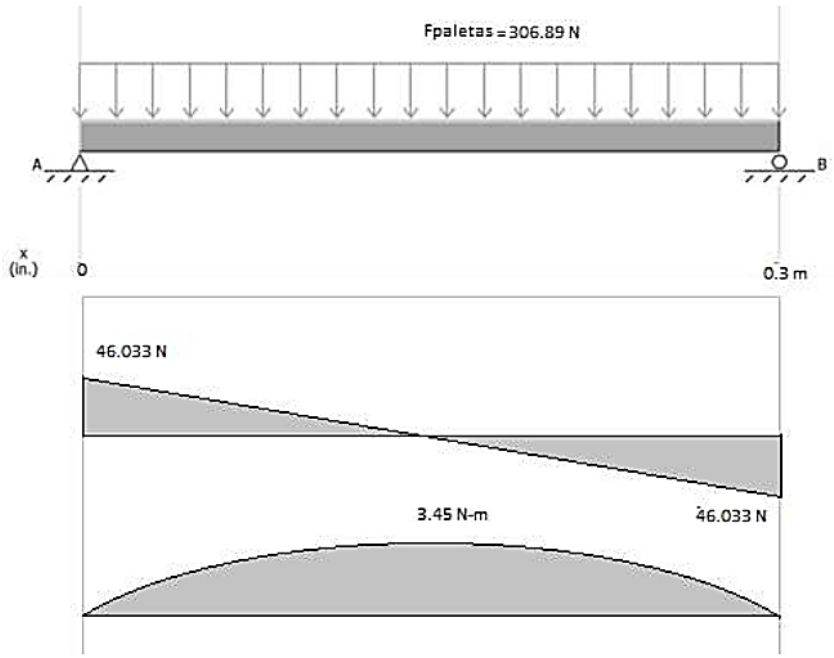


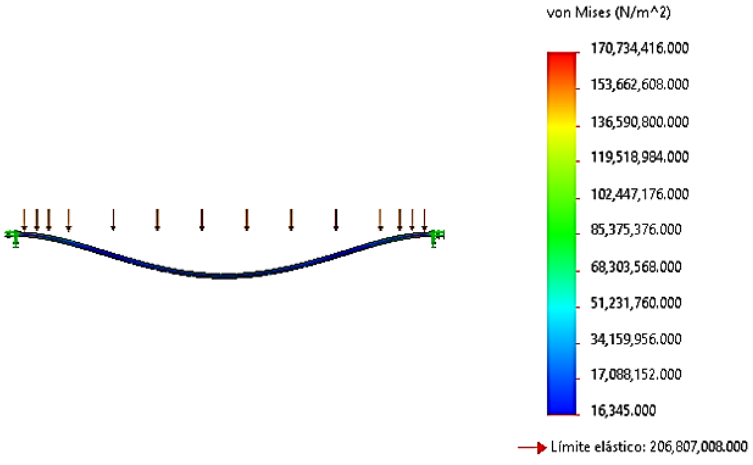
Figura 9. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes.

$$FDS = \frac{S_y}{\sigma_{xx}} = \frac{206.807\ MPa}{201\ MPa} = 1.03$$

El diseño es seguro.

Análisis de las paletas de despulpado en SolidWorks

A continuación, el análisis estático de las paletas por el método de elemento finitos mediante el software de SolidWorks, considerando los valores que observamos en la figura 10 (Shigley, 2012). Como resultado del análisis se obtienen las tensiones por el teorema von Mises y el factor de seguridad.



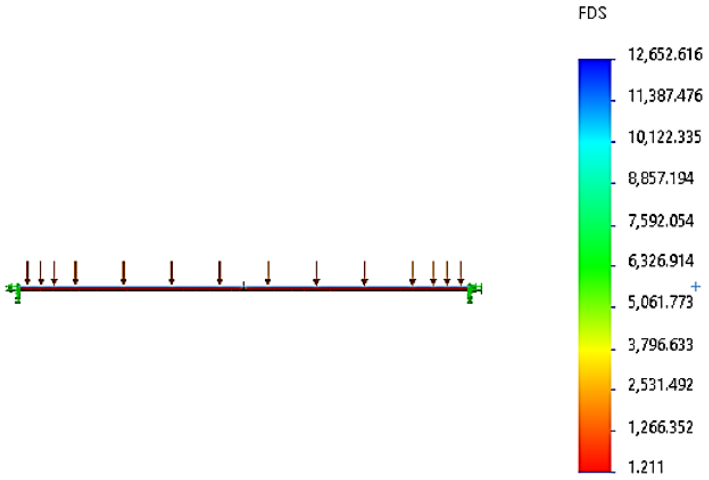


Figura 10. Esfuerzos de von Mises y factores de seguridad.

Diseño de las paletas de remoción de las cáscara.

Para el cálculo de las paletas, estas se consideran soldadas al eje y están sometidas a una fuerza P_1 = 306.89 N que corresponde a la fuerza generada con el par motor. El análisis se realiza como una viga en voladizo con el material antes especificado. Posteriormente se calcula el factor de seguridad de la pieza. Figura 11.

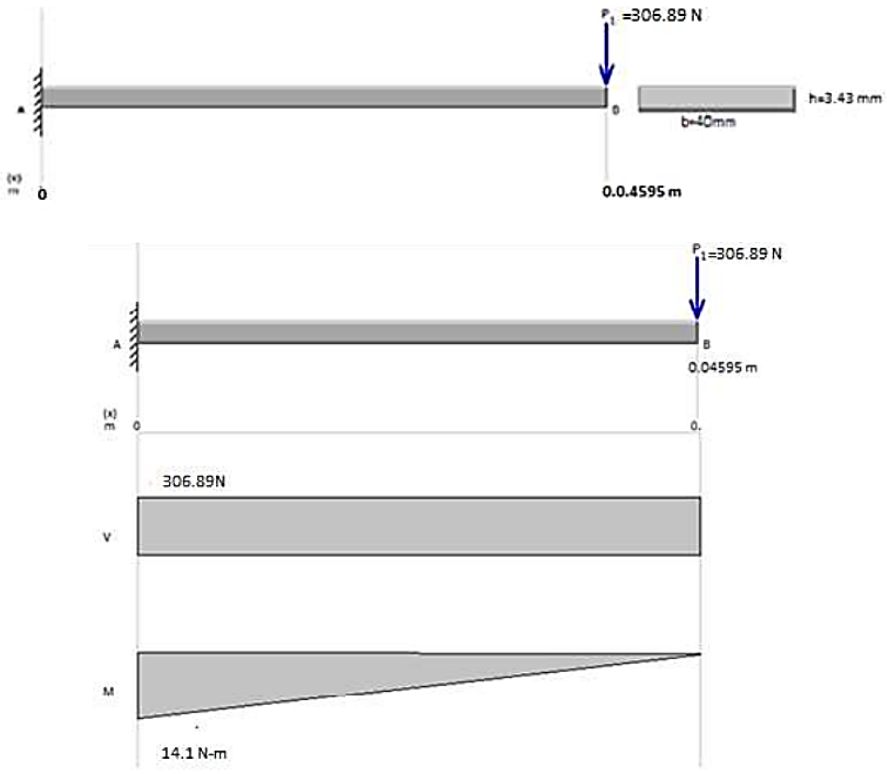


Figura 11. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos flexionantes.

$$FDS = \frac{S_y}{\sigma_{xx}} = \frac{206.807\ MPa}{183.45\ MPa} = 1.12$$

El diseño es seguro.

Análisis de las paletas de remoción de la cáscara en SolidWorks.

A continuación, el análisis estático de las paletas por el método de elemento finitos mediante el software de SolidWorks, considerando los valores que observamos en la figura 12. Como resultado del análisis se obtienen las tensiones por el teorema von Mises y el factor de seguridad (Gere, 2016).

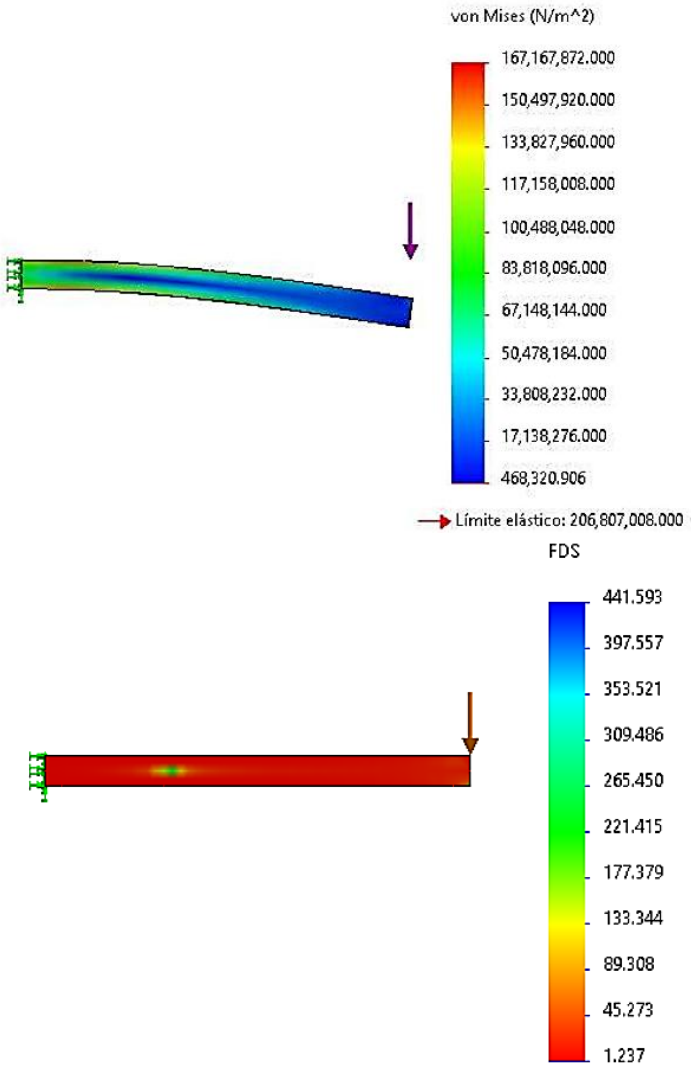


Figura 12. Esfuerzos de von Mises y factores de seguridad.

Análisis del tamiz en SolidWorks.

Para el análisis estático del tamiz por el método de elemento finitos mediante el software de SolidWorks, se consideran las fuerzas producidas las paletas. El análisis genera las tensiones tensión por el teorema de von Mises y el factor de seguridad. El tamiz fue diseñado de acuerdo con las dimensiones de las paletas de despulpado. Para el modelado se consideró las medidas de la solera de acero inoxidable con calibre de 1/8 y 1 pulgada. Figura 13.

Resultado	Mínimo	Máximo
Tensiones en von Mises	0.00002449 MPa	1.47 MPa
Factor de seguridad	140	8.44E6

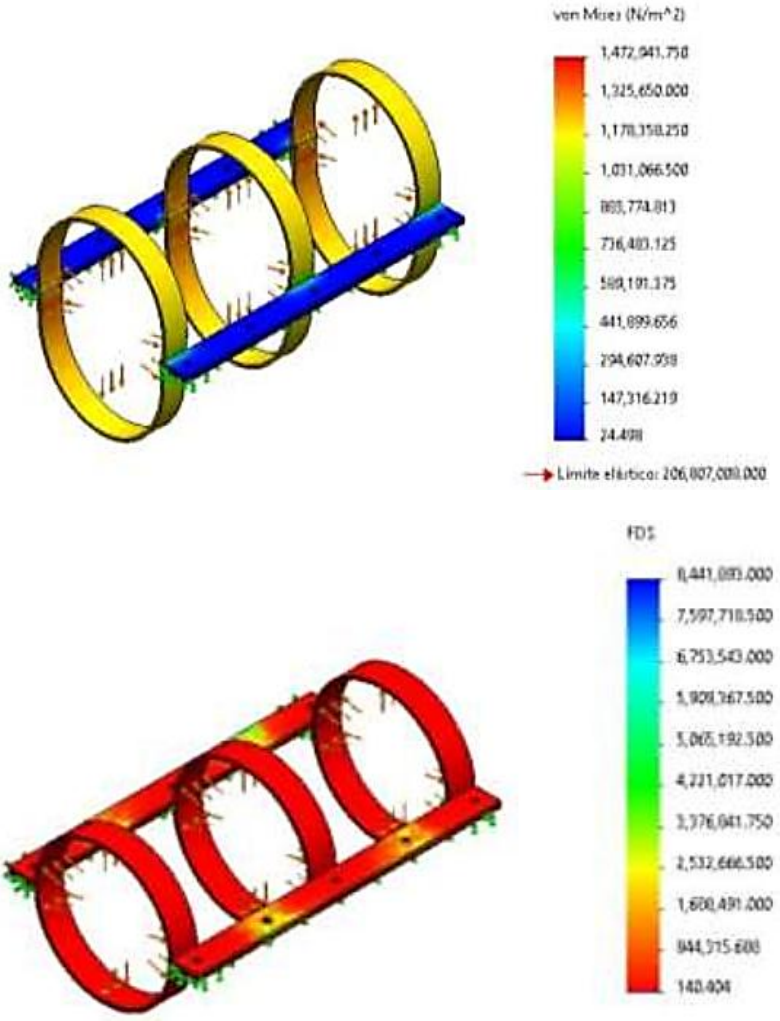


Figura 13. Esfuerzos de von Mises y factores de seguridad

Análisis de la tolva de salida de los desechos en SolidWorks.

La tolva de salida de los desechos está sometida a una carga de 60.72 N que corresponde al peso ejercido por el limón persa que almacena la tolva, como resultado del análisis obtenemos tensiones por el teorema de von Mises y el factor de seguridad (Gere, 2016). Para el modelado se consideró una lámina de acero inoxidable AISI 304 de 1.9 mm de espesor. Figura 14.

Resultados	Mínimo	Máximo
Tensiones von Mies	0.00634 MPa	11.38 MPa
Factor de seguridad	18.162	32,598.23

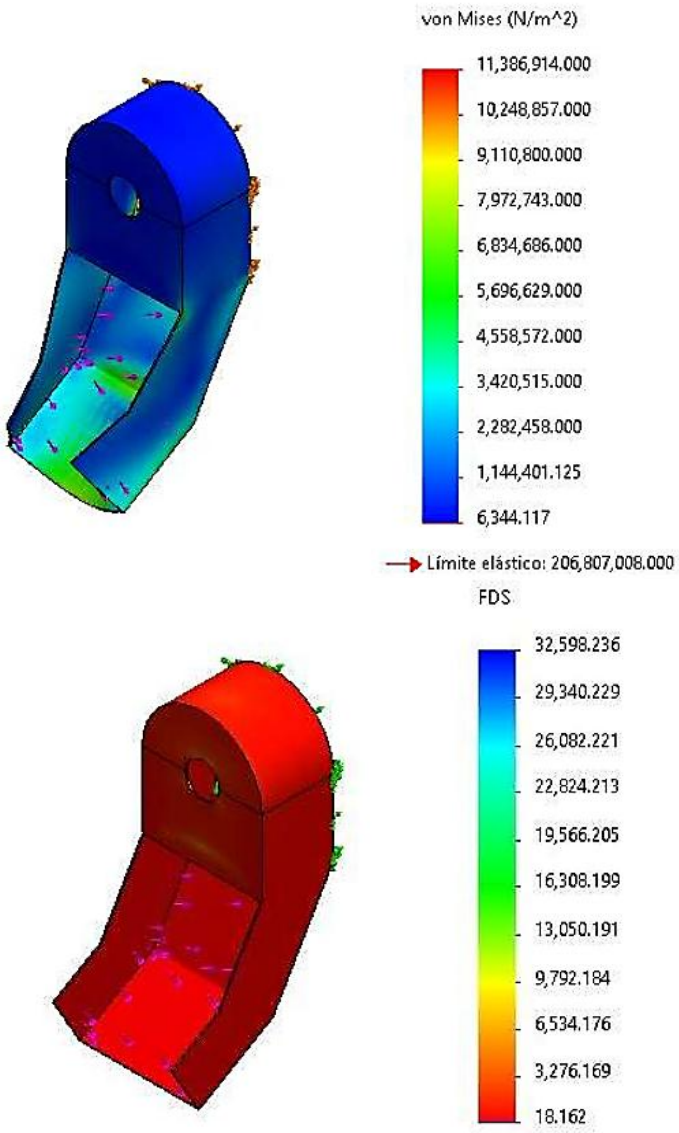


Figura 14. Esfuerzos de von Mises y factores de seguridad.

Análisis de la estructura en SolidWorks.

Para el análisis se toma la fuerza que ejerce el peso de la máquina y la capacidad de limón persa que almacena la tolva que corresponde 490.5 N, además la fuerza que ejerce el peso del motor peso del motor que corresponde 147.15 N, como resultado del análisis se obtienen la tensión axial y su factor de seguridad. Para el modelado de la estructura de utilizo PTR de 2 pulgadas de acero inoxidable calibre 16. Figura 15.

Resultado	Mínimo	Máximo
Tensiones axiales	2.14 Mpa	30.9 Mpa
Factor de seguridad	96.28	$10e15$

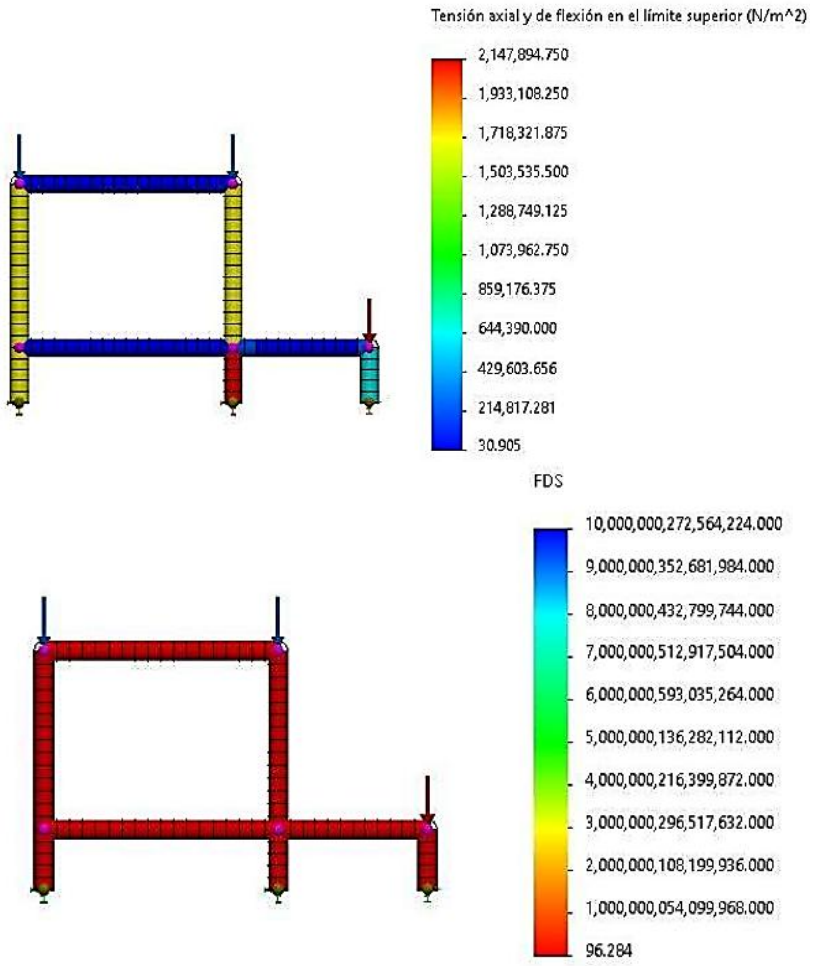


Figura 15. Esfuerzos de von Mises y factores de seguridad.

3. Desarrollo.

Los componentes de la maquina se ilustran en la figura1 y tabla 1 de este artículo. El funcionamiento de la máquina extractora de jugo de limón persa se describe en cuatro etapas (Bladimir, 2019):

- En la primera etapa se enciende el motor eléctrico, posteriormente se introduce el limón persa a través de la tolva, después de ser limpiada.

- En una segunda etapa, el limón persa es cortado por medio de un tornillo sinfín que además se encarga de trasportarlo hacia el tamiz.
- En la tercera etapa los trozos de limón persa pasan por unas paletas ajustadas al tamiz, encargándose de extraer el jugo, este se filtra por el tamiz y sale por una tubería a los recipientes de almacenamiento.
- En la cuarta y última etapa las cáscaras y vástagos son expulsadas por la parte delantera de la máquina.

Algunas recomendaciones y características de la maquina son:

- La máquina fue diseñada para introducir limones enteros de un diámetro máximo de 6 cm.
- Al ingresar la fruta por la tolva, se debe tener cuidado en no permitir el ingreso de pedazos de metales, rocas u otros objetos hacia el interior del cuerpo de la máquina.
- Por ningún motivo se debe apagar la máquina a la mitad del proceso, siempre se debe apagar cuando el proceso haya terminado.
- Una vez terminado el ciclo de trabajo de un día, se debe apagar la máquina y asegurarse de limpiar, de preferencia proyectar un chorro de agua desde la tolva alimentadora hasta el sistema de corte y exprimido.
- Evitar dejar residuos de pulpa ya que este se puede agriar y producir malos olores.
- Para tener una mayor fijación de la máquina y disminuir vibraciones, se recomienda anclar hacia el piso a las placas con pernos expansivos.
- Se debe tensar adecuadamente las bandas, para evitar patinamiento en las poleas.
- Mediante la elección del diámetro de perforación de la malla se podrá variar el grado de afinado del jugo según las necesidades.

El mantenimiento de la máquina se realiza con el siguiente cronograma:

Elemento	Operación	Diario	Semanal	Mensual
Estructura general	Limpieza	X		
Tamiz	Limpieza	X		
Tolva	Limpieza	X		
Eje	Limpieza	X		
Chumacera	Lubricación	X	X	
Banda	Revisión	X		X
Motor	Revisión	X		X

Conclusiones.

El diseño de esta máquina proporciona en el mercado nacional una alternativa a las diferentes máquinas que tienen como función la extracción de jugo, como se comentó, un factor negativo de estas de máquinas es el costo demasiado elevado. El desarrollo de este proyecto cumple con el propósito de diseño de un sistema de extracción de jugo para productores de limón persa de Tuxtla Gutiérrez y zonas de influencia, eficiente y económico.

El desarrollo está sustentado en la aplicación de teorías de diseño mecánico y validado mediante el diseño asistido por computadora, en particular se usa el software de SolidWorks.

Dentro de las ventajas de este equipo, se encuentran, el sistema de extracción de jugo para limón persa conformado con un motor eléctrico que es el encargado de trasmitir la energía al sistema, esta es transmitida mediante un sistema de poleas y bandas al mecanismo de extracción de jugo. El proceso de corte se realiza mediante un tornillo sin fin de paso variable, el despulpado o la extracción del jugo se realiza mediante un agitador doble paleta y las cascaras son expulsadas por medio de dos paletas soldadas al eje principal ubicadas a la salida de la máquina. Todos los materiales son de acero inoxidable o de grado alimenticio. Todos los materiales y accesorios se pueden adquirir en el mercado local, el mantenimiento es mínimo y es de fácil operación.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, al Departamento de Metal-Mecánica y a la Academia de ingeniería Mecánica.

Referencias bibliográficas.

Bladimir, S. B. (2019). *Diseño y construcción de una máquina despulpadora de frutas con una capacidad de 500 kg/h para la empresa productos suiza dajed cia.* ambato: Universidad técnica de Ambato.

Gere, J., & Goodno, B. (2016). *Mecánica de materiales. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.*

Hernández, S. (11 de agosto de 2010). *despulfruc-tpa.blogspot.com. Recuperado el 09 de enero de 2022, de* http://despulfruc-tpa.blogspot.com/2010/08/despulpadorade-futas-verduras-y.html.

Shigley, J. E. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica. México: Mc Graw Hill. Recuperado el 09 de enero de 2022*

Información de los autores.

Ignacio Arrioja Cárdenas es profesor de tiempo completo y jefe de proyectos de docencia en el departamento de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México. Doctor en Ingeniería aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Veracruz, Maestro en Ciencias Físicas por Centro Mesoamericano de Física Teórica-Universidad Autónoma de Chiapas e Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

José Manuel Rasgado Bezares es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez; ha trabajado en proyectos de construcción y ampliación de Centrales Hidroeléctricas como supervisor de obra electromecánica de la Comisión Federal de Electricidad. Actualmente es jefe del Departamento de Metalmecánica y docente en activo del claustro en la H. Academia de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México. Ha publicado dos libros

Erick Arrioja Castillo es estudiante del quinto semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Vitta Marlene Castillo Sánchez es Maestra en Ciencias de la Educación por el Colegio de Formación Educativa Tenam, es Ingeniera Industrial en Eléctrica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, actualmente es profesora de medio tiempo en el departamento de Ciencias Básicas del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Ha publicado 2 libros.

Saúl de Jesús Molina Domínguez es Ingeniero mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez de Chiapas, cuenta con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto tecnológico de Celaya Guanajuato, cuenta con Doctorado en Ingeniería Aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam.

Juan Carlos Niños Torres es Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, así también con el Doctorado en Ingeniería Aplicada de la Universidad TENAM. Actualmente es Profesor Investigador del Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y Jefe de la División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez del 2017-2023. Cuenta con el perfil PRODEP 2022-2025 como miembro del Cuerpo Académico Ingeniería Mecánica en la línea de investigación de Diseño Mecánico. Es miembro del comité de evaluadores del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI A.C.) avalado por CIEES desde 2016.

Diseño, simulación y análisis de un sembrador mecánico.

Design, simulation, and analysis of a mechanical planter.

Saúl de Jesús Molina Domínguez (1).
Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
saul.md@tuxtla.tecnm.mx.

Juan Carlos Niños Torres (2). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
juan.nt@tuxtla.tecnm.mx.

Ignacio Arrioja Cárdenas (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
ignacio.ac@tuxtla.tecnm.mx.

Fernando Alfonso May Arrioja (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
fernando.ma@tuxtla.tecnm.mx.

José Manuel Rasgado Bezares* (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
jose.rb@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 24, 2025; aceptado en diciembre 08, 2025.

En este proyecto se presenta el diseño de un sembrador mecánico enfocado a la agricultura chiapaneca que labora constantemente en el campo, siendo el cultivo y cuidado de este su actividad principal. El objetivo es desarrollar un sembrador mecánico apto para todo tipo de terrenos, pero en especial para suelo duro pedregoso y con pendientes, que en la región chiapaneca hay un gran numero de terrenos con estas características, donde las sembradoras modernas no pueden entrar a sembrar, para el diseño virtual del prototipo se utiliza una adaptación de la metodología de diseño mecánico de compartimentos de semillas, tubo y resortes. El diseño propuesto es validado mediante simulaciones en SolidWorks y algunos otros programas de computadora, comprobando el rango de resistencia en las piezas presentadas. Además, se realiza el análisis de elemento finito para cuantificar esfuerzos y deformaciones en el ensamble completo, verificando la selección de materiales para su manufactura.

Palabras claves: Barreta, diseño virtual, elemento finito, luvisol, SolidWorks.

Abstract.

This project presents the design of a mechanical planter focused on Chiapaneca agriculture that works constantly in the field, with crop cultivation and care being its main activity. The objective is to develop a mechanical planter suitable for all types of terrain, especially for hard, rocky soil with slopes, as there are a large number of areas with these characteristics in the Chiapaneco region, where modern planters cannot enter to plant. For the virtual design of the prototype, an adaptation of the mechanical design methodology for seed compartments, tubes, and springs is used. The proposed design is validated through simulations in SolidWorks and some other computer programs, confirming the strength range of the presented components. Additionally, a finite element analysis is conducted to quantify stresses and deformations in the complete assembly, verifying the material selection.

Keywords: Bar for planting, finite element, luvisol, SolidWorks, virtual design.

1. Introducción.

La agricultura en México es considerada una de las actividades económicas más importantes ya que genera una gran cantidad de empleos en el país. El sector productivo más importante desde el punto de vista económico, social y ambiental ya que de él dependen millones de personas para su alimentación básica, una población activa creciente y se mantiene y cuida el medio ambiente.

La siembra y el cultivo en la actualidad cuentan con nuevos métodos de manera que se adaptan a diversos medios y condiciones ambientales. Por esta necesidad han surgido diferentes productos para ayudar en estos procesos incluidos las máquinas, existen máquinas que ayudan al llenado y semillado de forma manual y semiautomática. El detalle de estas es el espacio que llegan a ocupar, así como el costo, mantenimiento y en ciertos casos hasta traslados nacionales e internacionales, como se puede observar en la figura 1.

Ante estos detalles negativos se llega a la necesidad de un nuevo diseño de sembrador con la finalidad de optimizar el tiempo de siembra, el costo y el tamaño de una máquina para sembrar haciendo un fácil uso práctico, también se reduciría la fatiga del campesino, aumentando su calidad de vida en el campo.

La siembra de forma manual al realizarse agujero por agujero es poco provechosa y requiere personas de gran experiencia en el ámbito de la siembre. Para esto se cuenta ya con diversas máquinas las cuales hacen el trabajo, pero la mayoría son de gran tamaño y significativo costo de adquisición y de mantenimiento, por lo cual se dio a la tarea de realizar el diseño y análisis de un sembrador mecánico con el cual se buscará disminuir el tiempo de sembrado al igual que el costo de producción, ya que el costo de mantenimiento será menor al de otras sembradoras grandes; también se mejoraría el rendimiento de las hectáreas cultivadas, obteniendo mayor rentabilidad.

Figura 1. El gran tamaño de maquinaria de siembra directa.

Tipos de agricultura.

En el neolítico se practicaba una agricultura itinerante (y que todavía hoy practican algunos pueblos primitivos), que consistía en abandonar las tierras una vez han sido agotados sus recursos y buscar nuevos suelos productivos. Actualmente la agricultura ha evolucionado hasta alcanzar carácter industrial, donde la ingeniería genética, química y tecnología mecánica juegan papeles fundamentales. Se tienen diversos tipos de agricultura a continuación, se mencionarán algunos, (Ortiz Cañavate), ver figura 2.

- Extensiva.
- Intensiva o industrial.
- Biológica.
- Parcelaria.

Figura 2. Tipos de Agricultura.

Sembradora.

La maquinaria para siembra o sembradoras es un grupo de máquinas empleadas para operaciones realizadas posteriormente a la preparación de tierras antes de que sean ejecutadas las operaciones de cosecha. La siembra consiste en la colocación en el terreno de cultivo de las semillas en las condiciones requeridas para su desarrollo, de acuerdo con estas condiciones tenemos diferentes tipos de siembra:

- Cultivo en toda la superficie: Se realiza cuando no es necesario dar labores durante toda o la mayor parte del tiempo de desarrollo de las plantas.
- Cultivo en líneas: Las plantas quedan colocadas en hileras, con el fin de dejar zonas libres para el paso de maquinaria.

Así también, la siembra tiene diferentes formas cómo realizarse: a voleo, en líneas o a chorrillo, a golpes y monograno, ver figura 3, (Ortiz Cañavate).

- Siembra de voleo.
- Sembradora en línea.
- Sembradoras a golpe y monograno.
- Sembradora fertilizadora tradicional mecánica de tiro animal.
- Sembradora manual de granos COA.

Figura 3. Sembradoras (Maquinac).

Grupos principales de suelos en México.

De acuerdo con el INEGI 2007, en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007). Dominan los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (SEMARNAT), ver figura 4.

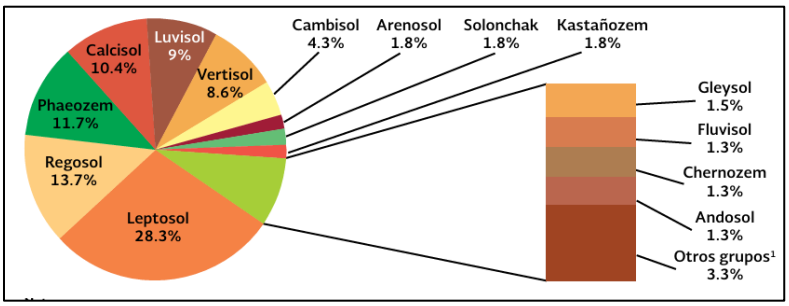


Figura 4. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México.

En México existe una gran diversidad edáfica representada por 26 grupos de suelo. Sin embargo, sólo seis de ellos, en conjunto ocupan el 81.7% del territorio. Algunas de las características de estos grupos principales se presentan a continuación: Los Leptosoles (del griego leptos, delgado), que se conocen en otras clasificaciones como Litosoles y Redzinas, son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Son los suelos de mayor distribución a nivel mundial (1 655 millones de hectáreas; IUSS, 2007) y están asociados a sitios de compleja orografía, lo que explica su amplia distribución en México. Estos suelos se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos), y son particularmente comunes en las zonas montañosas y en planicies calizas superficiales, como las de la Península de Yucatán. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar. Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que su uso agrícola es limitado si no se utilizan técnicas apropiadas, por ello, es preferible mantenerlos con la vegetación original, (SEMARNAT).

Los Luvisoles (del latín luere, lavar) son suelos que se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía. Son comunes en bosques de coníferas y selvas caducifolias del Sur del país. Se encuentran dentro de los suelos más fértiles, por lo que su uso

agrícola es muy elevado y cubre, por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar. Los Luvisoles se extienden por alrededor de 500 a 600 millones de hectáreas en el mundo (IUSS, 2007). En México, se encuentran en la Sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca, Campeche y la Península de Yucatán, entre otras regiones.

En México, sus colores más comunes son el negro o gris oscuro en las zonas centro y oriente del país y el café rojizo hacia el norte. Su uso agrícola particularmente de riego es muy extenso variado y productivo. Ocupan gran parte de los principales distritos de riego en Sinaloa, Sonora Guanajuato, Jalisco, Tamaulipas y Veracruz. Se utilizan para la producción de caña, cereales hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. Para mayor compresión véase la siguiente figura 5.

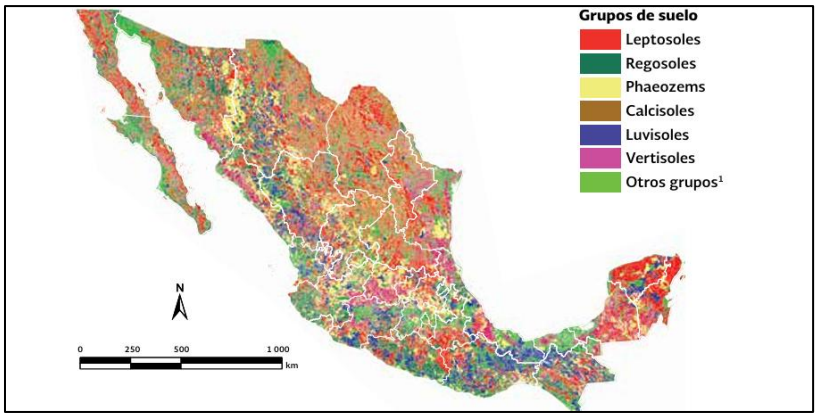


Figura 5. Principales grupos de suelo en México, 2007.

Principales tipos de suelos en Chiapas.

En la siguiente figura se puede observar la edafología del estado de Chiapas, en la cual se puede observar los diferentes suelos que predominan en cada parte de la antes mencionada, ver figura 6.

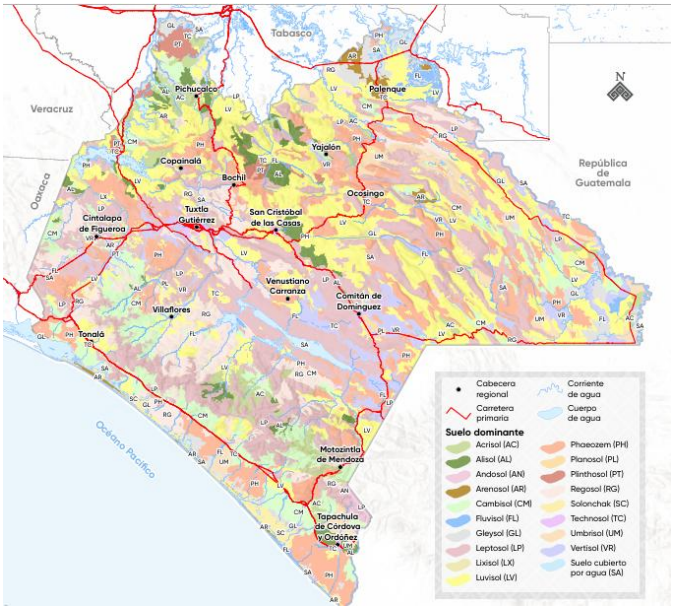


Figura 6. Principales grupos de suelo en el Estado de Chiapas.

- Leptosol Cálcico y Luvisol Gleyico. Suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas como los altos de Chiapas y el extremo sur de la sierra Madre Occidental.
- Andosol y Acrisol Haplico. Ligeramente tierra negra. Suelos de origen volcánico constituidos por ceniza, la cual contiene alto contenido de alófano, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo.
- Nitisol Haplico. Suelos de colores rojizos muy brillantes y enriquecidos de arcilla en todo su espesor, por lo menos hasta 150 cm de profundidad.
- Regosol Calcárico y Éutrico. Suelos con poco desarrollo y por ello no presentan capas diferenciadas entre sí. Son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen.
- Alisol Férrico. Son los Acrisoles que no son fuertemente húmicos, presentan propiedades férricas a menos de 125 cm de profundidad; no tienen plintita a menos de 125 cm de profundidad y no tienen propiedades gleyicas a menos de 100 cm de profundidad. Son conocidos por los agricultores como “tierras rojas” o “barros rojos”.
- Cambisol Vértico y Éutrico. Suelos jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en las zonas áridas. Presentan una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y pequeñas acumulaciones de arcilla, fierro o manganeso y carbonato de calcio.
- Arenosol Cámbico. Se localizan principalmente en las zonas tropicales o templadas muy lluviosas del sureste de éxico. Vegetación variable. Textura gruesa, más del 65% de arena al menos en el primer metro de profundidad.
- Vertisol Éutrico. Tienen un porcentaje de saturación de bases determinada por acetato de amonio, de 50% o más, al menos entre 20 y 50% de profundidad; no presentan horizonte cálcico o gipsyco. Reciben el nombre de “barriales” o “atascaderos” (CEIEG).

Como podemos observar hay muchos diseños de sembradoras para grandes y pequeños cultivos, pero en la realidad Chiapas cuenta con tierras donde no todo es planicie, son montañas rocosas, subidas y bajadas. Es por esto de la necesidad de diseñar el sembrador para terrenos donde no pueden entrar maquinas modernas.

2. Métodos.

Método de elementos finitos (MEF).

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero estructuralista resolver infinidad de problemas. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad, posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril que se le supone al calculista, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico.

El proceso de análisis de un problema físico mediante elementos finitos se muestra en la figura 7. La geometría puede ser definida por el analista o creada a partir de algún programa CAD. El segundo paso consiste en definir el modelo matemático a resolver. Este es el paso fundamental donde se especifica el tipo de ecuaciones a determinar, las condiciones de borde, propiedades materiales, y otros detalles acerca del método en sí mismo. Una vez efectuada dicha definición el programa resuelve automáticamente las ecuaciones pertinentes y provee los resultados en una forma apropiada para el analista, (De Castro P).

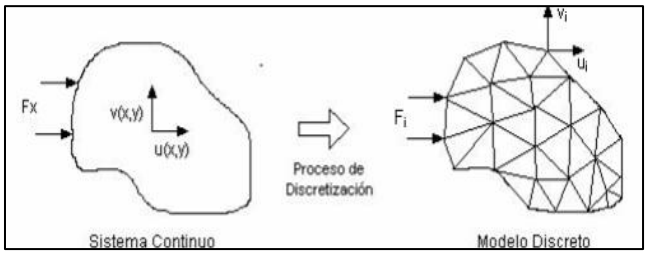


Figura 7. Modelación por elemento finito.

Su idea básica no puede ser más sencilla: dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales); posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, podríamos determinar, de una forma aproximada como ya se dijo antes, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

Las posibilidades del método no sólo se limitan a casos bidimensionales, sino que también, permite analizar problemas tridimensionales: podemos analizar cualquier pieza de cualquier geometría, obteniendo el campo tenso-deformacional en su interior, y así luego poder comprobar que la pieza analizada cumple con los requisitos estructurales que esperábamos de ella. En general, en un problema a analizar por el Método de los Elementos Finitos, conoceremos las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los valores de los desplazamientos en otros (dependiendo de las ligaduras que posea el sólido, ver figura 8). La clave del método está en que, tras su aplicación, obtendremos una expresión del tipo, (De Castro P).:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad \text{..... Ecuación 1.}$$

Donde:

{F} = vector columna, conocido como vector de cargas, están todas las fuerzas exteriores (directamente aplicadas y reacciones producidas por ligaduras) que actúan sobre el sólido.

{u}= denominado vector de desplazamientos nodales, que representa, de manera ordenada, todos los desplazamientos que experimentan los nudos del modelo.

[K] = matriz de rigidez del sistema estructural, cuya formación constituye el "corazón" del método.
Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo.

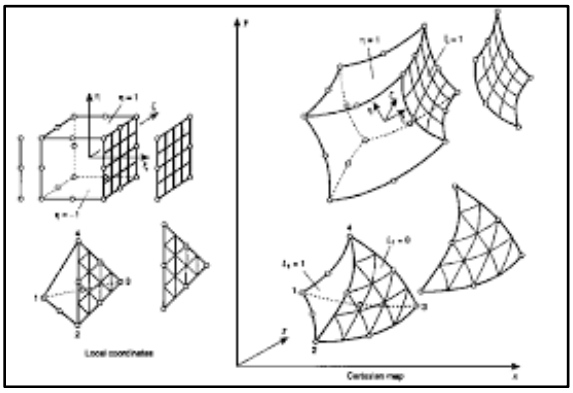


Figura 8. Casos tridimensionales con elementos finitos.

Como ya se ha comentado, se ha determinado que el criterio de tensiones que se utilizará será la teoría de la energía de distorsión o teoría de Von Mises, también se analizaron las teorías aplicadas sobre un elemento general de esfuerzo bidimensional, para determinar cuál será la más completa de forma global, y utilizarla para nuestro estudio. En la siguiente figura se muestra el estado tensional para un elemento de una pieza sobre un plano. A continuación, se mostrará los criterios considerados en la elección del análisis a fatiga. Como primera opción se ha escogido esta teoría por su interés histórico ya que sus predicciones no concuerdan con la experimentación y en algunas condiciones de esfuerzos, nos sitúa del lado de la inseguridad. Esta teoría establece que la falla se produce siempre que el esfuerzo principal mayor sea igual a la resistencia. También conocida como Teoría de Tresca (De Castro P). Establece que la fluencia del material se produce por el esfuerzo cortante, surgió de la observación de la estricción que se produce en una probeta cuando es sometida a un ensayo de tensión. La teoría dice: "La falla se producirá cuando el esfuerzo

cortante máximo absoluto en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo cortante máximo absoluto de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento que se produce la fluencia, ver figura 5".

El esfuerzo cortante máximo absoluto es entonces:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1)$$

Por lo tanto, el esfuerzo cortante máximo absoluto es entonces para el ensayo de tensión al momento de la fluencia:

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2} \quad (2)$$

Según la teoría de Tresca, igualamos las ecuaciones 1 y 2 y tenemos:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{S_y}{2}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = S_y \quad (3)$$

La ecuación 3 se utiliza cuando $\sigma_1 > \sigma_3$. En los otros casos:

$$\sigma_1 = S_y, \text{cuando} \quad \sigma_1 > \sigma_3 > 0$$
$$\sigma_3 = -S_y, cuando\ 0 > \sigma_1 > \sigma_3 \quad (4)$$

En el plano $\sigma_1 - \sigma_3$, la teoría de Tresca se representa gráficamente como, ver figura 9:

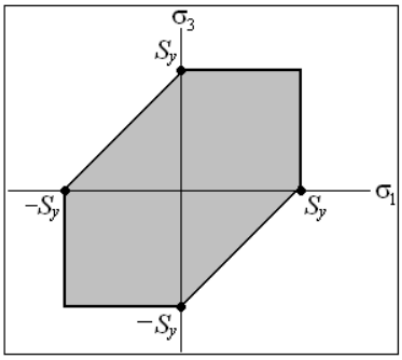


Figura 9. Representación gráfica de la Teoría de Tresca.

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos σ_1 y σ_3, se encuentra fuera del área sombreada en la figura 3 (De Castro P.).

Teoría de la energía de distorsión o Von mises.

Esta teoría fácil surgió de la observación de que los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos hidrostáticos (igual esfuerzos de tracción o compresión en todas las direcciones), tenían resistencias de fluencia muy superiores a los valores obtenidos por tracción simple. Se basa en suponer que la tensión a la que está sometido un elemento en estado de esfuerzo triaxial (a), en el que se produce cambio de volumen y distorsión, podemos descomponerlo en dos elementos distintos.

Elemento de estado de tensión hidrostática, en el que solo hay cambio de volumen (b). Elemento en el que se produce deformación angular sin cambio de volumen (c). Analizando la figura anterior, el trabajo efectuado en el cubo unitario de cada una de las direcciones principales es (Rivera Berrí):

$$u_n = (\sigma_n * \varepsilon_n)/2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Donde:
n=direcciones principales.
Así la energía total de deformación es:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = u_v + u_d = \left[\frac{\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2U\,(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_3\sigma_1)}{2E}\right] \ldots. \quad (6)$$

Siendo:
$E =$ módulo de elasticidad.
μ= coeficiente de Poison.
$u_v\ y\ u_d$ = energía de deformación que produce cambio de volumen y sólo deformación angular sin cambio de volumen respectivamente.

Podemos definir el esfuerzo medio hidrostático como:

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3}{3} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Los esfuerzos restantes $\sigma_n - \sigma_{med}$ provocarán únicamente distorsión por lo que la cantidad de energía de deformación que sólo produce cambio de volumen es:

$$\mu_v = \left[\frac{1}{2E}\right]\left[3\sigma_{med}^{\theta 2} - 2\mu\left(3\sigma_{med}^2\right)\right] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Por ello se obtiene que la energía de distorsión o deformación angular sin cambio de volumen sea:

$$u_d = u - u_v = \left(\frac{1+\mu}{3E}\right)\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}\right] \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

En el supuesto de un ensayo de tracción simple ($\sigma_1 = S_y\ y\ \sigma_2 = \sigma_3 = 0$) tendremos:

$$u_d = \left[\frac{1+\mu}{2E}\right] S_y^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

Igualando, se define el punto de iniciación de fluencia que será:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Para un estado de esfuerzo biaxial tendremos:

$$S_{sy} = \sigma_1^2 - \sigma_2\sigma_1 + \sigma_2^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Para el caso de torsión pura:

$$S_{sy} = 0.577 S_y \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

3. Desarrollo.

A continuación, se observa el primer prototipo realizado del sembrador mecánico cuyo objetivo es llevar a cabo sembrar de forma que se pueda ahorrar tiempo y esfuerzo humano al realizar dicha labor. El prototipo virtual fue realizado en un software comercial y se puede observar cada parte del mecanismo. ver figura 10.

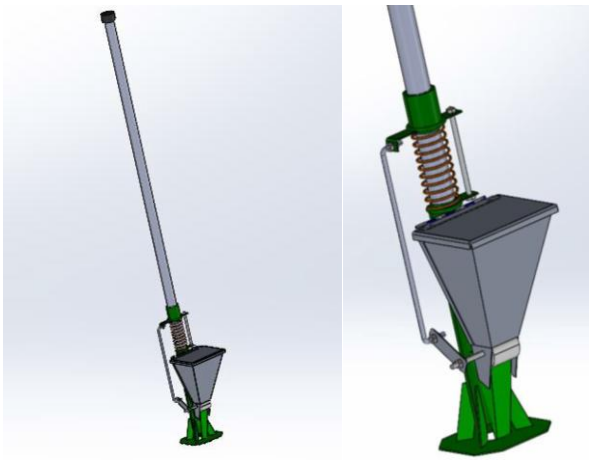


Figura 10. Vista detallada del mecanismo del primer prototipo diseñado.

El funcionamiento del primer prototipo es el siguiente: cómo se puede observar en la figura anterior a este sembrador se sujetaría de la parte superior, es decir del tubo o mango para después ejecutar la acción de sembrar lo cual significa golpearlo con el suelo para perforar la tierra y es aquí donde el mecanismo funciona para poder disipar las semillas de manera autónoma, el funcionamiento es el siguiente:

Al ejecutar la acción de sembrar lo primero que tiene contacto con el suelo es una pequeña base en la parte inferior del sembrador como se muestra a continuación en la figura 11.

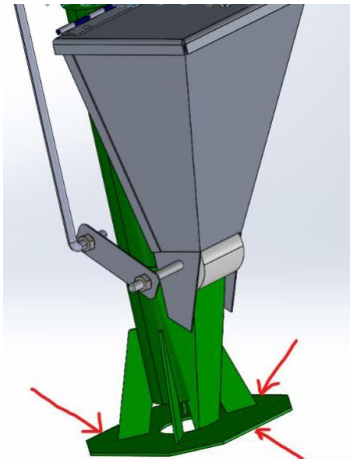


Figura 11. Parde del sembrador que golpea con el suelo.

Para después accionar el mecanismo el cual comienza por comprimir el resorte lo cual expone la punta de la barreta que perforara el suelo, por otra parte, la compresión del resorte accionara el mecanismo que dispensara las semillas que se desee sembrar ver figura 12.

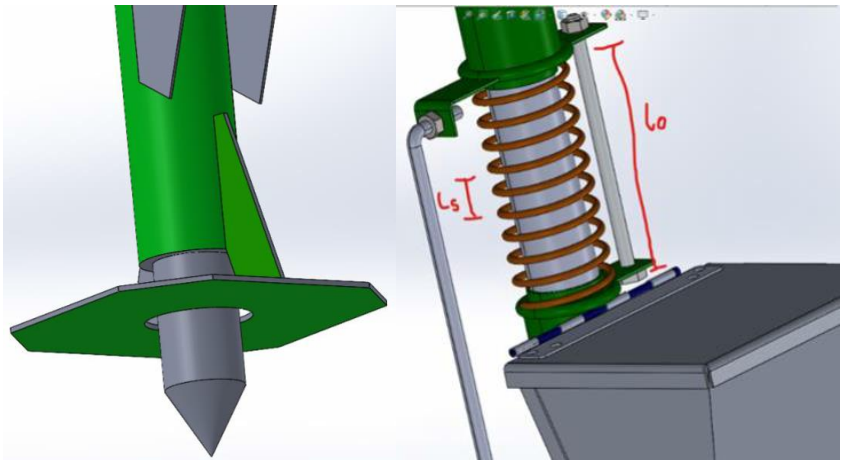


Figura 12. Punta de la barreta que entra al suelo y Posición inicial del resorte.

Posteriormente las semillas pasaran a una guía para finalmente caer al orificio provocado por la barreta y así ser guiada hasta la parte final, ver figura 13.

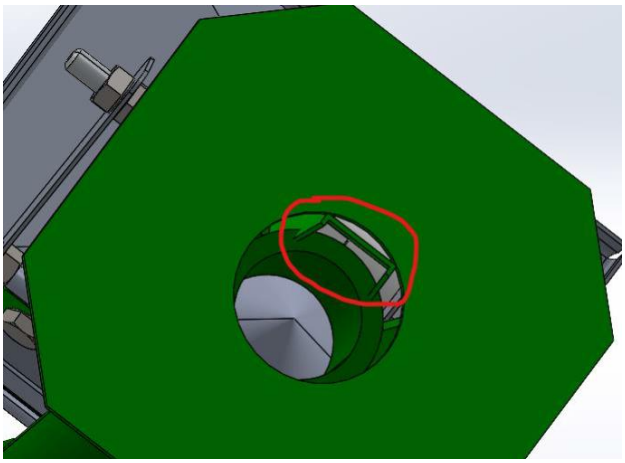


Figura 13. Guía para semilla.

Propuestas de mejora del sembrador mecánico.

Observando el sembrador mecánico ya ensamblado se pueden hacer ciertos análisis para que de alguna manera se pueda probar su funcionalidad en este caso al analizar dicho prototipo se detectaron algunas cosas que se pueden mejorar para que de alguna manera el sembrador pudiera ser más funcional.

Recomendaciones.

- En la primera propuesta se pretende cambiar la forma del depósito de semillas y reducir su tamaño ya que no se necesita que se lleve muchas semillas por lo que de manera externa habrá una machina abasteciendo se semillas cada vez que el depósito se valla vaciando, ver figura 14.
- Se observo que el Tamaño de los pernos no era suficiente así que cambiaron algunos diámetros y medidas.

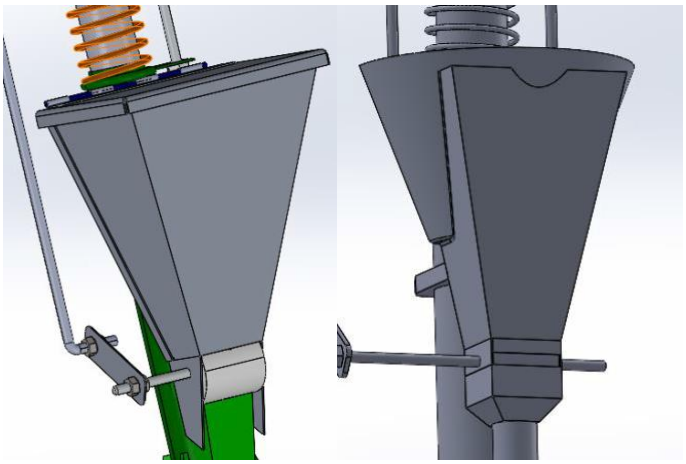


Figura 14. Depósito de semilla antes de remodelación y después de remodelación

- También ser realizaron algunas modificaciones para las bases del resorte ya que también se le aumento el diámetro a la barreta por lo tanto surgieron modificaciones en las bases.
- Consiste en cambiar la posición de la muesca en el tambor, este se encargará de rotar y dejar caer las semillas.
- Este cambio fue vital ya que se pretende cambiar el diámetro de la barreta que perforara el suelo y el diámetro anterior era muy pequeño así que se optó por hacer algunas modificaciones a las medidas de este.

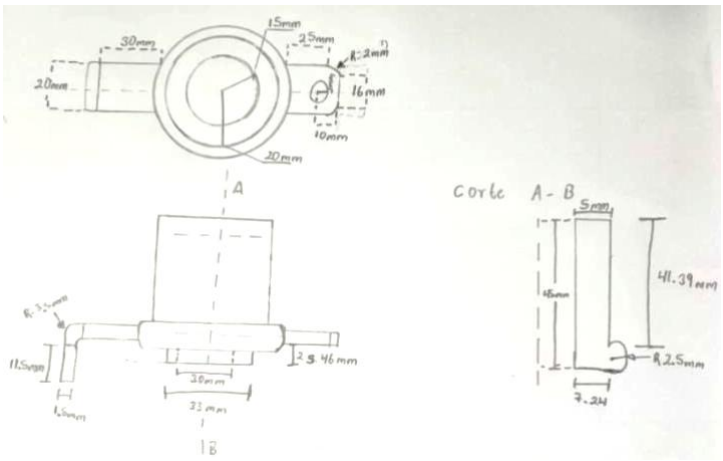


Figura 15. Cotas de la base.

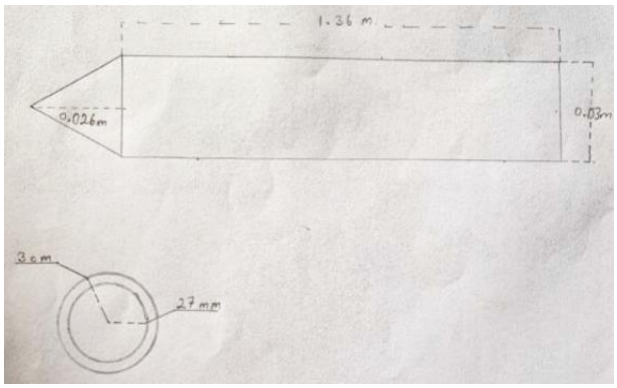


Figura 16. Medidas de barreta.

Propuestas de mejora del sembrador mecánico rediseñado.

Se opto por descartar la base que mantiene contacto con el suelo ya que consideraba un diseño deficiente y ahora se optó por una palanca que comprima el resorte y accione el mecanismo, ver figura 17.

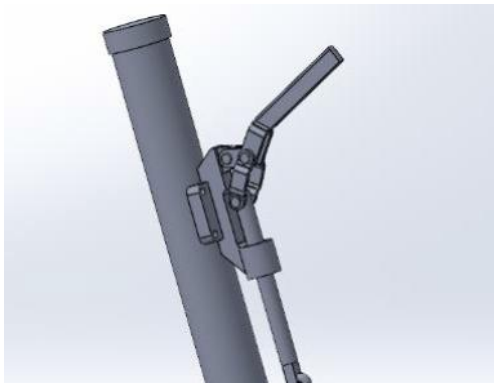


Figura 17. Palanca para accionar el resorte.

También se pensó en subir o modificar la altura del depósito de semillas ya que anteriormente estaba hasta abajo, pero por condiciones de equilibrio se pensó en subir la altura de este, ver figura 18.

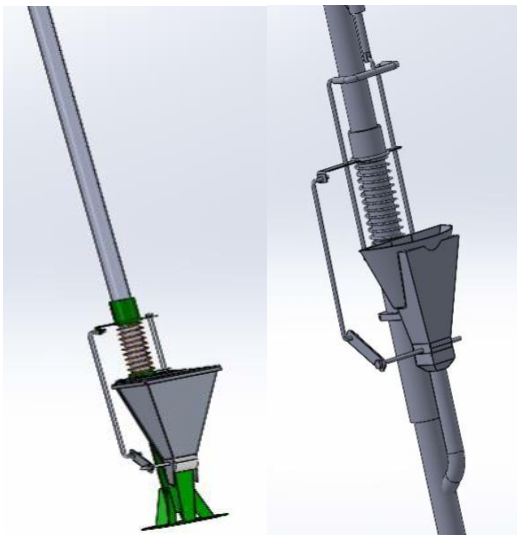


Figura 18. Depósito de semillas antes y después de la modificación.

Se le anexo un mecanismo para unir la parte de la palanca con la base inferior del resorte para efectuar el movimiento compresión de este. Se le agrego una ranura para que la guía de la semilla realice el recorrido provocado por la compresión del resorte, véase la figura 19.

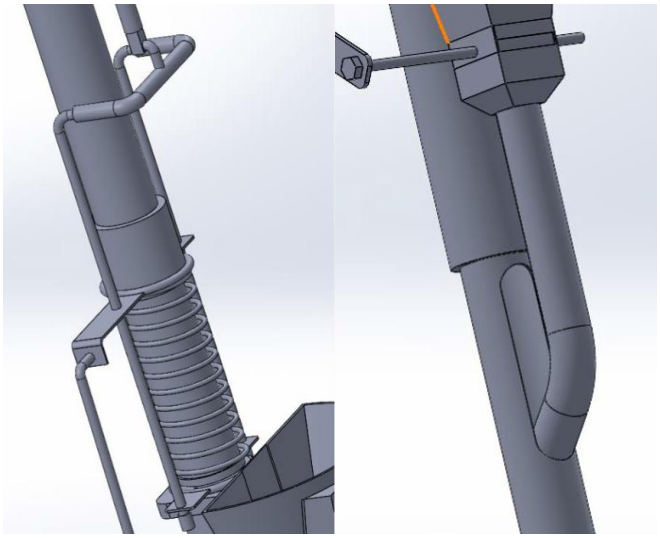


Figura 19. Mecanismo para realizar la compresión y ranura guía de semilla.

Modelado Final.

El ultimo diseño presentado del sembrador mecánico ha sido posible gracias a cada uno de los pasos seguidos durante la metodología ya que estos han sido claves para el desarrollo del prototipo que se rediseñó. Durante cada paso previsto, la construcción del prototipo mediante el software comercial SolidWorks, nos ha arrojado diversas características que son importantes para el análisis de la posible construcción del sembrador mecánico, ya que gracias a este software podemos darnos la idea del cómo se propagaran los esfuerzos en el mecanismo así como sus puntos críticos de máximo esfuerzo para que de esta manera se pueda diseñar de la mejor manera y elegir los materiales adecuados para que cumpla con su funcionamiento, ver figura 20.

Figura 20. Diseño final del sembrador mecánico.

A continuación, se presenta el prototipo final del sembrador mecánico sometido a un análisis estático para observar el comportamiento de los esfuerzos y deformaciones a los que se someterá, este análisis se hace con 3 fuerzas diferentes las cuales son 36 N, 64 N Y 125 N ya que se pretende que esto sea el rango de la fuerza a la que se someterá el sembrador en la práctica.

Modelado y análisis de sembrador mecánico, sometido a 36 N, 64 N Y 125 N.

Se observan las simulaciones de análisis estáticos del sembrador mecánico para una fuerza de 36 N de los cuales los resultados fueron:

1. Tensiones de Von Mises. (ver Figura 21)
2. Desplazamientos. (ver Figura 21)
3. Deformaciones unitarias. (ver Figura 22)
4. Desplazamientos (Y). (ver Figura 22)

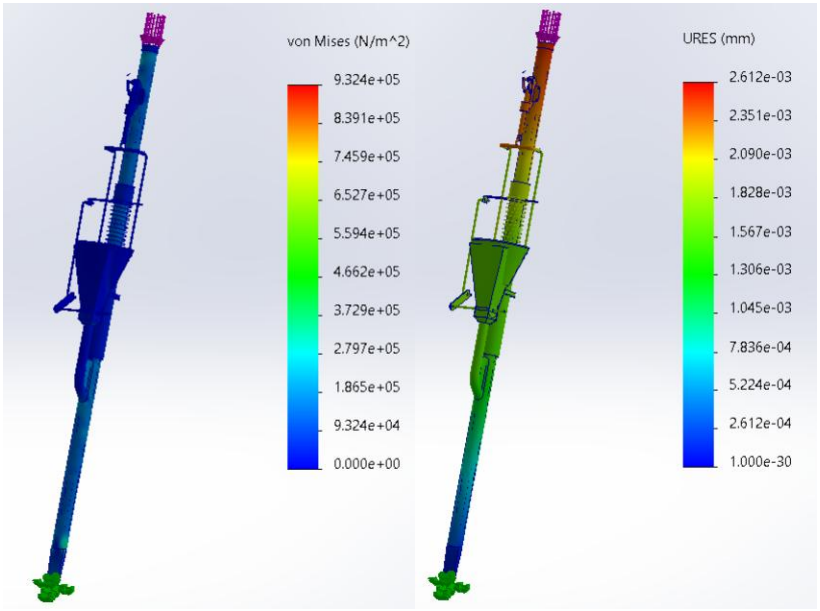


Figura 21. Tensiones de Von Mises y desplazamientos.

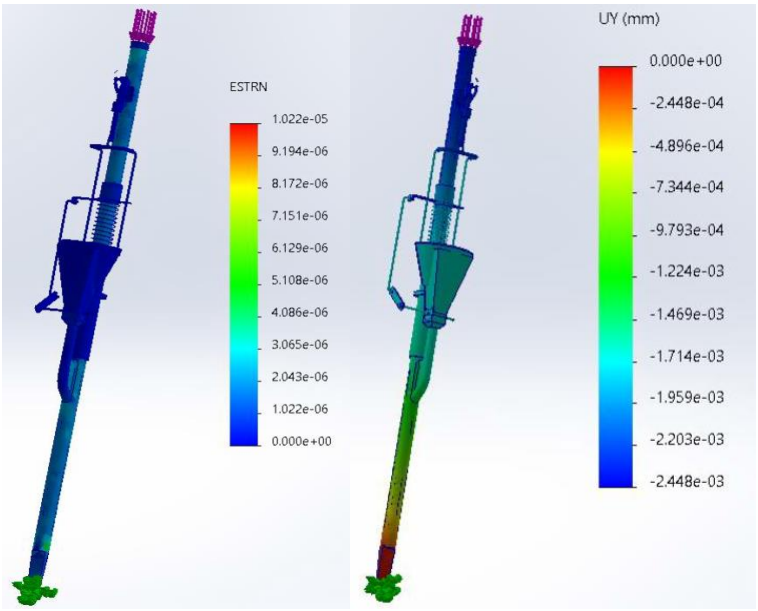


Figura 23. Deformaciones unitarias y desplazamientos en Y.

En los resultados obtenidos la barreta no sufre grandes deformaciones y esfuerzos, el material soporta las cargas asignadas a todo el ensamble.

Conclusiones.

Después de muchas propuestas de diseño finalmente pudimos optimizar uno de ellos y adecuarlo a las necesidades requeridas, este diseño fue posible gracias a una amplia investigación realizada sobre el tema de la agricultura ya que en este sembrador intervienen algunos mecanismos como la palanca y el mecanismo despachador de semillas que fue donde surgieron más detalles y se fueron mejorando cumplir con el objetivo del sembrador mecánico, otra problemática a la que nos pudimos enfrentar fue el tipo de suelo al que el sembrador debería tener aplicación ya que investigando sobre el tipo de suelos que existen en Chiapas nos dimos cuenta que este factor no es constante ya que existen suelos más suaves y a las ves también hay suelos más pedregosos por lo que para este último se debería aplicar más fuerza y eso fue un factor al elegir materiales ya que toda la estructura debe soportar los impactos requeridos para cumplir con la función que el sembrador fue diseñado. Después de todo esto podemos decir que se logró implementar con un diseño satisfactorio que cumple con nuestros objetivos antes propuestos.

Recomendaciones.

Si bien el diseño del sembrador mecánico ya es funcional, aún existen algunas posibles mejoras que pudieran facilitar aún más las tareas que conlleva la agricultura, a continuación, se presentan algunas de ellas.

• Palanca: de alguna manera se puede mejorar la ergonomía de la palanca que acciona el mecanismo disipador de semillas para que su uso sea más cómodo.
• Materiales: aún podría mejorarse los materiales con los que está hecho con la intención de reducir más el peso del sembrador mecánico y su manipulación sea más cómoda.
muy bien, complementando los conocimientos teóricos comprendidos en la escuela con los prácticos al diseñar el sembrador mecánico.

Referencias bibliográficas.

CEIEG, Comités Estatales de Información Estadística y Geográfica, https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/storage/posts/productos/MAPASTEM/EDAFOLOGIA.pdf

De Castro P. Carlos A. *Teorías de falla bajo cargas estáticas.* http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Teorasdefallabajocargasestticas.pdf.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos* No. 103. FAO. Roma. 2007. https://www.fao.org/4/a0510s/a0510s00.htm

ORTIZ, J. (1989). Las máquinas agrícolas y su aplicación. España: Editorial Mundi Prensa. https://es.scribd.com/document/528841172/322571994-Las-Maquinas-Agricolas-y-Su-Aplicacion-Escrito-Por-Jaime-Ortiz-Canavate-PDF

semarnat.gob.mx, https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008_ing/pdf/cap_3_suelos.pdf

Rivera Berrí Juan G. *Resistencia de materials, transformacio de esfuerzos y deformaciones,* Capitulo 2 y 6 (2023). Red educativa digital Descartes, Cordoba España. https://prometeo.matem.unam.mx/recursos/VariosNiveles/iCartesiLibri/recursos/Resistencia_de_Materiales/index.html.

Información de los autores.

Saúl de Jesús Molina Domínguez, es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez de Chiapas, cuenta con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto tecnológico de Celaya Guanajuato, cuenta con Doctorado en Ingeniería Aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam.

Juan Carlos Niños Torres, es Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, así también con el Doctorado en Ingeniería Aplicada de la Universidad TENAM. Actualmente es Profesor Investigador del Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y jefe de la División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con el perfil PRODEP 2022-2025 como miembro del Cuerpo Académico Ingeniería Mecánica en la línea de investigación de Diseño Mecánico. Es miembro del comité de evaluadores del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI A.C.).

Ignacio Arrioja Cárdenas, es profesor de tiempo completo y jefe de proyectos de docencia en el departamento de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México. Doctor en Ingeniería aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Veracruz, Maestro en Ciencias Físicas por Centro Mesoamericano de Física Teórica-Universidad Autónoma de Chiapas e Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Fernando Alfonso May Arrioja, Licenciado en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Energías Renovables por la Universidad Politécnica de Chiapas y Doctorado en Ingeniería Aplicada en el Colegio de Formación Educativa Tenam. Profesor de Carrera Enseñanza Superior en el Departamento de Metal-Mecánica del TecNM/ITTG.

José Manuel Rasgado Bezares, es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez; ha trabajado en proyectos de construcción y ampliación de Centrales Hidroeléctricas como supervisor de obra electromecánica de la Comisión Federal de Electricidad. Actualmente es jefe del Departamento de Metalmecánica y docente en activo del claustro en la H. Academia de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México. Ha publicado dos libros.

Diseño virtual del péndulo de Charpy para polímeros utilizando una interfaz interactiva.

Virtual Design of the Charpy Pendulum for Polymers Using an Interactive Interface.

Erick de Jesús Jiménez de la Cruz (1).
Estudiante del TecNM/ITTG.
L21270744@tuxtla.tecnm.mx.

Hernán Valencia Sánchez* (2). Docente del TecNM/ITTG, hernan.vs@tuxtla.tecnm.mx.

Roberto Carlos García Gómez (3). Docente del TecNM/ITTG, roberto.gg@tuxtla.tecnm.mx.

Mario Alberto de la Cruz Padilla (4). Docente del TecNM/ITTG, mario.dp@tuxtla.tecnm.mx.

Juan Carlos Niños Torres (5). Docente del TecNM/ITTG, juan.nt@tuxtla.tecnm.mx.

Julio Cesar Llaven Gordillo (6). Docente del TecNM/ITTG, julio.lg@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 13, 2025; aceptado en noviembre 03, 2025.

Resumen.

El péndulo de Charpy es una herramienta fundamental en la evaluación de la tenacidad de los materiales, tradicionalmente utilizada para metales. Sin embargo, la creciente demanda de materiales no metálicos en diversas industrias ha impulsado la necesidad de adaptar y optimizar este método para evaluar sus propiedades mecánicas. Este proyecto se centra en la fabricación de un péndulo de Charpy específicamente diseñado para materiales no metálicos con referencia a la norma ASTM D6110-02, con el objetivo de proporcionar una metodología precisa y confiable para la medición de su resistencia al impacto a materiales Polímeros, además nos permitirá con la interfaz visualizar la gráfica del comportamiento de la energía de Impacto en el Material.

Palabras claves: ASTM, energía, péndulo.

Abstract.

The Charpy pendulum is a fundamental tool in the evaluation of the toughness of materials, traditionally used for metals. However, the growing demand for non-metallic materials in various industries has driven the need to adapt and optimize this method to evaluate their mechanical properties. This project focuses on the manufacture of a Charpy pendulum specifically designed for non-metallic materials with reference to the ASTM D6110-02 standard, with the objective of providing an accurate and reliable methodology for measuring the impact resistance of polymeric materials. It will also allow us to visualize the graph of the behavior of the impact energy in the material through the interface.

Keywords: ASTM, energy, pendulum.

1. Introducción.

El péndulo de Charpy es un dispositivo utilizado en ensayos para determinar la tenacidad de un material. Fue ideado por Georges Charpy y se utiliza para medir la energía absorbida por una probeta cuando es sometida a un impacto. El ensayo de Charpy es comúnmente utilizado en la industria para evaluar la resistencia de los materiales a las fracturas por impacto.

El péndulo Charpy en una herramienta de pruebas ampliamente utilizada por las industrias y centros de investigaciones, para determinar la energía máxima que puede absorber un material antes de llegar a la cedencia o fractura. También es utilizada en institutos de educación enfocadas en la ingeniería, para llevar a cabo prácticas de estudio de materiales. (Budynas, 2011).

2. Métodos.

¿Por qué hacer un péndulo Charpy para pruebas en base a la norma ASTM D6110-02 con su interfaz interactiva y el análisis de materiales no metálicos?

Para permitirnos realizar las siguientes actividades como son:

Evaluación de la resistencia al impacto: En la realización de un péndulo Charpy específico para materiales no metálicos permitiría evaluar la capacidad de estos materiales para resistir fuerzas de impacto, lo cual es crucial en diversas aplicaciones industriales para estos materiales.

Normativas y estándares específicos: Existe una demanda en la industria o en la investigación científica para la evaluación de materiales no metálicos según normativas específicas, la implementación de un péndulo Charpy adaptado a estos materiales podría ser necesaria para cumplir con dichos estándares y regulaciones.

Investigación y desarrollo de nuevos materiales: Es fundamental contar con herramientas de evaluación que permitan caracterizar las propiedades de estos materiales, incluida su resistencia al impacto. Un péndulo Charpy adaptado a materiales no metálicos facilitaría este proceso al proporcionar datos precisos y reproducibles sobre la resistencia al impacto de los nuevos materiales desarrollados.

Optimización de procesos de fabricación: medir la resistencia al impacto de materiales no metálicos puede ser crucial para optimizar procesos de fabricación y mejorar la calidad de los productos finales, que daría datos precisos que permitan ajustar parámetros de producción y mejorar la resistencia al impacto de los materiales.

Comparación con materiales metálicos: Algunas aplicaciones industriales requieren la sustitución de materiales metálicos por materiales no metálicos debido a consideraciones de peso, corrosión, costo, entre otros. La capacidad de comparar la resistencia al impacto de
ambos tipos de materiales mediante ensayos con un péndulo Charpy en base a la norma referida sería fundamental para evaluar la viabilidad de dicha sustitución en diferentes aplicaciones.

Interfaz de comunicación interactiva con los usuarios para ver las gráficas del comportamiento de la energía de impacto del polímero obteniendo los datos del experimento en situ.

2.1 Identificación del problema.

El ensayo de impacto tipo Charpy implica el uso de un péndulo físico que, al caer desde una altura específica, golpea una probeta de ensayo colocada en su camino de oscilación. La energía de impacto aplicada varía según la masa y dimensiones del péndulo, oscilando entre 30 J para polímeros y 360 J para metales y aleaciones. La probeta, apoyada en sus extremos, experimenta una flexión a tres puntos que eventualmente resulta en su fractura, lo que lo convierte en un ensayo de flexión por choque. Este ensayo permite caracterizar la tenacidad del material, ya que la energía

absorbida por la probeta se determina mediante la diferencia entre las alturas inicial y final del péndulo. Además, el ensayo Charpy ofrece una rápida evaluación de la tenacidad del material al correlacionar la energía de impacto con el área bajo la curva de fuerza versus desplazamiento.

2.2 Parámetros iniciales.

Un péndulo se describe como una masa suspendida de un punto *(O*) por un hilo que no se puede estirar, con longitud *(L)* y masa insignificante. Según la ley de conservación de la energía, el péndulo solo tiene energía potencial en su posición inicial *θ.* Al pasar por la posición de equilibrio en *B,* la energía potencial se transforma en energía cinética, tomando cero como referencia en *B*.

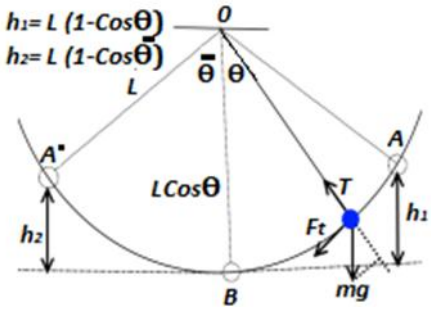


Figura 1. Movimiento del Péndulo.

Por lo tanto, utilizando la ley de la conservación de la energía cuando sobre una partícula actúa una fuerza conservativa se establece la siguiente ecuación:

$$Ec_2 = Ep_1$$
$$\frac{1}{2} m(v_2)^2 = mgh_1 \qquad \text{Ecuación 1}$$

Despejando la ecuación final se obtiene la velocidad.

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Por medio del análisis del péndulo simple mostrado en la figura, la altura es:

$$h_1 = L\,(1 - cos(\theta)) \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde:
θ: ángulo inicial
L: distancia al centro de gravedad
Bajo el mismo criterio se calcula h_2, cuando la masa pasa el punto B.

$$h_2 = L\,(1 - cos(\theta')) \qquad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:
θ': ángulo final
L: distancia al centro de gravedad
Por lo tanto, la energía perdida por el péndulo es la energía que tiene la masa antes de soltarla dada por la ecuación 3, menos la energía que tiene la masa cuando llega a la altura h_2 representada por la *ecuación 4*, como lo indica la siguiente ecuación:

$$Ep = W(h_1 - h_2) \qquad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 5 se obtiene:

$$Ep = W * L(cos(\theta') - cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:
W: peso
L: distancia al centro de gravedad
θ: ángulo inicial
θ': ángulo final

2.3 Variables Importantes del Ensayo de Impacto.

Se ha determinado mediante varias investigaciones que los resultados obtenidos en los ensayos de impacto difieren al realizar cambios en ciertas variables. A continuación, se detallan los parámetros y su influencia en el ensayo de impacto:

Tabla 1. Variables del ensayo de impacto.

Variable	Campo de Influencia
Energía que genera el péndulo.	La máxima energía generada por el péndulo restringe el tipo de materiales con los que se puede realizar las pruebas.
Masa del martillo.	La masa del martillo debe representar la mayor parte del peso total del péndulo, para que cumpla con la norma y se produzca la ruptura de la probeta con la fuerza dinámica suficiente.
Velocidad de impacto.	La velocidad que adquiere la masa al golpear la probeta queda determinada por la altura del péndulo.
Ángulo de elevación del martillo.	El Angulo inicial suministra la velocidad final de Impacto a mayor ángulo mayor Velocidad.
Dimensiones de las probetas.	Para que el ensayo cumpla con los estándares, las probetas deben tener las dimensiones especificadas por la norma referida.
Temperatura.	La temperatura de las probetas influye en las caracteristicas Mecánicas del Material.

La norma describe los métodos estándar de prueba para determinación de la resistencia al impacto Charpy en materiales plásticos. La norma ASTM D6110 define el método utilizado para determinar la resistencia a la rotura de plásticos mediante un impacto en una configuración de flexión a tres puntos utilizando un péndulo equipado con un martillo de dimensiones apropiadas. (ASTM International, 2021).

Los métodos de ensayo se utilizan para determinar la resistencia de los plásticos a la rotura por choque flexional, indicando la energía extraída del péndulo tipo martillo estandarizado, montado en máquinas estandarizadas, rompiendo probetas estándar con una oscilación del péndulo. Se requieren que las probetas se hagan con una muesca fresada, la muesca produce una concentración de esfuerzos que promueven una fractura quebradiza, más que una fractura dúctil.

Los resultados de los métodos de ensayo se presentan en términos de energía absorbida por unidad de ancho de la probeta.

La probeta deberá ajustarse a las dimensiones y geometría de la figura 2, teniendo la opción de variar la anchura entre 3,00 y 12,7 [mm]. Todas las muestras que tengan una dimensión inferior a 12,7 mm tendrán la muesca cortada en el lado más corto, como se muestra en la figura 2.

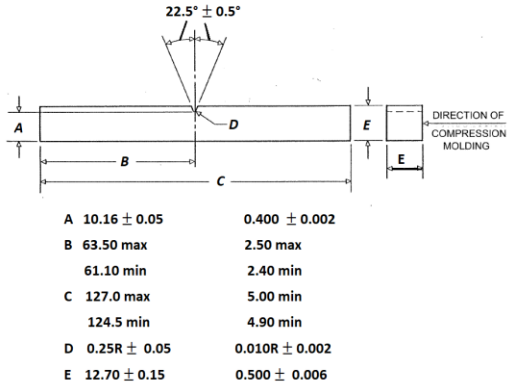


Figura 2. Probeta.

3. Adquisición de Datos para la interfaz interactiva.

La programación es esencial a la hora de proporcionar los valores de las variables estudiadas. El Encoder es un sensor de tipo digital que permite realizar mediciones de posición angular y de velocidad rotacional, por lo que para nuestros ensayos es esencial para adquirir los datos de cada prueba que se realice.

El Encoder utiliza dos sensores receptores ópticos, los cuáles van detectando los pulsos del emisor a través del disco óptico. Mediante una regla de tres se puede obtener la posición angular en función de la resolución del Encoder. La resolución se refiera a la cantidad de marcas o ranuras de referencia por donde entra el haz de luz, detectado por el receptor, como se muestra en la figura 3.

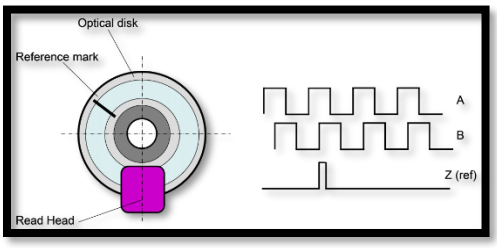


Figura 3. Encoder.

Para realizar la lectura de la posición del brazo del péndulo se realizó una programación en un software libre de adquisición de datos (figura 4) que permita obtener los valores del ángulo inicial y final a través de este dispositivo. Los valores se registran en el monitor Serial.

angulo.ino

```
int pinA = 2;
int pinB = 4;
float alfa = 0;
float beta = 0;
long posicion;
int grados;


void setup() {
  pinMode(pinA, INPUT_PULLUP);
  pinMode(pinB, INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, a10, RISING);
  attachInterrupt(1, a11, RISING);
  posicion = 0;
}

void loop() {
  grados = (posicion * 360 / 600);
  if (posicion > 1200) {
    posicion = 0;
  } else if (posicion < -1200) {
    posicion = 0;
  }
  if (grados < alfa) {
    alfa = grados;
  }
  if (grados > beta) {
    beta = grados;
  }

  Serial.println(grados);
  delay(100);
}

void a10() {
  if (digitalRead(pinB) == LOW) {
    posicion--;
  } else {
    posicion++;
  }
}

void a11() {
  if (digitalRead(pinA) == LOW) {
    posicion++;
  } else {
    posicion--;
  }
}
```

Figura 4. Software en Arduino.

Para realizar la plataforma interactiva donde el usuario tenga contacto con los datos obtenidos se utilizó el software de LabView. Este es un tipo de programación gráfica que permite mostrar valores más dinámicos, para favorecer el análisis de los datos obtenidos.

El programa en LabVIEW obtiene los valores angulares del programa principal recibiendo los valores del monitor serial de Arduino a través del Ni visa y realiza los cálculos necesarios proporcionados (figura 5). Este programa usa un tipo de comunicación serial.

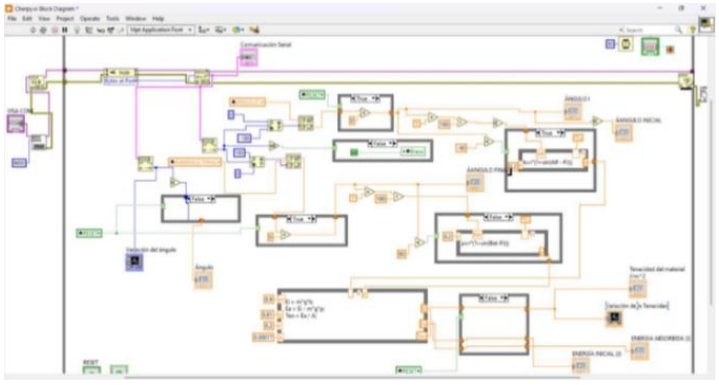


Figura 5. Diagrama de bloques.

Para tener una interfaz que sea atractiva y facilite la comunicación para el usuario, se realizó una personalización en el panel frontal de LabVIEW. Este panel muestra las variables importantes y las herramientas necesarias de reinicio y calibración.

La personalización en el panel frontal, mostrado en la figura 6, facilita la visualización de los resultados en las pruebas realizadas, por lo que los análisis se vuelven más didácticos.

Figura 6. Interfaz de usuario.

4. Diseño.

Bajo las condiciones establecidas por la norma ASTM D6110 – 2, se realizó el diseño y la construcción de los elementos que conforman al péndulo.

Dentro de los elementos principales se encuentran el brazo de impacto, encargado de proporcionar la energía, velocidad y altura sugerida por la norma. La norma sugiere que el brazo tenga una longitud entre 0.325 y 0.406 metros, desde el centro del eje hasta el centro de impacto; el brazo debe proporcionar una energía mínima sugerida de 2.7 ± 0.14 J y la altura de impacto debe de tener un valor de 610 ± 2 mm, para tener una velocidad de impacto aproximado de 3.46 m/s. (ASTM International, 2021)

En base a estas características, se propuso un diseño de brazo con la longitud mínima y un peso de aproximadamente 451.3 g para alcanzar la energía requerida a un ángulo de 60° sobre la horizontal, obteniendo de esta manera un valor aproximado a 608 mm requerido. El resultado obtenido se muestra en la figura 7.

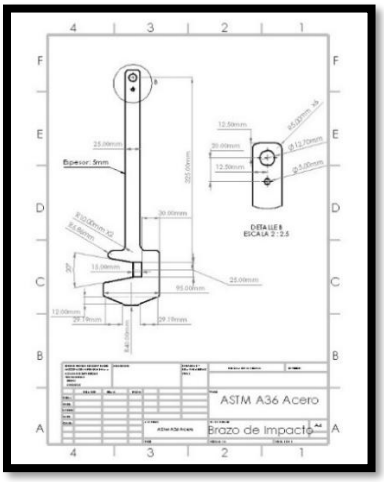


Figura 7. Plano del brazo de impacto.

El eje también es un elemento principal, ya que transmite el movimiento pendular al brazo de impacto. Este elemento debe de ser resistente para poder cargar por si solo al brazo, además, debe tener una perforación para la unión con el sensor encoder y un aditamento que permita unir al eje con el brazo. La propuesta obtenida para estas funciones se muestra en la figura 8.

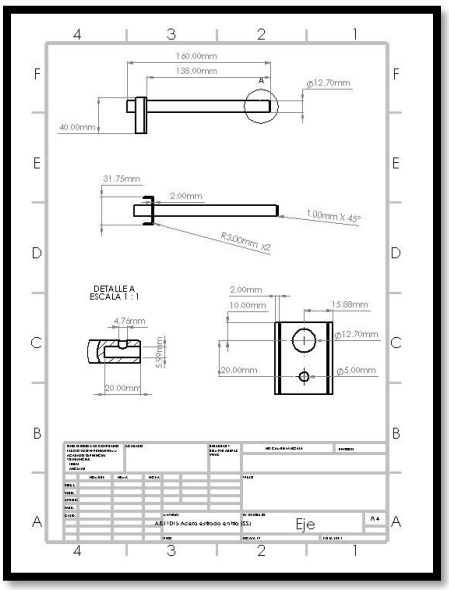


Figura 8. Plano del eje.

La base para los rodamientos (mostrado en la figura 9), es sobre el cual se posa el eje, utilizando rodamientos de ½ in.

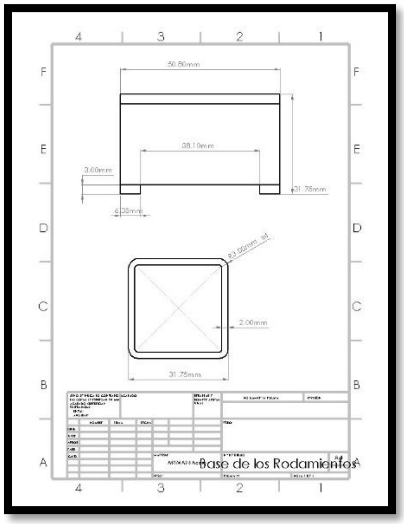


Figura 9. Plano de la base de los rodamientos.

El sujetador de probetas (figura 10) está normalizado por la norma, su anchura de 40 cm es equivalente al largo de la probeta, permitiendo que se posicione con facilidad bajo las características establecidas.

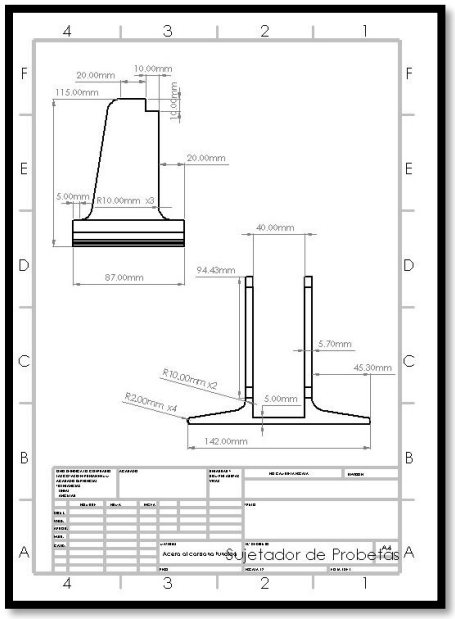


Figura 10. Plano del sujetador de probetas.

Los elementos están colocados sobre una base en forma de C, mostrado en la figura 11, para mantener la firmeza del sistema durante la realización de las pruebas de impacto.

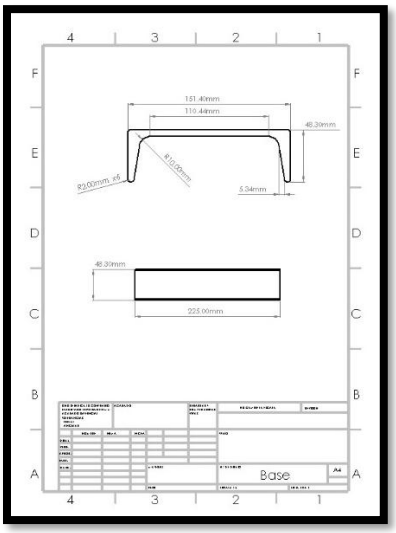


Figura 11. Plano de la base.

Otros elementos adicionales son el soporte principal, sobre el cuál proporciona la altura adecuada del eje respecto al sujetador de probetas, para que el centro de impacto esté adecuadamente sobre la probeta. También se incluyen los ángulos del soporte, que dan mayor rigidez al soporte principal, y el soporte de sujeción, que es sobre el cual se ubica el sistema de liberación. Estos elementos se muestran en la figura 12.

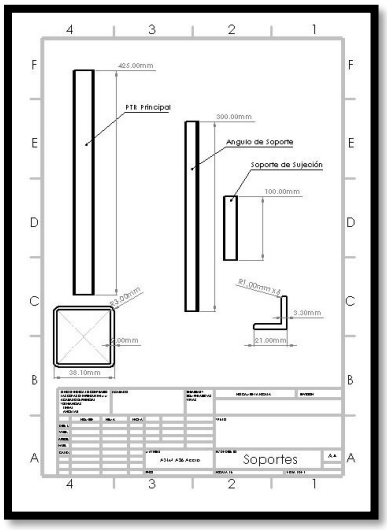


Figura 12. Plano de los soportes.

El ensamble de cada uno de estos elementos se muestra en la figura 13.

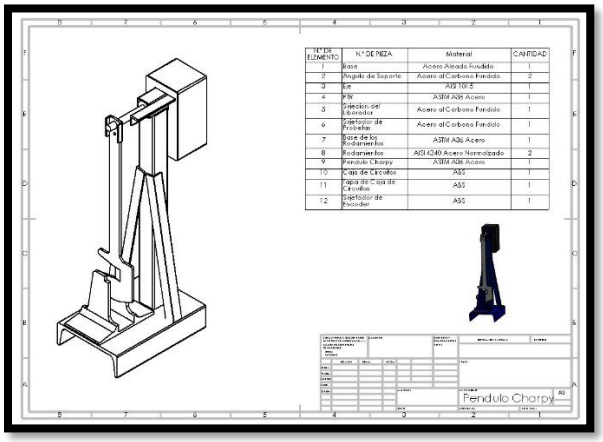


Figura 13. Plano del ensamble.

5. Simulación.

Para determinar si los elementos soportaran las pruebas de impacto realizadas, se realizó una simulación estática empleando el software SolidWorks. (Gómez, 2021).

Los elementos que reciben mayormente las cargas son el eje y el brazo de impacto. La carga máxima transmitida en un péndulo ocurre cuando el brazo toma una posición totalmente vertical, ya que es ahí donde se concentra todo el peso sobre los elementos. Para el brazo, se realizó una simulación aislada del ensamblaje, mientras que se realizó una simulación con el eje, los soportes y la base, para estudiar su comportamiento.

Utilizando la teoría de Von Mises, Los resultados para la tensión en Mpa para la estructura se muestra en la figura 14. Nótese que, a pesar de soportar una pequeña carga (el peso del brazo), existe un valor de tensión considerable.

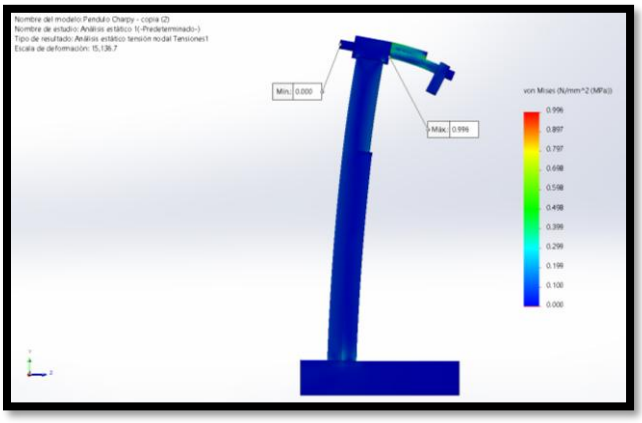


Figura 14. Simulación de tensión del eje y los soportes aplicando Von Mises.

Los desplazamientos ocasionados por la carga se muestran en la figura 15. El mayor valor de desplazamiento se encuentra en el aditamento del eje que une al brazo.

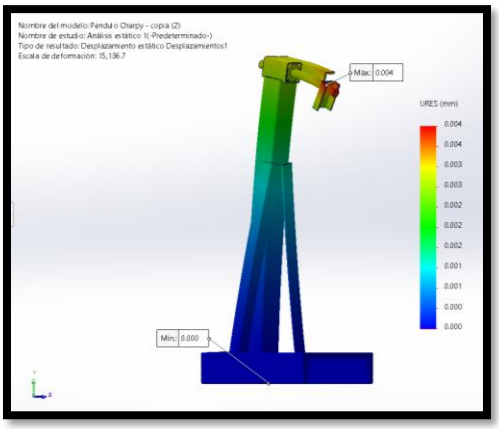


Figura 15. Simulación de desplazamientos del eje y los soportes.

Para validar si estas deformaciones no afectan a estos elementos, se realizó un estudio de simulación de factor de seguridad, aplicando Von Mises Máx (figura 16). El valor del factor de seguridad es, por mucho, superior a dos, por lo que estos elementos soportaran la carga sin ningún problema.

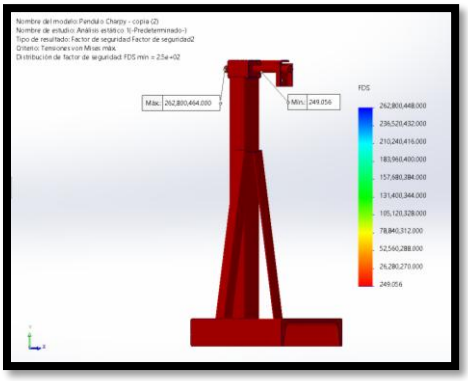


Figura 16. Simulación del factor de seguridad del eje y los soportes aplicando Von Mises Máx.

Bajo las mismas condiciones, se realizó la simulación de tensión del brazo (figura 17). El límite elástico no fue superado, por lo que el brazo soporta las cargas sin ningún esfuerzo.

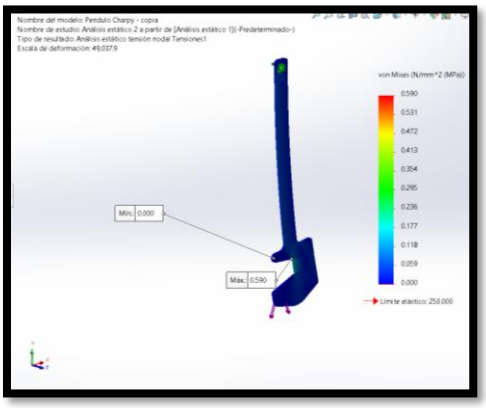


Figura 17. Simulación de tensión del brazo de impacto aplicando Von Mises.

Aplicando una simulación de factor de seguridad con Von Mises Máx (figura 18), se puede confirmar que el brazo soporta las cargas sin ningún esfuerzo, debido a que el valor mínimo de dicho factor es mayor a 2. (Dassault Systemes, 2020).

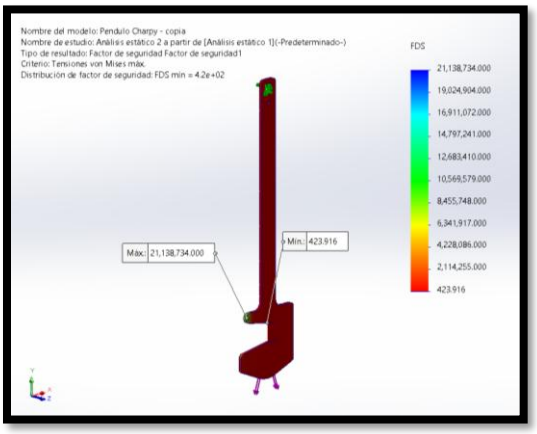


Figura 18. Simulación del factor de seguridad del brazo de impacto aplicando Von Mises Máx.

En estos estudios se utilizó una escala de deformación automática, proporcionado por SolidWorks, para tener una mayor visualización en el comportamiento de la deformación de los elementos, ya que en una escala 1:1 no sería posible observar las deformaciones, ocasionados por cargas muy pequeñas.

Conclusión.

Bajo este estudio, se tiene como conclusión en que todos los elementos soportan este valor de carga y otros valores mayores permitidos por la norma ASTM D6110 – 2. Esto es importante para posibles modificaciones en caso de que el material a probar requiera de un mayor valor energético antes del impacto.

En base a todos estos criterios, el resultado final se muestra en la figura 19. El ensamble de todos los elementos, configurados respectivamente a la función que desempeñan, permite que se logre una correcta función para cada prueba realizada en los elementos.

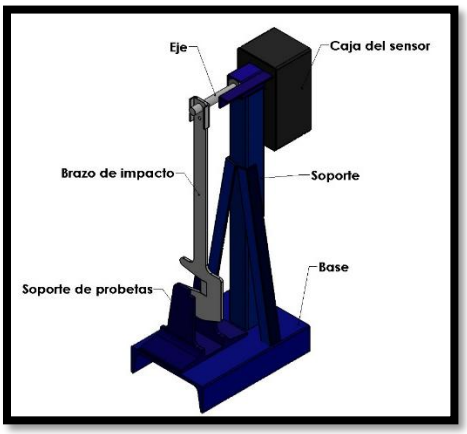


Figura 19. Ensamble del resultado final.

Referencias bibliográficas.

ASTM International,(2021). Standard Test Methods forDetermining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics(ASTM *D6110-2*).https://store.astm.org/d6110-18.html

Budynas, R. G. (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. *(9na ed.)*. New York: McGraw-Hill (2011).

Dassault Systemes,(2020). Theoretical manual SolidWorks Simulation.

Gómez G.S. (2021). "SolidWorks", Ed. Alfaomega México, 12da.

Información de los autores.

Erick de Jesús Jiménez de la Cruz, Estudiante del Noveno de semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente está cursando su residencia profesional.

Hernán Valencia Sánchez, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, con un Posgrado en Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Doctorado en Ingeniería Aplica de la Universidad TENAM Reconocimiento al perfil deseable, Jefe de Proyectos de Investigación del Departamento de Metal-Mecánica, Docente del Departamento de Metal-Mecánica del TecNM/Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Roberto Carlos García Gómez, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, con tres posgrados: Especialidad en Mecatrónica, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Doctorado en Procesos de Manufactura. Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Jefe de Proyectos de Vinculación del Departamento de Metal-Mecánica, Docente del Departamento de Metal-Mecánica del TecNM/Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Mario Alberto De La Cruz Padilla es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con una Maestría en Diseño Mecánico por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, cuenta con Doctorado en Educación y otro en Ingeniería Aplicada.

Juan Carlos Niños Torres es Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, así también con el Doctorado en Ingeniería Aplicada de la Universidad TENAM. Actualmente es Profesor Investigador del Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y se ha desempeñado como jefe de la División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con el perfil PRODEP 2022-2025 como miembro del Cuerpo Académico Ingeniería Mecánica en la línea de investigación de Diseño Mecánico. Es miembro del comité de evaluadores del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI A.C.) avalado por CIEES desde 2016.

Julio César Llaven Gordillo, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Maestría en Ciencias de la Educación. Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Docente del Departamento de Metal-Mecánica del Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Estimación del índice de crecimiento de la lechuga mediante el aprendizaje profundo.

Estimation of Lettuce Growth Index Using Deep Learning.

Naomi Azucena Rivera Zenteno (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
l20270787@tuxtla.tecnm.mx.

Carlos César Zebadúa Martínez* (2). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
l20270787@tuxtla.tecnm.mx.

Néstor Antonio Morales Navarro (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
nestor.mn@tuxtla.tecnm.mx.
Madaín Pérez Patricio (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
madain.pp@tuxtla.tecnm.mx.

Aída Guillermina Cossío Martínez (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
aida.cm@tuxtla.tecnm.mx.

Galdino Belisario Nango Solís (6), Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
galdino.ns@tuxtla.tecnn.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en diciembre 18, 2024; aceptado en enero 10, 2025.

Resumen.

Este proyecto aborda la problemática del crecimiento de cultivos de lechuga en el contexto del cambio climático y la sobrepoblación, que han incrementado la demanda de este alimento y afectado su producción. Se propone el uso del aprendizaje profundo (Deep Learning), Roboflow y las imágenes RGB-D para mejorar el monitoreo del crecimiento de la lechuga hidropónica, optimizando los recursos utilizados en su cultivo. El objetivo principal del proyecto es desarrollar una metodología que permita estimar el peso fresco de la lechuga utilizando imágenes y técnicas de aprendizaje profundo. Para ello, se implementó un sistema de visión por computadora que emplea imágenes RGB-D, que combinan información de color y profundidad, para analizar las características físicas de la lechuga, como altura, diámetro y volumen, lo cual permite predecir su peso. Este trabajo representa una solución moderna para mejorar la eficiencia en la producción agrícola de lechuga hidropónica al aplicar el aprendizaje profundo.

Palabras clave: Aprendizaje profundo, imágenes RGB-D, peso, Roboflow.

Abstract.

This project addresses the issue of lettuce crop growth in the context of climate change and overpopulation, which have increased the demand for this food and affected its production. The proposed solution involves the use of Deep Learning, Roboflow, and RGB-D images to improve the monitoring of hydroponic lettuce growth, optimizing the

resources used in its cultivation. The main objective of the project is to develop a methodology to estimate the fresh weight of lettuce using images and deep learning techniques. To achieve this, a computer vision system was implemented that employs RGB-D images, combining color and depth information, to analyze the physical characteristics of lettuce, such as height, diameter, and volume, enabling weight prediction. This work represents a modern solution to improve efficiency in hydroponic lettuce production through the application of deep learning.

Keywords: Deep learning, fresh weight, RGB-D images, Roboflow.

1. Introducción.

La agricultura se enfrenta constantemente al desafío de optimizar procesos para garantizar una producción de alimentos eficiente y sostenible como lo plantea la FAO (2021), en la actualidad, la producción alimentaria y agrícola de todo el mundo se enfrenta a muchos desafíos a causa de la creciente demanda de alimentos por la sobrepoblación, el aumento de hambre, el cambio climático, la sobreexplotación de los recursos naturales, entre otros, en consecuencia la innovación en el sector agrícola como la inteligencia artificial (*IA*) y el aprendizaje profundo se han vuelto crucial para la mejora de la eficiencia y seguridad alimentaria.

La lechuga es considerada un alimento básico en muchas dietas alrededor del mundo. Para su cultivo en la agricultura tradicional, se requiere el monitoreo e inspección manual de manera contante que, por lo general, es una actividad que se realiza por usos y costumbres, además de realizar anotaciones en una bitácora, en algunos casos. Este control, implica mayor tiempo para el agricultor, impidiéndole realizar otras actividades, y a la vez puede haber anotaciones erróneas dentro de la bitácora, el cual como lo menciona Quetz Aguirre et al (2023), el uso de estas bitácoras digitales o monitoreos automatizados permiten una reducción en el tiempo invertido de los agricultores y una mayor precisión en la detección de enfermedades o plagas en los cultivos.

En la actualidad surge un gran interés en la aplicación de tecnologías innovadoras para gestionar el crecimiento de las plantas. La mayoría de estas tecnologías emergen del aprendizaje profundo, una rama de la inteligencia artificial que se basa en las redes neuronales para realizar un análisis detallado de datos complejos Yu et al. (2024) destacan como la inteligencia artificial (*IA)* como el aprendizaje profundo están impulsando la innovación en este campo, permitiendo procesar grandes volúmenes de datos en la optimización de crecimiento y calidad de los cultivos. Osorio (2021) afirma que el aprendizaje profundo tiene aplicaciones variadas, desde el reconocimiento de voz hasta la conducción autónoma, y destaca su relevancia en el ámbito agrícola, específicamente en el cultivo de la lechuga. Se señala que, mediante el uso de imágenes de las hojas de lechuga en diversas etapas de desarrollo se pueden extraer información sobre el crecimiento y salud de la planta.

La agricultura en México ha registrado un crecimiento significativo en los últimos años. En 2022, la extensión de tierras dedicadas a la agricultura alcanzó los 32.1 millones de hectáreas, lo que representa un aumento del 2.2% en comparación con 2017. Asimismo, la producción total experimentó un incremento, llegando a 296.7 millones de toneladas, lo que equivale a un aumento del 4.8% en el mismo periodo. Los principales cultivos incluyen maíz, sorgo, frijol, caña de azúcar y trigo, con el maíz destacando por un aumento del 3.9% en su producción en 2022. Las unidades de producción han crecido un 6,7% desde 2017, alcanzando los 5,0 millones en 2022. El acceso al crédito también ha mejorado notablemente, aumentando un 54% en el mismo período, alcanzando el 6,1% de las unidades de producción, según datos del INEGI (2022).

En este proyecto, se propone implementar un algoritmo de inteligencia artificial para ayudar a los agricultores a tener un sistema con el cual se podrán obtener a fondo las características cuantitativas de la lechuga como: área foliar, altura, diámetro, peso, etc. Lo anterior, requiere que el algoritmo sea entrenado con un conjunto de datos lo suficientemente grande, para minimizar los errores en la detección de características. Por medio imágenes se pueden extraer dichas características.

2. Métodos.

Se utilizará un sistema basado en visión por computadora y tecnología de procesamiento de imágenes para analizar imágenes RGB-D de la lechuga para obtener datos como el peso, altura, diámetro. La metodología propuesta de este sistema es la siguiente:

Colección de imágenes.

Se recopilarán imágenes RGB-D de lechugas por medio de un dispositivo que combinará una cámara RGB tradicional con un sensor de profundidad para obtener información tridimensional de la escena. Dichas imágenes deberán ser tomadas en un ambiente bien iluminado asegurando de que haya suficiente contraste entre la lechuga y el fondo para facilitar los procesos de detección y segmentación.

Etiquetado y segmentación.

Se utilizará un algoritmo de segmentación para separar la lechuga del fondo y otras partes de la imagen, además de utilizar tecnología de detección de bordes y contornos para medir el diámetro y la altura de la lechuga. Para esto se llevará a cabo un proceso de etiquetado con la herramienta *Roboflow.*

Preprocesamiento de imágenes.

Se realizará la redimensión de las imágenes obtenidas durante la segmentación, además de la corrección de color y la calibración de la cámara para garantizar una representación precisa del color de la lechuga. Utilizando técnicas de filtrado y reducción de ruido para mejorar la calidad de la imagen y reducir posibles interferencias.

Modelado 3D.

Con las imágenes preparadas se implementará con Python un algoritmo capaz de unir los datos de la lechuga en RGB que representaría las dimensiones 2D del modelo con los datos de la imagen de profundidad, el cual va a representar la altura del modelo, mediante esta combinación se creará el modelo 3D de la lechuga y, con una serie de parámetros específicos, se hará que el mismo algoritmo también sea capaz de obtener el volumen, área, altura y el diámetro correspondiente de la lechuga.

Análisis de Datos.

Se utilizará un algoritmo DNN de procesamiento de datos para calcular el peso de la lechuga en función de sus dimensiones, gracias a la serie de datos obtenidos en el modelo 3D.

Una red neuronal profunda (DNN, por sus siglas en inglés) es una técnica de inteligencia artificial diseñada para procesar información a través de nodos interconectados organizados en diferentes capas. Su objetivo principal es identificar patrones y llevar a cabo tareas específicas mediante el aprendizaje automático. Estas redes buscan emular el proceso de aprendizaje del cerebro humano, utilizando algoritmos y programas informáticos que les permiten adaptarse y mejorar su desempeño con base en la experiencia (Sánchez et al., 2023).

Está compuesta principalmente por:

Entradas.

Datos iniciales que se ingresarán en la red, obtenidos a partir de las mediciones del modelo 3D.

Capas ocultas.

Capas intermedias que permiten extraer características de los datos ingresados.

Salidas.

La capa de salida es el resultado final de todo el proceso de aprendizaje por las capas ocultas.

Función de activación.

Las funciones de activación desempeñan un papel crucial en las redes neuronales artificiales, ya que aportan no linealidad al modelo, lo que facilita que la red pueda captar y expresar relaciones complejas en los datos (Lederer, 2021).

Para un mejor entendimiento, se presenta la figura 1, donde se representa la metodología propuesta de manera grafica.

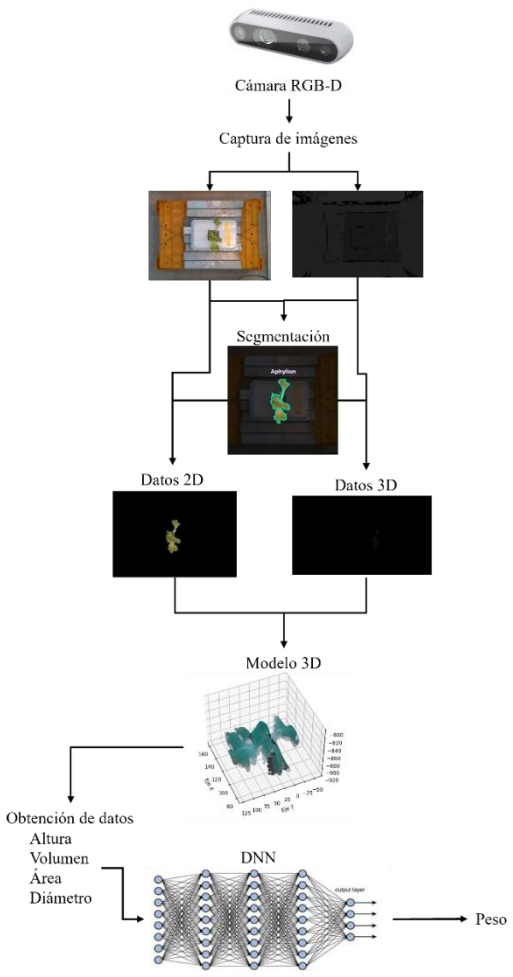


Figura 1. Diagrama de la metodología a usar.

3. Desarrollo.

Como ya se mencionó anteriormente, el desarrollo de este proyecto se estructura en cinco etapas principales: colección de imágenes, etiquetado y segmentación, preprocesamiento de imágenes, modelado 3D y análisis de los datos.

Captura de imágenes.

Para el desarrollo de este proyecto se contó con un conjunto de datos producido por Hemming et al para la sesión de desafío en línea del Tercer Desafío Autónomo de Invernaderos (Third Autonomous Greenhouse Challenge); dicho conjunto de datos consta de 388 imágenes RGB, imágenes de profundidad y datos reales sobre sus medidas correspondientes, y se encuentra disponible en el sitio web 4TU.ResearchData. Dentro del conjunto de datos se especifica que las imágenes se tomaron con una cámara RealSense D415 y que tanto las imágenes RGB como las imágenes de profundidad cuentan con la misma resolución (1080 x 1920 pixeles) y extensión (PNG), sin embargo, las imágenes RGB son de 24 bits mientras que las de profundidad son de 16 bits.

Etiquetado y segmentación.

Teniendo nuestro conjunto de datos, las imágenes son organizadas según las variedades: Salanova, Lugano, Satine y Aphylion; una vez hecho esto las imágenes se etiquetarán en Roboflow, este proceso es fundamental para que el algoritmo de Deep Learnin detecte de manera automática a las lechugas y debe ser lo más preciso posible. Lo que Roboflow hará será generar automáticamente tres conjuntos de imágenes para el entrenamiento, la validación y las pruebas del algoritmo de YOLOv7, el cual es un detector de objetos de última generación en tiempo real. Con esto se procede a entrenar el modelo que permitirá identificar lechugas según su variedad; lo que resulta en la generación de imágenes npy las cuales son necesarias para filtrar los fondos, ya que ahora las imágenes se encuentran en blanco (valor 1) y negro (valor 0), blanco para la lechuga y negro para el fondo.

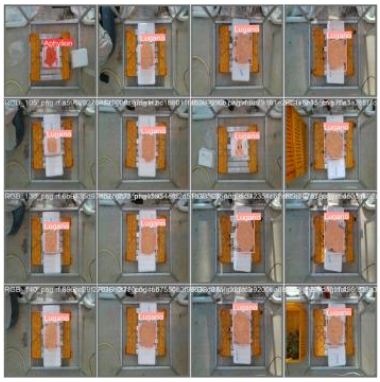


Figura 2. Etiquetado de las imagenes de la lechuga.

Preprocesamiento de imágenes.

Dado que las imágenes están trabajadas en Roboflow se redimensionan automáticamente a 640 x 640 pixeles, deberán ser devueltas a su dimensión original para que todos los pixeles de la imagen npy coincidan con las imágenes originales RGB y con las imágenes de profundidad. De esta manera podrán ser combinadas para dar origen al modelo 3D.

Con dicho proceso, se obtiene como resultado la imagen de la lechuga en blanco y negro ya redimensionada (Figura 3).

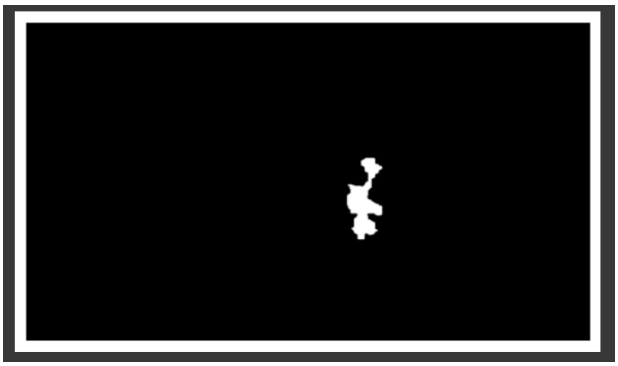


Figura 3. Imagen de la lechuga .npy redimensionada.

Teniendo las mismas redimensiones se multiplica la imagen npy con la imagen RGB para que así el fondo, cuyo valor es 0, se multiplique con los mismos pixeles de la imagen RGB convirtiéndolos también en negro mientras que los pixeles de la parte de la lechuga permanecerán tal como están en la imagen original, conservando el color que originalmente se tenía como observa en la (Figura 4).

De igual manera la imagen npy se va a combinar con la imagen de profundidad para que así se cuente con la imagen RGB y de profundidad sin fondo, con el fin de al momento de graficarlo solo se grafique la lechuga y no el fondo.

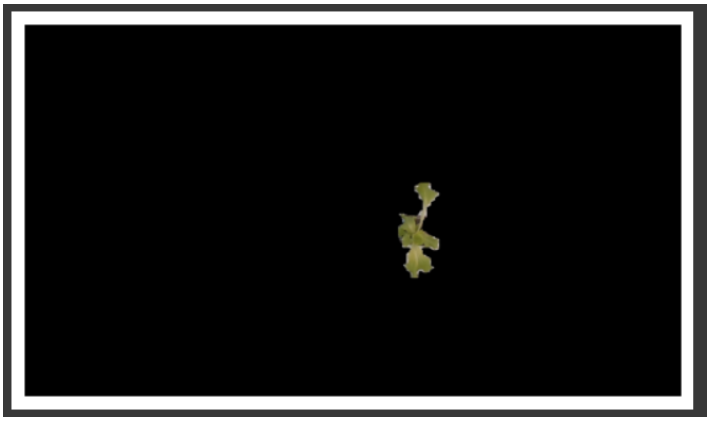


Figura 4. Imagen RGB segmentada.

Modelado 3D.

Teniendo las imágenes RGB y de profundidad sin fondo, se creó un algoritmo capaz de combinarlas, A partir de estas imágenes, se obtuvieron las medidas de largo y ancho de la imagen RGB, mientras que la altura se obtuvo a partir de la imagen de profundidad. En esta última, los valores varían según la distancia, donde las partes más cercanas de la lechuga presentan valores diferentes a las más lejanas, permitiendo así determinar su altura.

Primero en la creación del código se cargan las imágenes mediante la librería cv2 previamente instalada, después se declaran en variables todos los parámetros que por defecto tiene la cámara, como los datos para la matriz de calibración, el vector de traslación y rotación. Los cuales, son datos de suma importancia para obtener las medidas más precisos de la lechuga.

En el algoritmo 1 considerando la imagen de profundidad y los parámetros de la cámara se crea la nube de puntos que permitirá crear la graficar de la lechuga.

Algoritmo 1. Creación de la nube de puntos y aplicando los vectores de rotación y traslación.

```
h, w = imagen_profundidad.shape
u, v = np.meshgrid(np.arange(w), np.arange(h))
x = (u - cx) * imagen_profundidad / fx
y = (v - cy) * imagen_profundidad / fy
z = imagen_profundidad

# Aplicar rotación y traslación
points = np.array([x.flatten(), y.flatten(), z.flatten()]).T
rotated_points = (R @ points.T).T + T
```

En el algoritmo 2 se muestra el código donde se grafica la nube de puntos de acuerdo con la imagen Yolo, que es la imagen RGB sin fondo, el cual contiene los valores de 1s y 0s donde los valores 1s es donde se encuentra la lechuga y los 0s el fondo, como resultado solo graficara los puntos de la nube que corresponden a la lechuga, el cual se encuentra representada en la figura 5.

Algoritmo 2. Graficación del modelo 3d de la lechuga.

```
[m,n] = rotated_points.shape
#p3d1 = np.zeros([207360,3])
vector = np.array(imagen_yolo.flatten())
p3d = []
c = []
d=imagen_rgb.reshape(-1, 3)
contador = 0
for i in range (0,m,1):
    #print(i)
    if vector[i] >= 1 and rotated_points[i, 2] > 100 and rotated_points[i, 2] <= 915:
        p3d.append(rotated_points[i])
        contador += 1
        c.append(d[i] / 255)
p3d = np.array(p3d)
c = np.array(c

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

ax.scatter(p3d [:, 0], p3d [:, 1], -p3d [:, 2], c=c_original)

plt.xlabel('Eje X')
plt.ylabel('Eje Y')
ax.view_init(elev=0, azim=90)
plt.show()
```

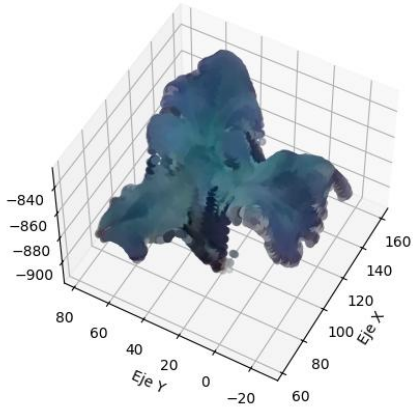


Figura 5. Modelo 3d de la lechuga.

Análisis de datos.

Teniendo listo el modelo 3d de la lechuga ahora se procede a calcular todos los datos de la lechuga, esto lo logramos con distintos métodos para cada medida, por ejemplo, para calcular la altura se hace por medio del algoritmo 3. EL cual calcula el punto máximo de la lechuga y lo resta por el punto más bajo esto se realiza así, para que solo nos quede el rango de valores donde está la lechuga, posteriormente se multiplica por la escala que tiene por defecto la cámara para que nos dé el resultado más cercano a la realidad.

Algoritmo 3. Código del cálculo de la altura de la lechuga.

```
altura = (np.max(z_values) - np.min(z_values)) * depth_scale
altura_cm = altura * 100
```

Para calcular el volumen y área de la lechuga se usó el Algoritmo 4. El cual calcula las medidas gracias a la biblioteca de convexHull, que crea una malla alrededor de la nube de puntos de la lechuga y teniendo los atributos de .volume y .area se calcula automáticamente de acuerdo con dicha malla, el cual por último se multiplica por la escala de la cámara con sus respectivas conversiones.

Algoritmo 4. Cálculo del volumen y área de la lechuga.

```
hull = ConvexHull(p3d)

volumen = hull.volume * (depth_scale ** 3)
area_superficie = hull.area * (depth_scale ** 2)

volumen_cm3 = volumen * 1e6  # cm³
area_cm2 = area_superficie * 1e4  # cm²
```

En el algoritmo 5 se muestra el cálculo del diámetro, el cual calcula la distancia máxima que hay entre la nube de puntos a partir de los datos de profundidad.

Algoritmo 5. Cálculo del diámetro de la lechuga.

```
distances = pdist(p3d)

diametro = np.max(distances) * depth_scale
diametro_cm = diametro * 100  # cm
```

Predicción de peso usando una DNN.

Teniendo todos los datos registrados, se crea una DNN con el algoritmo 6, el cual primero se importan las librerías necesarias para su creación. Después se cargan los datos obtenidos en el modelo 3d, los cuales se incorporaron en una hoja de Excel imagen por imagen, también se indican los nombres de las columnas en su respectiva distribución, se identifican los datos de entrada y de salida en las variables X y Y, donde los datos de entrada son los datos obtenidos anteriormente (diámetro, área, volumen y altura), y los datos de salida es el peso real de la lechuga, de esta manera, la DNN se entrenará relacionando los parámetros de entrada con el peso de la lechuga, por este medio se tendrá un modelo que prediga el peso de una lechuga basada en su diámetro, área, volumen y altura. Con los datos identificados, se crea la DNN el cual va a ser un modelo secuencial, ya que para lo que se necesita es la más adecuada, para la capa de entrada se crean las mismas dimensiones que tiene X_train el cual tiene las columnas de entrada, nuestra red neuronal cuenta con 4 capas ocultas ya que, si se ponen menos o más afecta el porcentaje de acierto del modelo, ya sea por un sobreajuste o por un mal ajuste, para la capa de salida solo pondrá un nodo haciendo referencia al peso.

Creado el modelo de la red neuronal, se le pasan todos los datos de entrenamiento para que aprenda a predecir el peso bajo estos parámetros, para la predicción, se crea una variable llamada y_pred el cual va guardar todos los predichos, los cuales se calculan con el atributo .predict e indicándole los datos de entrada de prueba, para que se pueda conocer el porcentaje de acierto de modelo se crea la variable r2 el cual compara los datos de peso reales con los predichos por el modelo.

Algoritmo 6. Creación de la DNN.

```
# librerías
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
from sklearn.metrics import mean_absolute_error, r2_score
import matplotlib.pyplot as plt

data = pd.read_excel('Datos/DatosRedneuronal.xlsx', header=None)
data.columns = ['Diametro', 'area', 'volumen', 'altura', 'Peso']

X = data.iloc[:, 0:4]  # Primeras 4 columnas (Diametro, Area, Volumen, Altura)
y = data.iloc[:, 4]    # Última columna (Peso)

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

scaler = StandardScaler()
X_train = scaler.fit_transform(X_train)
X_test = scaler.transform(X_test)

# DNN
```

```
modelo_dnn = Sequential()
modelo_dnn.add(Dense(128, activation='relu', input_shape=(X_train.shape[1],)))
modelo_dnn.add(Dense(64, activation='relu'))
modelo_dnn.add(Dense(32, activation='relu'))
modelo_dnn.add(Dense(32, activation='relu'))
modelo_dnn.add(Dense(16, activation='relu'))
modelo_dnn.add(Dense(1))
modelo_dnn.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')

historial = modelo_dnn.fit(X_train, y_train, epochs=500, batch_size=10, verbose=1,
validation_data=(X_test, y_test))

y_pred = modelo_dnn.predict(X_test)

mae = mean_absolute_error(y_test, y_pred)
r2 = r2_score(y_test, y_pred)

print(f"Error Medio Absoluto (MAE): {mae}")
print(f"Coeficiente de Determinación (R²): {r2}")

porcentaje_acierto = r2 * 100
print(f"\nPorcentaje de acierto del modelo: {porcentaje_acierto:.2f}%")
```

El resultado de la predicción del modelo fue un 85.73% de acierto en el peso predicho el cual fue el resultado de 500 ciclos de 355 imágenes de entrenamiento con el proceso de pérdidas durante el entrenamiento representadas en la figura 6, las cuales podemos entender como la diferencia entre el peso real con el peso predicho que hay en el resultado de cada ciclo, por lo cual se puede distinguir que en cada ciclo o época la perdida es menor. Este resultado es muy favorable por el motivo de que es un porcentaje alto.

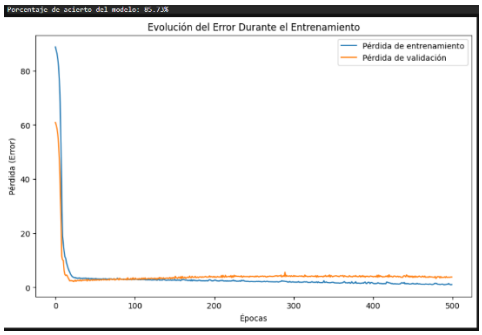


Figura 6. Gráfica de la pérdida durante el entrenamiento.

Conclusión.

En este trabajo se puede observar que utilizando técnicas de aprendizaje profundo se logra predecir el peso de la lechuga mediante haciendo uso del análisis de imágenes RGB-D. Esta predicción se logra con un porcentaje aceptable del 85.73%, con dicho resultado queda claro que con estas innovaciones en al sector agrícola puede llevar a un proceso muy eficiente de monitoreo automático en grandes cultivos utilizando únicamente una cámara especializada y una DNN bien configurada.

Créditos.

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y al asesor Néstor Antonio Morales Navarro por el apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

Referencias bibliográficas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf.

Lederer, J. (2021, 25 enero). Activation Functions in Artificial Neural Networks: A Systematic Overview. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2101.09957.

Osorio Delgado, A. K. (2021). Método para la estimación de maleza en cultivos de lechuga utilizando aprendizaje profundo e imágenes multiespectrales (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Quetz Aguirre, G. M., Méndez Moreno, M., Can Cabrera, Á. F., Chuc Armendáriz, M. B.-H., & González Rodríguez, F. de J. (2023). Tecnologías para la trazabilidad productiva en el sureste mexicano: caso de prueba de bitácora digital sobre lactuca sattiva. *Multidisciplinas de la Ingeniería*, *11*(18), 40–48. https://doi.org/10.29105/mdi.v11i18.279.

Sánchez, W. A. C., Escobar, B. R. P., & Huincho, F. V. (2023). Artificial neural networks: a measurement of forecast learnings as potential demand. Universidad Ciencia y Tecnología, 27(118), 51-60. https://doi.org/10.47460/uct.v27i118.686.

The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. (2021). En FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO eBooks. https://doi.org/10.4060/cb4474en.

Yu, J., M. Welch, S., L. Negus, K., & Li, X. (2024). The role of artificial intelligence in crop improvement. ScienceDirect, 184, ISSN 0065-2113. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211323001141?via.

Información de los autores.

Naomi Azucena Rivera Zenteno, Ingeniera en sistemas computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con experiencia con la herramienta de Android Studio y con los lenguajes de Java y Python. Interesada en el desarrollo de aplicaciones móviles y desarrollo de algoritmos de Inteligencia Artificial.

Carlos César Zebadúa Martínez, Ingeniero en sistemas computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Trabaja con los lenguajes de programación de Python, Java, HTML y CSS. Interesado en el desarrollo de videojuegos. Con experiencia en diseño gráfico con Photoshop y desarrollo de algoritmos de Inteligencia Artificial.

Néstor Antonio Morales Navarro, Doctor en Desarrollo Tecnológico. Docente del departamento de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales y jefe del departamento del Centro de Cómputo del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel Candidato. Se especializa en el área de Visión e Inteligencia Artificial.

Madaín Pérez Patricio es graduado como Doctor en Ciencias en Automatización y Computación Industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador y Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro del Claustro Doctoral "Doctorado en Ciencias de la Ingeniería" perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad, I.T. de Tuxtla Gutiérrez desde 2016. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II.

Aída Guillermina Cossío Martínez es Maestra en Ciencias en Administración por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2002. Es profesora de tiempo completo del área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, desde 1994. Se especializa en la formulación y evaluación de proyectos, así como el emprendimiento y desarrollo de planes de negocio, actualmente es perfil deseable y trabaja en la línea de investigación Tecnología de Información y Base de Datos.

Galdino Belizario Nango Solís es Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en 1996. Es Maestro en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, en 2001. Es Doctor en Desarrollo Tecnológico por la Universidad de Ciencia y Tecnología Descartes, en 2016. Es profesor en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde imparte clases en las materias de Programación Lógica y Funcional; y Lenguajes y Autómatas. Es profesor con perfil deseable PRODEP y miembro del Cuerpo Académico Tecnologías de la Información para el Desarrollo de Ventajas Competitivas en la LGAC Sistemas de Información desde 2022.

Implementación de control inteligente para la mejora del factor de potencia y calidad de la energía.

Implementation of intelligent control for power factor and power quality improvement.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

José Ángel Zepeda Hernández (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Osbaldo Ysaacc García Ramos (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx.

Alexis de Jesús Flores García (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx.

Karlos Velázquez Moreno (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
karlos.vm@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 26, 2025; aceptado en diciembre 19, 2025.

Resumen.

En el proyecto se aborda el diseño de un sistema de control inteligente y análisis de calidad de energía para compensación del factor de potencia, basado en un banco de capacitores, utilizando un controlador lógico programable (PLC) y un sistema de monitoreo inteligente (PAC). Además, se utiliza un sistema HMI (Interfaz Máquina Hombre) para el monitoreo de variables de operación del banco de capacitores y variables eléctricas de la instalación general. Las variables monitoreadas incluyen potencia real (KW), potencia activa (KVA), potencia reactiva (KVAR), factor de potencia (FP), voltaje línea a neutro (V), voltaje línea a línea (V), frecuencia (Hz), y corriente en cada fase (I). Estos datos sirven como herramienta para mejorar la eficiencia energética, la reducción de costos, el cumplimiento de normativas y la gestión efectiva del consumo de energía eléctrica. Este proyecto tiene la ventaja de la comunicación en tiempo real basada en el protocolo Industrial Ethernet (Profinet) para el monitoreo y control del proceso..

Palabras claves: Banco de capacitores, calidad de la energía, control inteligente, factor de potencia, protocolo industrial ethernet.

Abstract.

This project addresses the design of an intelligent control system and energy quality analysis for power factor compensation, based on a capacitor bank, using a programmable logic controller (PLC) and an intelligent monitoring system (PAC). Furthermore, an HMI (Human-Machine Interface) system is used for monitoring the capacitor bank's operating variables and general electrical installation variables, such as real power (KW), apparent power (KVA),

reactive power (KVAR), power factor (PF), line-to-neutral voltage (V), line-to-line voltage (V), frequency (Hz), and current in each phase (I). These data will serve as a tool to improve energy efficiency, reduce costs, ensure compliance with regulations, and effectively manage electricity consumption in various applications. This project benefits from real-time communication based on the Industrial Ethernet (Profinet) protocol for process monitoring and control.

Keywords: Capacitor bank, industrial ethernet protocol, intelligent control, power factor, power quality.

1. Introducción.

La globalización y las políticas públicas relacionadas con líneas prioritarias han generado una competitividad a nivel mundial, especialmente en la industria, buscando la independencia energética para el uso eficiente de la energía y alcanzar el estándar de calidad en los procesos de suministro eléctrico para operar equipos de manera eficiente y sin daño. Muchos equipos de alta tecnología son sensibles a los cambios en los parámetros de suministro, por lo que es crucial supervisar estos parámetros para atender inmediatamente cualquier variación que pueda causar fallas en el funcionamiento de los equipos industriales.

Actualmente, muchas empresas industriales enfrentan problemas eléctricos y de funcionamiento de máquinas, a menudo debido al bajo factor de potencia causado por cargas inductivas como motores, transformadores y generadores (Montoya-Londoño et al., 2018).

Un bajo factor de potencia expone a las compañías a inconvenientes como pérdidas en las líneas de distribución, sobrecarga en transformadores, y un incremento en la caída de voltaje, lo que resulta en un suministro inadecuado a las cargas, además de implicar multas por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica (Saucedo Martínez et al., 2008).

Elevar el FP reduce las pérdidas de energía en las redes de distribución, contribuyendo a la disminución de emisiones de CO2. La Comisión Reguladora de Energía penaliza a las empresas con un FP por debajo de 0.9, por lo que su corrección ofrece beneficios económicos y medioambientales (AMERIC., s.f.).

Este proyecto propone el desarrollo e integración de los subsistemas necesarios para un Sistema de Control Inteligente y Analizador de la Calidad de Energía para la compensación del Factor de Potencia, utilizando un banco de capacitores automático, un Controlador Lógico Programable (PLC) y un Sistema de Monitoreo Inteligente (PAC), complementado con un HMI para el análisis del sistema, con el objetivo de lograr la eficiencia energética. El proyecto también forma parte de una iniciativa para construir prototipos didácticos para la formación de recursos humanos de alta calidad y el auto-equipamiento de laboratorios especializados, en este caso en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

2. Métodos.

El diseño y construcción de este banco de pruebas se realizó mediante las siguientes fases de desarrollo:

Revisión bibliográfica y análisis de requerimientos:

Se analizó la teoría sobre calidad de energía, factor de potencia, compensación con bancos de capacitores, normativas eléctricas y estándares de la industria. También se identificaron herramientas como PLC y PAC.

Diseño del sistema:

Se desarrollaron el esquema eléctrico y los diagramas de conexión, así como el diseño de la estructura física y el gabinete para entornos industriales.

Construcción del banco de capacitores automático:

Los capacitores se integraron con el PLC y sensores de medición para la adquisición de datos de tensión, corriente, factor de potencia y armónicos.

Desarrollo de sistema de monitoreo y control:

Se creó un sistema de adquisición de datos en tiempo real mediante el PAC con una interfaz de usuario intuitiva para la visualización de parámetros eléctricos y el estado del sistema de compensación.

Validación y pruebas del sistema:

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones operativas, analizando los datos para verificar la efectividad del banco de capacitores.

3. Desarrollo.

Para la construcción del prototipo, se utilizaron componentes industriales para asegurar robustez y confiabilidad. Los componentes clave incluyen el Siemens SENTRON PAC 3220, contactores trifásicos, interruptores termomagnéticos, clemas, TC tipo Donut, condensadores, switch ethernet, botoneras y selector.

Diagrama de potencia y control.

El diseño del sistema se realizó con el software ePLAN v2022. La capacidad de los capacitores se calculó para compensar 25 KVAR inductivos en el sistema, dividida en 5 pasos, resultando en un valor de referencia de 79.8 uF (4.6 kVA/240V). La Figura 1 muestra la etapa de potencia junto con el SENTRON PAC 3220.

El diagrama que muestra el controlador Siemens S7-1200 con los elementos de potencia se presenta en la Figura 1.

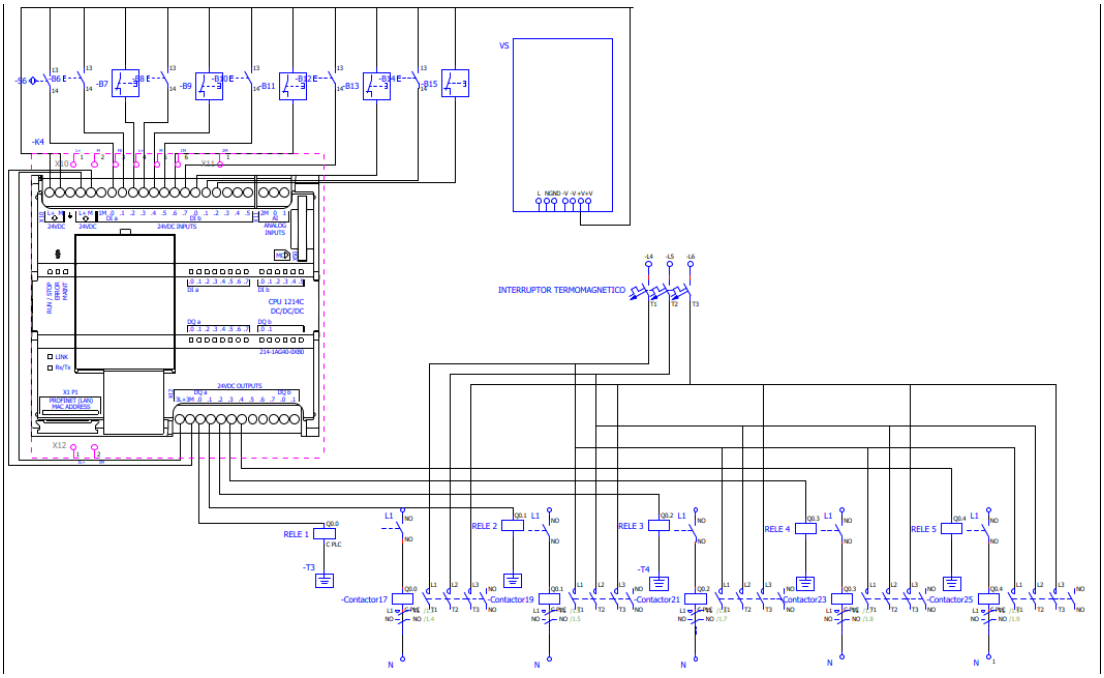


Figura 1. Diagrama de control del sistema automático de corrección de f.p. (autoría propia).

Dimensionamiento del banco de capacitores (3φ en Δ).

Datos del sistema a compensar:

- Potencia reactiva: Q_{tot} = 25 kVAr (inductiva).
- Número de pasos: N = 5 ⇒ $Q_{paso} = \frac{Q_{tot}}{N}$ = 2 kVAr.
- Sistema trifásico, conexión de capacitores en Δ.
- Tensión línea–línea: V_{LL} = 240 V.
- Frecuencia: f = 60 Hz.
- ω = 2πf = 2π(60) = 376.99 rad/s.

Relación Q–C para banco 3φ en Δ.

En una conexión Δ, cada capacitor está sometido a V_{LL} y la potencia reactiva total es:

$$Q_{3\varphi,\Delta} = 3\,\omega\,C_{\varphi}{V_{LL}}^{2}$$ -------- Ecuación 1.

donde C_{φ} es la capacitancia de cada capacitor (cada rama del triángulo).

Despejando: $$C_{\varphi} = \frac{Q_{3\varphi,\Delta}}{3\,\omega\,C_{\varphi}{V_{LL}}^{2}}$$ -------- Ecuación 2.

Cálculo de capacitancia por paso.

Primero, la potencia por paso:

$$Q_{paso} = \frac{Q_{tot}}{N} = \frac{25\ kVAr}{5} = 5\ kVAr$$ -------- Ecuación 3.

Aplicando (2):

$$C_{\varphi} = \frac{5000}{[3(376.99)(240^2)]} = \frac{5000}{[3(376.99)(57600)]} = 7.67532 \times 10^{-5} F = 76.75\ \mu F$$ -------- Ecuación 4.

Resultado (por paso, Δ):

Cada paso de 5 kVAr requiere 3 capacitores de C ≈ 76.7 µF (uno por rama de Δ).

Capacitancia equivalente total (todos los pasos conectados).

Como los pasos se conectan en paralelo (por fase) al ir entrando:

$$Q_{\varphi,total} = NQ_{\varphi,paso} = 5(76.70) = 383.5\ \mu F$$-------- Ecuación 5.

Reactivo y corriente por capacitor (rama de Δ).

Cada paso aporta Q_{paso}= 5000 VAr; por simetría, por rama:

$$Q_{rama} = \frac{Q_{paso}}{3} = \frac{5000}{3} = 1666.7\ VAr$$-------- Ecuación 6.

La corriente RMS en cada capacitor (rama) es:

$$I_{rama} = \frac{Q_{rama}}{V_{LL}} = \frac{1666.7}{240} = 6.94\ A$$ -------- Ecuación 7.

La reactancia capacitiva por rama:

$$X_C = \frac{1}{(\omega\ Q_{\varphi,paso})} = \frac{1}{[(376.99)(76.70 \times 10^{-6})]} = 34.58\ \Omega$$-------- Ecuación 8.

Corriente de línea por paso y total.

Para un sistema trifásico balanceado, la potencia reactiva se relaciona como:

$$Q = \sqrt{3} V_{LL} I_L \quad (para\ carga\ puramente\ reactiva,\ \ sin\varphi = 1)$$ -------- Ecuación 9.

Luego:

$$I_{L,paso} = \frac{Q_{paso}}{\sqrt{3}\, V_{LL}} = \frac{5000}{\sqrt{3}(240)} = 12.02\ A$$ -------- Ecuación 10.

Con todos los pasos conectados:

$$I_{L,tot} = \frac{Q_{tot}}{\sqrt{3}\, V_{LL}} = \frac{25000}{\sqrt{3}(240)} = 60.1\ A$$-------- Ecuación 11.

Tabla 1. Resumen numérico.

Q_{tot}	25 kVAr
N	5 pasos
Q_{paso}	5 kVAr
$C_{\varphi,paso}\Delta$	76.7 µF por rama (3 por paso)
$C_{\varphi,total}$	383.5 µF por rama (si entran los 5 pasos)
$I_{L,paso}$	12.02 A
$I_{L,tot}$	60.1 A
I_{rama} (por capacitor, paso)	6.94 A
X_C (por capacitor, paso)	34.58 Ω

Construcción del banco de capacitores automático e instalación del sistema de monitoreo.

El prototipo fue construido en un gabinete metálico IP65 de 500x500x250mm acondicionado para los capacitores y componentes eléctricos y de control. La Figura 2 muestra la distribución exterior del gabinete y la Figura 3 muestra el montaje de los capacitores, el sistema de control y las protecciones.

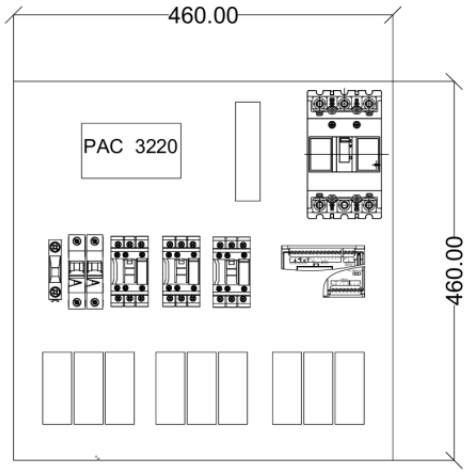


Figura 2. Distribución exterior del gabinete y dimensiones para el montaje de capacitores.

Figura 3. Instalación del banco de capacitores y cableado del sistema de control.

Resultados.

Se implementó un sistema de control con el PLC Siemens S7-1200 y el software TIA PORTAL V17, con modos de operación Manual y Automático. El sistema fue probado en el Beneficio Seco de café de la Finca Nuevo México para la corrección del factor de potencia debido a los motores instalados para el proceso de producción de café.

- La realizó una programación del sistema (manual/automático) en TIA PORTAL V17, cuya autoría está en proceso de registro en INDAUTOR.
- Se generó un modelo 3D del sistema de control en ePLAN 2022 (Figura 4) para posible patente o modelo de utilidad.
- En las pruebas in situ, se logró corregir el factor de potencia hasta 0.99, monitoreado con el SENTRON PAC 3220 (Figura 5).

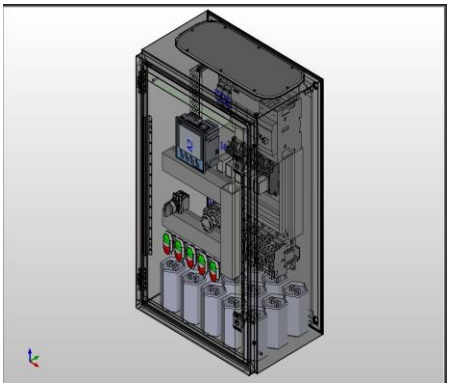


Figura 4. Instalación del banco de capacitores y cableado del sistema de control.

Figura 5. Mejora del f.p. hasta 0.99 en las pruebas in situ en el Beneficio Seco de café de la Finca Nuevo México.

Conclusiones.

Los resultados demuestran la fiabilidad de aplicar esta tecnología para la corrección del factor de potencia. El sistema tiene la capacidad de adaptarse a las necesidades de empresas o productores que utilizan equipos que afectan la calidad de la energía y el valor óptimo del FP.

La implementación de este sistema en granjas agrícolas podría ser de gran beneficio, permitiendo el escalamiento del prototipo para optimizar el uso de energía, disminuir costos de operación y generar valor agregado. Las pruebas en sitio confirmaron la corrección del factor de potencia hasta 0.99, lo que se espera resulte en una reducción del consumo de energía. Es fundamental que la implementación se personalice a las necesidades de cada cliente, con los cálculos adecuados para una compensación correcta.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 23109.25-P de la convocatoria de apoyo a Proyectos de Desarrollo Tecnológico e Innovación 2025 y las facilidades del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

AMERIC. (s.f.). *El control del factor de potencia y sus adecuaciones para el cumplimiento del Código de Red*. Recuperado de https://socio.americ.org.mx/el-control-del-factor-de-potencia-y-sus-adecuaciones-para-el-cumplimiento-del-codigo-de-red

Montoya-Londoño, J. A. y J. M. Ramírez-Salazar (2018). *Análisis y Mejora del Factor de Potencia en Instalaciones Industriales*. Revista Energética, vol. 14, núm. 2, pp. 15-28.

Saucedo Martínez, D. y J.L. Texis Villagran (2008). *Factores que afectan la calidad de la energía y su impacto en el factor de potencia* (Tesis). Instituto Politécnico Nacional, 2008.

Información de los autores.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos, Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica e Ingeniero en Electrónica en el ITTG. Cuenta con certificaciones CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks. Es acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Profesor con Perfil Deseable e integrante del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

José Ángel Zepeda Hernández, Ingeniero Industrial Eléctrico, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Catedrático e investigador en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del ITTG. Profesor de tiempo completo con Perfil Deseable y Líder del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

Osbaldo Ysaac García Ramos, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Docente con 13 años de experiencia y cursos de especialización en Mecatrónica en Alemania, Austria y México. Profesor de tiempo completo con Perfil Deseable e integrante del Cuerpo Académico en formación "Sistemas de Control Inteligentes".

Alexis de Jesús Flores García, Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG 2010); Maestro en Ciencias en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO 2014). Docente en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del (ITTG). Es profesor con perfil deseable PRODEP. Colaborador del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes”.

Karlos Velázquez Moreno, Ingeniero Industrial Eléctrico de Profesión, Maestro en Ciencias en Administración, Catedrático y actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, imparte asignaturas en el área de Ingeniería Eléctrica y también es Unidad de Verificación de Instalaciones Eléctricas.

Intercambiador de calor tipo Serpentín con instrumentación electrónica usando Tecnología Industry 4.0.

Coil-type heat exchanger with electronic instrumentation using Industry 4.0 Technology.

Osbaldo Ysaac García Ramos (1).
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx.

Rene Cuesta Díaz* (2). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
rene.cd@tuxtla.tecnm.mx.

Felix Eduardo Gómez Vázquez (3), Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
L21270084@tuxtla.tecnm.mx.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx.

José Ángel Zepeda Hernández (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Alexis de Jesús Flores García (6). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
alexis.fg@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 05, 2025; aceptado en noviembre 24, 2025.

Resumen.

En el presente artículo se presenta el diseño, construcción y automatización de intercambiador de calor tipo serpentín. Fue desarrollado con un enfoque orientado a la Industria 4.0, integrando tecnologías de monitoreo y control en tiempo real para el análisis de variables térmicas y de flujo. El proyecto contempla el diseño mecánico en SolidWorks, la manufactura mediante maquinaria CNC y el diseño eléctrico en EPLAN, incorporando controladores industriales y comunicación a través de protocolos IO-Link e Industrial Ethernet. La implementación de este sistema permite determinar coeficientes de transferencia de calor y evaluar el desempeño térmico, contribuyendo a la optimización de procesos de intercambio de calor en la industria alimenticia.

Palabras claves: Ethernet Industrial, intercambiador tipo serpentín, IO Link.

Abstract.

This article presents the design, construction, and automation of a coil-type heat exchanger. It was developed with an Industry 4.0 approach, integrating real-time monitoring and control technologies for the analysis of thermal and flow variables. The project includes mechanical design in SolidWorks, manufacturing using CNC machinery, and electrical design in EPLAN, incorporating industrial controllers and communication via IO-Link and Industrial Ethernet

protocols. The implementation of this system allows for the determination of heat transfer coefficients and evaluation of thermal performance, contributing to the optimization of heat exchange processes in the food industry.

Keywords: Coil type exchanger, Industrial Ethernet, IO Link.

1. Introducción.

Los intercambiadores de calor son dispositivos utilizados en numerosas industrias para transferir calor de un fluido a otro. Estos intercambiadores son esenciales para mantener la eficiencia y la seguridad en procesos industriales que requieren control de temperatura, (Cengel, 2023).

La transferencia de calor es un concepto fundamental de la termodinámica, esencial para comprender diversos procesos industriales incluidos los sistemas de aire comprimido.

En este articulo analizará las tres formas principales en las que se transfiere el calor: por conducción, por convección y por radiación, y su importancia en diferentes aplicaciones.

Transferencia por conducción: La conducción es la transferencia de calor a través de un material sólido. Se produce cuando las moléculas de una sustancia vibran y transfieren energía a las moléculas adyacentes. Es un proceso fundamental en muchas aplicaciones industriales en las que los materiales necesitan conducir el calor de forma eficaz.

Transferencia por convección: La convección es la transferencia de calor por el movimiento de fluidos (líquidos o gases). Este tipo de transferencia de calor es fundamental en sistemas en los que es necesario el movimiento de fluidos para que el calor se distribuya de manera uniforme.

Transferencia por Radiación: La radiación es la transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere ningún medio y puede producirse en un espacio vacío.

El llamado principio cero de la termodinámica es el que explica el funcionamiento del intercambiador de calor. Según este, cuando dos objetos (en nuestro caso, fluidos) a distinta temperatura entran en contacto, se produce una transferencia de calor entre ambos hasta que se llega al equilibrio térmico, es decir, hasta que sus temperaturas se igualan. Esto es perfectamente consecuente con la ley de la conservación de la energía, puesto que el flujo de calor también es una transferencia de energía y, por tanto, no es que el calor desaparezca, sino que fluye hacia el elemento con menor temperatura.

Los intercambiadores de calor (en su gran mayoría) fuerzan 3 transferencias de calor, los cuales se verán a continuación, (Atlas Copco, 2025).

- Convectiva: El fluido caliente transmite su calor a la pared interna del tubo o de la placa.
- Conductiva: La que se produce a través de la propia placa o tubo.
- Convectiva: En este caso, el calor se transmite desde la parte externa del tubo o placa al fluido con menor temperatura.

Los sensores y actuadores están evolucionando rápidamente. Ya no solo transfieren datos a través de interfaces analógicas y binarias estándares, ahora también son cada vez más inteligentes gracias a los microprocesadores incorporados. Estos dispositivos establecen las bases para una inteligencia adicional del dispositivo que trasciende de la función real del sensor. Además de transferir los valores medidos y las señales de conmutación, los sensores IO-Link pueden almacenar parámetros y proporcionar información adicional sobre aspectos como la calidad de la señal y el estado del dispositivo, (Pepperl + Fuchs, 2025).

Ignition Software de Automatización Industrial es una plataforma desarrollada por Inductive Automation que permite integrar y supervisar sistemas industriales de manera eficiente y escalable. Lanzado en 2010, Ignition es una solución

basada en tecnología SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y HMI (Interfaz Hombre-Máquina), diseñada para mejorar la productividad y flexibilidad en entornos industriales, (Autexopen, 2025).

2. Métodos.

La metodología adoptada en este trabajo se basa en un enfoque experimental, orientado al diseño y automatización de un prototipo de intercambiador de calor para fines didácticos, enfocado en la enseñanza de los principios de transferencia térmica. El desarrollo contempla la integración tecnológica completa, desde las bombas impulsoras de los fluidos y sus dispositivos de control, hasta la instrumentación electrónica encargada de la medición de variables como temperatura, flujo volumétrico y nivel, utilizando un controlador industrial y un sistema de supervisión y adquisición de datos.

Intercambiador de calor serpentín.

Un serpentín de enfriamiento y calentamiento es un dispositivo utilizado en la industria para controlar la temperatura de líquidos contenidos en tanques. Consiste en un conjunto de tubos enrollados o dispuestos en forma de espiral que se instalan dentro del tanque. Este sistema permite la circulación de un fluido caliente o frío a través de los tubos del serpentín, transfiriendo calor al líquido contenido en el tanque para calentarlo o absorber calor para enfriarlo, según sea necesario. Los serpentines son fundamentales en numerosos procesos industriales donde se requiere mantener una temperatura específica para garantizar la calidad del producto y la eficiencia del proceso.

Funcionamiento básico del serpentín.

El diseño de serpentines de enfriamiento es un proceso clave en la industria, donde se aplican los principios fundamentales de transferencia de calor para garantizar un funcionamiento eficiente. Los serpentines de enfriamiento están compuestos por varias partes, incluyendo tubos, aletas y conexiones, que trabajan en conjunto para facilitar el intercambio de calor. En el caso específico de un serpentín de enfriamiento de aceite, su diseño se adapta para garantizar una disipación efectiva del calor generado por el aceite en el proceso industrial.

Las partes de un serpentín de enfriamiento típicamente incluyen tubos de diferentes diámetros y longitudes, dispuestos en configuraciones específicas para maximizar el contacto con el fluido que se está enfriando. Además, las aletas se añaden a los tubos para aumentar la superficie de transferencia de calor, lo que mejora la eficiencia del enfriamiento. Estas partes trabajan en conjunto para facilitar el proceso de enfriamiento, donde el calor del fluido se transfiere al serpentín y luego se disipa hacia el entorno circundante.

Por otro lado, en el proceso de calentamiento, el serpentín de enfriamiento de aceite opera de manera inversa. El fluido caliente circula a través de los tubos del serpentín, transfiriendo calor al aceite y elevando su temperatura según lo requerido por el proceso industrial. En ambos casos, el diseño adecuado del serpentín de enfriamiento es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo y una larga vida útil del equipo, lo que contribuye significativamente a la eficiencia y la rentabilidad de la operación industrial, (Grupo Acura, 2025).

Una representación de este tipo de sistema se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema intercambiador de calor tipo serpentín.

LMTD (Diferencia media logarítmica de temperaturas).

Un intercambiador de calor (IC) es un dispositivo que recupera calor de una corriente de fluido a alta temperatura transfiriéndolo a una corriente de temperatura inferior. Así se puede plantear un modelo simplificado que no se considere cómo están construidos los intercambiadores, es decir, no importa si están ensamblados con placas o tubos, ni otros detalles de construcción.

En este modelo simplificado, un IC se describe con dos flujos: el de temperatura mayor se llamará "flujo caliente" y el de temperatura inferior, "flujo frío", y con cuatro temperaturas, dos de entrada y dos de salida. En un IC hay dos espacios, y en cada uno circula uno, y solo uno de los flujos. A estos espacios se les llamará "interno" y "externo", sin importar si el fluido que circula en cada uno de ellos corresponde al flujo frío o al flujo caliente.

La cantidad de calor (Q), que transfiere un IC depende del coeficiente de transferencia global (U), de las temperaturas de entrada y salida de las corrientes, y de la configuración. El método LMTD (siglas en inglés de Logarithmic Mean Temperature Difference) relaciona el área de transferencia, la transferencia de calor, y las temperaturas de entrada y salida usando cuatro simplificaciones:

- El intercambiador opera en estado estacionario.
- El coeficiente U se asume constante en todo el intercambiador.
- Las pérdidas de calor hacia los alrededores son despreciables.
- Se conocen las cuatro temperaturas de entra y salida de las corrientes del intercambiador.

Para exponer la deducción del método LMTD se usa un intercambiador 1 -1, pero el procedimiento es análogo para otras configuraciones. El flujo de calor depende de la diferencia de temperatura At entre las dos corrientes en circulación:

$$Q = U * A * \Delta t \qquad (1)$$

$\Delta t = Es\ una\ diferencia\ de\ temperatura$
$U = Es\ el\ coeficiente\ global\ de\ transferencia\ de\ calor.$

Haciendo uso de letras mayúsculas y minúsculas para diferenciar las corrientes implicadas en el balance de energía:

$$dQ = U * (T - t) * dA \qquad (2)$$

$$dQ = W * Cp * dT = w * cp * dt \qquad (3)$$

Donde:

$W, w = Flujos\ másicos\ de\ ambos\ fluidos$
$Cp, cp = Capacidades\ caloríficas\ de\ ambos\ fluidos$
Para este desarrollo se supone que el intercambiador opera en contracorriente:

$$\int_{T_2}^{T} W * Cp * dT = \int_{t_1}^{t} w * cp * dt \qquad (4)$$

Integrando y despejando se obtiene:

$$LMTD = \frac{\Delta t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)} \qquad (5)$$

Sustituyendo en la ecuación (1), se obtiene:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{U} * \mathrm{A} * \mathrm{LMTD} \qquad (6)$$

Para intercambiadores tipo 1-2, 2-4, etc., es necesario corregir la ecuación (6), para seguir utilizando la LMTD, es decir:

$$Q = U * A * F_T * LMTD \qquad (7)$$

Donde F_T es un factor de correlación que depende del tipo de intercambiador (1-2, 2-4, etc.). Puede ser calculado o encontrado en tablas.

Método KERN.

Este método está concebido, en principio, para intercambiadores sin cambio de fase; incluye correlaciones para calcular la transferencia de calor y la caída de presión. El orden de los cálculos depende de la naturaleza del problema.

- Para un problema de dimensionamiento, el primer paso es estimar A (área de transferencia) con base en un valor aproximado del coeficiente de transferencia global U (se encuentran tabulados), Luego se Proponen las dimensiones del intercambiador y, por último, se usa el método de Kern u otro método equivalente de diseño para recalcular el área. Si el valor requerido de A es menor que el propuesto, el diseño es válido, ya que siempre se busca que el Intercambiador esté sobredimensionado.
- Para un problema de evaluación, el área está fijo. Si existen las condiciones de operación, incluidas las temperaturas de entrada y salida, se puede calcular el A requerida; si es menor que el área del intercambiador, la operación en esas condiciones es viable. El otro caso posible es la estimación de las temperaturas de salida mediante el método NTU.

Las correlaciones se emplean de acuerdo con el tipo de intercambiador:

- Cuando el intercambiador no tiene bafles, se utiliza el modelo de intercambiador de doble tubo, cambiando el diámetro equivalente en la coraza. Se considera que este tipo de IC es una derivación del tipo doble tubo.
- Para intercambiadores con bafles, se emplean correlaciones particulares parea el lado de coraza.

El método de Kern, el coeficiente global de transferencia se obtiene despreciado la resistencia de la pared del tubo y agregando el factor de obstrucción.

- Área interna:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o * \left(\frac{d_o}{d_i}\right)} + R_D \qquad (8)$$

- Área externa:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o * \left(\frac{d_o}{d_i}\right)} + R_D \qquad (9)$$

Las correlaciones sugeridas para h_i son:

- Las correlaciones ϕ por temperatura de la pared se utiliza sobre todo para fracciones de petróleo.
- Cuando hay que calcular t_w (temperatura de pared) es necesario iterar, pero a menudo se converge en la primera iteración.
- En régimen laminar, $100 < Re < 2100$, no válida para agua.

$$h_i = 1.86 * \left(\frac{k}{D}\right) * \left(\frac{4*w*c}{\pi*k*L}\right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_c}\right)^{0.14} \quad (10)$$

En régimen turbulento, $Re \geq 2100$, no válida para agua:

$$h_i = 0.0027 * \left(\frac{k}{D}\right) * (Re)^{0.8} * (\mathrm{P_r})^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (11)$$

El término $\phi = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$ es la correlación por la temperatura de pared. En algunos casos, cuando la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura no es significativa, se puede despreciar.

- Para agua, se da una correlación gráfica de h en función de la velocidad lineal V para tubos de ¾ BWG. También hay gráficas de correlación para otros diámetros de tubería (Figura 3).
- Para un arreglo en cuadro:

$$D_e = 4 * \frac{PT^2 * \left[\left(\frac{d_o^2}{4}\right)\right]}{\pi * d_o} \quad (12)$$

- Para un arreglo triangular (equilátero):

$$D_e = 4 * \frac{\left[\left(\frac{PT}{2}\right) * \left(\frac{\sqrt{3} * PT}{2}\right)\right] - \left[\left(\frac{\pi}{2}\right) * \left(\frac{d_o^2}{4}\right)\right]}{\frac{(\pi * d_O)}{2}} \quad (13)$$

El Número de Reynolds se calcula haciendo:

$$Re = \frac{D_e * G_S}{\mu} \quad (14)$$

Donde:

$$G_s = \frac{w}{a_s} \quad (15)$$

$$a_s = \frac{D_s * C' * B}{PT} \quad (16)$$

Donde:
$D_s = Diámetro\ interno\ de\ la\ coraza$
$PT = es\ el\ pitch\ la\ separación\ entre\ los\ centros\ de\ los\ tubos$
$B = es\ la\ separación\ entre\ deflectores$

Si hay más de un paso por la coraza, a_s se divide en el número de pasos.

La aplicación de la correlación por temperatura de pared requiere calcular iterativamente t_w en la forma de la ecuación:

$$t_w = t_i + \left[\left(\frac{h_o}{h_{io} + h_o}\right) * (t_o - t_i)\right] \quad (17)$$

Para la primera iteración se utiliza los valores de $\frac{h_o}{\phi_o}$, h_{io}/ϕ_{io}
La caída de presión de por los tubos tiene dos contribuciones

$\Delta P_L = la\ caída\ de\ presión\ por\ el\ recorrido\ del\ fluido\ en\ los\ tubos.$
$\Delta P_a = la\ caída\ de\ presión\ por\ los\ accesorios$

Así:

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_a \tag{18}$$

Para intercambiadores de doble tubo, se desprecia ΔP_a por el tubo interior. Para estimar ΔP_L se puede aplicar la ecuación de Fanning u otras correlaciones para f en la expresión:

$$\Delta P_L = f * \left(\frac{4*G^2*L}{2*\rho*D*\phi}\right) \tag{19}$$

Esto también es válido para el espacio anular entre tubos concéntricos, o coraza sin bafles.

$$\Delta P_L = f * \frac{4*G^2*L}{5.22*10^{10}*D_e*s*\phi} \tag{20}$$

Donde:
$P = es\ la\ presión\ \ en\ PSI.$
$s = es\ la\ gravedad\ específica$
$f = factor\ de\ fricción\ en\ unidades\ consistentes\ con\ G\ en \frac{lb}{h*ft^2}$
$D_e = diámetro\ equivalente\ (depende\ del\ arreglo\ en\ los\ tubos)$
$L = es\ la\ longitud\ de\ los\ tubos\ en\ ft$

El término ΔP_a depende del número de pasos (n); así, para IC de tubos y coraza.

$$\Delta P_a = (4 * n) * \left(\frac{G^2}{2*\rho}\right) \tag{21}$$

Para la caída de presión por la coraza, con bafles se sugiere la expresión.

$$\Delta P = f * \frac{4*G_S^2*D_S*(N_b+1)}{2*\rho*D_e*\phi} \tag{22}$$

Donde:
L/B es el número de baffles calculado, también se puede obtener de la expresión.

$$f = 1.7424 * (Re)^{-0.19} \tag{23}$$

Alternativamente se puede usar la misma ecuación con P en PSI.

$$\Delta P = f * \frac{G_S^2*D_S*(N+1)}{5.22*10^{10}*D_e*s*\phi} \tag{24}$$

Donde f está correlaciona en forma gráfica, o se puede calcular como $f = 0.0121 * (Re)^{-0.19}$.

Para el diseño y fabricación de calor tipo serpentín, se tomó en cuenta equipos de la más alta calidad, que satisfagan las necesidades requeridas

Se utilizó material de policarbonato como material para la carcasa y las bridas, se utilizó este material por sus características ya que es termoplástico de alta ingeniería, este material es empleado en aplicaciones industriales gracias a sus propiedades mecánicas, térmicas y ópticas.

Principales propiedades del policarbonato:

Alta resistencia al impacto: La resistencia del policarbonato es hasta 200 veces mayor que las del vidrio

Transparencia óptica: El policarbonato tiene una muy tiene una muy buena claridad visual, esto nos ayuda a poder visualizar al interior del sistema

Estabilidad térmica: Su temperatura máxima de uso continuo es de unos 130 °C sin que tenga deformaciones.

Medidas y fabricación de las bridas.

Para el intercambiador de calor, se usó las bridas, ya que este es fundamental en la unión y sellado de componentes. Las bridas permiten hacer las conexiones de forma estanca el tubo o serpentín del intercambiador, evitando así fugas en los fluidos, de igual manera mantienen alineados el haz de tubos y las tuberías de entrada y salida para el correcto paso de fluidos.

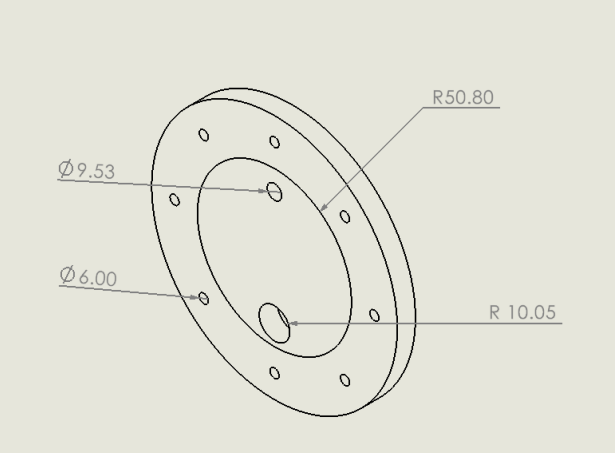


Figura 2. Vista isométrica y medidas de las bridas.

Para el diseño de la siguiente brida se consideró la facilidad de montaje y desmontaje. Esto es posible gracias a que las bridas están atornilladas y pueden desarmarse con facilidad, lo que permite extraer el serpentín para inspección, limpieza o reparación sin dañar las tuberías.

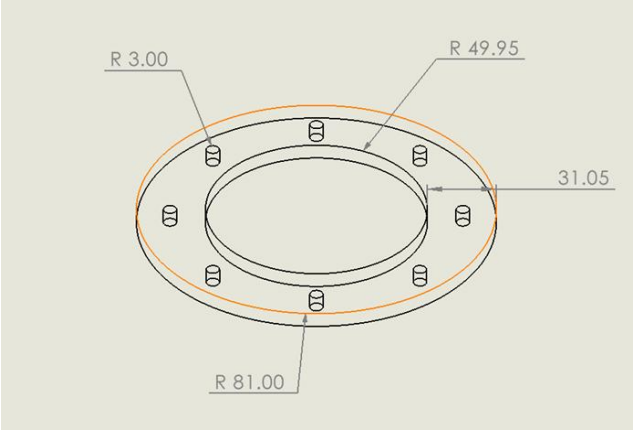


Figura 3. Medidas exactas de las bridas.

La carcasa del intercambiador de calor fue fabricada de policarbonato, lo cual se mencionó sus propiedades anteriormente, este tuvo actúa como el recipiente principal del serpentín de cobre, permitiendo la contención y visualización del fluido que circula por el sistema.

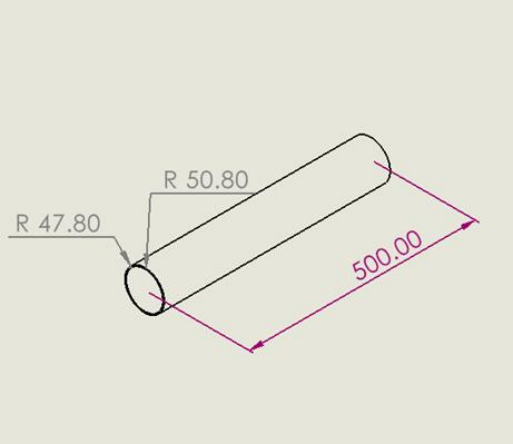


Figura 4. Medidas exactas de la carcasa.

Fabricación y medidas del serpentín.

Para el interior de nuestro sistema de intercambiador de calor se seleccionó el cobre como material para la fabricación del serpentín. Esta decisión se tomó principalmente por sus excelentes propiedades de resistencias térmicas, por su resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación, por los casos mencionados anteriormente, este se convierte en el perfecto material para la fabricación del serpentín, ya que es uno de los materiales más adecuados para aplicaciones en el intercambio de calor.

A continuación, se mencionarán algunas propiedades del cobre.

Alta conductividad térmica: El material de cobre se sitúa entre 372.1 y 385.2 w/(m*K) lo cual nos permite una trasferencia de calor muy eficiente entre el fluido que circula por el medio externo y el que pasa por el serpentín, esto es muy importante para poder lograr un sistema térmica correcta y eficaz.

Resistencia a la corrosión: El cobre es uno de los metales que cuenta con mayor resistencia a la corrosión, es decir, no se oxida ni deteriora fácilmente. Esto, gracias a una película protectora que crece naturalmente a su alrededor en determinados medioambientes.

Propiedades antimicrobianas: “Básicamente el cobre genera radicales libres que dañan el ADN o el ARN de las bacterias o virus, impidiéndoles replicarse”.

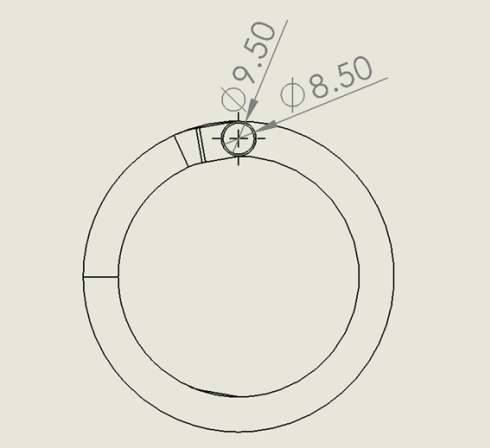


Figura 5. Medidas del serpentín.

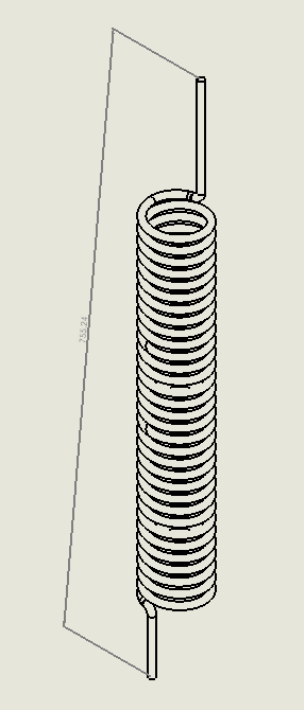


Figura 6. Vista derecha del serpentín.

Inicialmente se consideró la posibilidad de calentar el tubo de cobre para facilitar el doblado. Sin embargo, durante las primeras pruebas se observó que el material sufría deformaciones indeseadas, como aplanamientos y pérdida de sección transversal, lo cual afectaba negativamente la eficiencia del flujo y la estética del diseño.

Por esta razón, se optó por una técnica de doblado progresivo en frío, es decir, sin aplicar calor.

Figura 7. Doblado de tubo para la fabricación del serpentín.

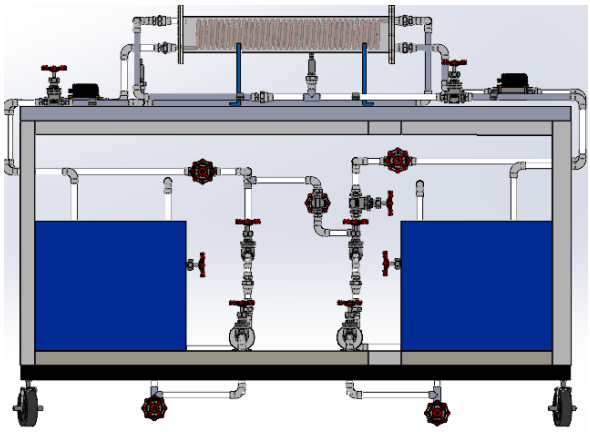


Figura 8. Vista frontal del intercambiador de calor.

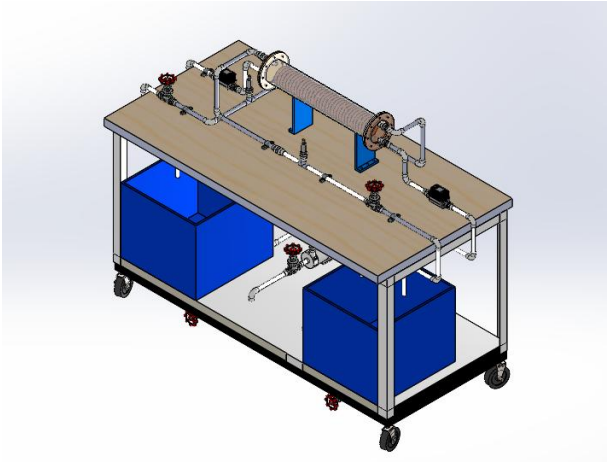


Figura 9. Vista isométrica del intercambiador de calor.

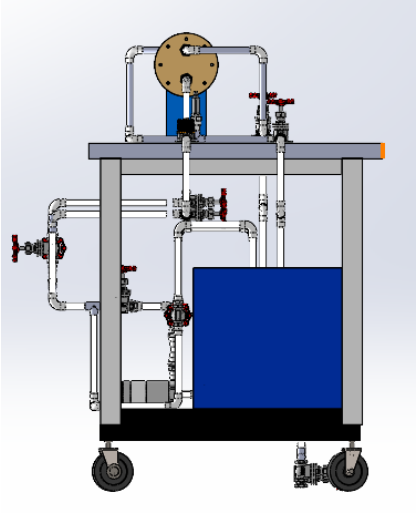


Figura 10. Vista izquierda del intercambiador de calor.

Diseño del sistema de automatización, la Red profinet y IO Link.

IO-Link es una tecnología de comunicación estandarizada e independiente del fabricante para sensores y actuadores. Está estandarizada de acuerdo con la norma IEC 61131-9 y es compatible con cualquier bus de campo del mercado. Incluso los sensores y actuadores más sencillos pueden proporcionar señales de conmutación, identificación y datos de diagnóstico en toda la estructura de la planta a través de un cable estándar de tres núcleos sin apantallamiento. Esto crea una comunicación bidireccional coherente entre el sistema de control y el nivel más bajo de sensor/actuador.

En todo el mundo, las empresas de todas las industrias apuestan cada vez más por las avanzadas tecnologías de procesamiento de datos e información para mejorar la eficiencia de todo el sistema. En estos casos, nunca falta IO-Link. Esta innovadora tecnología permite a los sensores transmitir información de diagnóstico al PLC y, al mismo tiempo, al sistema informático de nivel superior, (IFM, 2025).

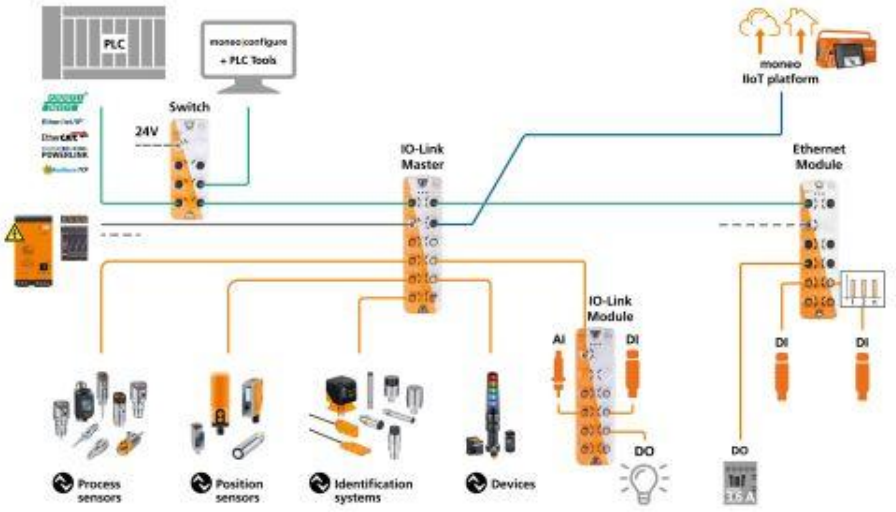


Figura 11. Arquitectura de Comunicación Industrial con IO-Link.

Una vez haciendo las configuraciones correctas desarrollado en el software CAD SolidWorks, se avanza a la etapa de manufactura asistida por computadora (CAM) donde se genera el código G para la correcta ejecución del proceso de fabricación en una maquina CNC.

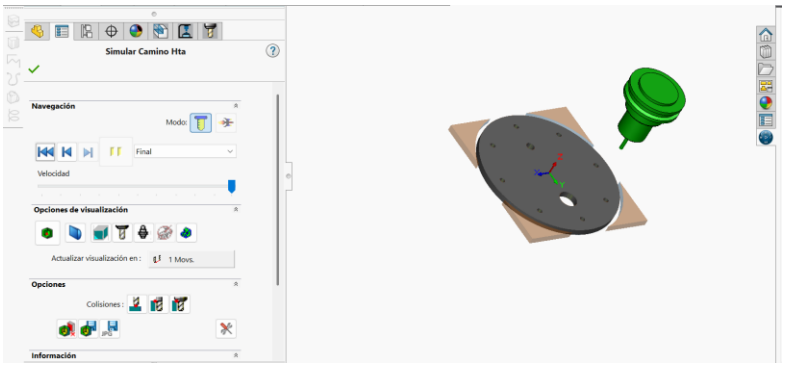


Figura 12. Desarrollo Cad de las partes del intercambiador de calor.

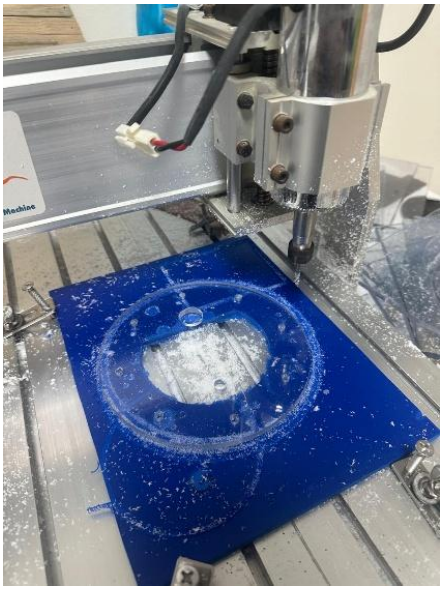


Figura 13. Manufactura en maquina CNC.

Una vez teniendo las bridas y las tapas mediante manufactura CNC, se precedió a medir y cortar el tubo de policarbonato (carcasa). Con apoyo del adhesivo y la lampara de luz UV, se adhieren las bridas y las tapas, lo cual se requirió 2 días de exposición solar.

Figura 14. Corte del tubo de policarbonato.

Para poder presentar con éxito el equipo construido, se utilizó una mesa de acero inoxidable, de igual manera se utilizaron tanques de almacenamiento la cual se le hicieron algunas perforaciones para poder adaptar el equipo con las necesidades requeridas.

Figura 15. Ensamble del intercambiador de calor.

Para la realización de las conexiones se utilizó tubo CPVC de 1/2 pulgada, debido a que este material presenta buena resistencia a la presión y a la temperatura, además de ser ligero y fácil de instalar. El CPVC es adecuado para aplicaciones hidráulicas e industriales porque no se oxida ni se corroe, garantizando un flujo confiable en el sistema. Este tubo se usó tanto como en intercambiador de calor tipo serpentín y tubos y coraza.

Figura 16. Ensamble final del intercambiador de calor tipo serpentín.

Interfaz de supervisión en Ignition para el análisis térmico del intercambiador tipo serpentín.

Se realizó una interfaz básica desarrollada en el software Ignition, en la cual se puede visualizar en tiempo real los parámetros de operación del intercambiador de calor tipo serpentín. En la siguiente imagen se puede visualizar las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos involucrados en el proceso de intercambio térmico.

Pantalla principal en Ignition que permite seleccionar la visualización del proceso en tiempo real o las gráficas de tendencias de temperatura y flujo.

Figura 17. Pantalla Principal de ignition.

Resultados.

Monitoreo de temperaturas y caudal.

En la siguiente imagen se visualiza que en el fluido caliente (flujo 1) ingresa al sistema con una temperatura inicial de 54.2°C y tras recorrer por el intercambiador de calor, se reduce a 42.3°C en la salida, con esto se observa una disminución de 11.9°C. Este comportamiento confirma la transferencia de energía térmica desde el fluido caliente hacia el fluido frío a través de la superficie de intercambio.

Por otra parte, el fluido frío ingresa con una temperatura de 30.3°C y alcanza un valor de 35.9°C a la salida, confirmando el incremento de energía absorbida durante el proceso de intercambio.

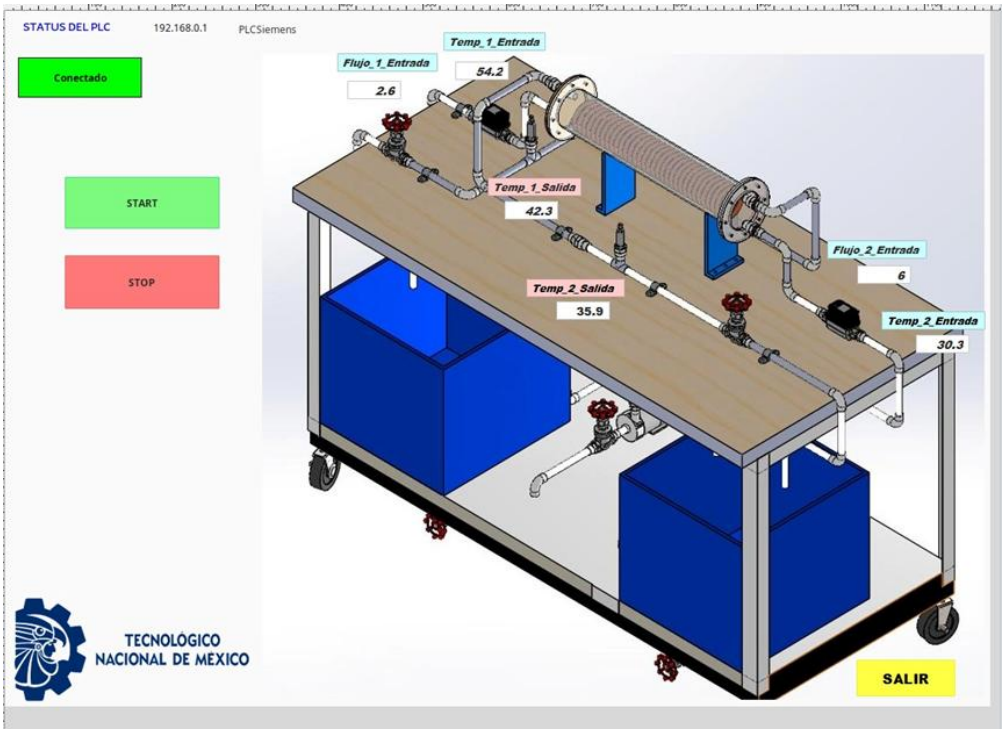


Figura 18. Monitoreo de temperaturas y caudal.

Comportamiento térmico del intercambiador de calor.

En las pruebas experimentales realizadas, se observó el cambio de temperaturas, el fluido que circula por el serpentín presentó una disminución de temperatura conforme avanzó en su recorrido, lo cual nos indica que cedió energía térmica. En la prueba 2, cuando la temperatura de entrada alcanzó los 40°C, la salida se registró en 33.5, lo cual nos muestra una pérdida de calor significativa.

Por otra parte, el fluido en la coraza inicialmente ingresó con una temperatura de 26°C, mostró un incremento significativo en la salida, llegando hasta 38.4°C en las últimas pruebas.

Tabla 1. Pruebas experimentales.

Pruebas	Entrada_Serpentin	Salida_serpentín	Entrada_Tubo_Exterior	Salida_Tubo_Exterior	Flujo_1	Flujo_2
1	31.9°C	29.6°C	25.7°C	27.1°C	3	5
2	40°C	33.5°C	26.1°C	29.4°C	2.8	6
3	47.9°C	38.5°C	26.2°C	32.2°C	3.1	6
4	54.6°C	42.5°C	26.3°C	34.7°C	3.2	6
5	69.2°C	51.5°C	27°C	38.4°C	3	6

Por lo tanto, de manera general, los resultados obtenidos confirman que el sistema funciona de manera adecuada, ya que, el fluido caliente transfiere calor al fluido frio, el cual es el objetivo principal del equipo.

Se realizó cálculos teóricos del intercambiador de calor tipo serpentín empleando el método de la diferencia logarítmica de temperatura (LMTD), posteriormente se llevaron a cabo las pruebas experimentales para obtener las temperaturas reales de salida tanto caliente como del fluido frío.

A continuación, se presentan los cálculos realizados.

Tabla 2. Datos.

Parámetro	Valor	Unidad	Observaciones
Temperatura de entrada al serpentín	31.9	°C	Fluido caliente
Temperatura de entrada a la carcasa	25.7	°C	Fluido frío
Caudal del serpentín	3	L/min	Fluido caliente
Caudal de la carcasa	5	L/min	Fluido frío
Diámetro interior del serpentín	8.50	mm	Tubo de cobre
Diámetro exterior del serpentín	9.50	mm	Tubo de cobre
Radio interior de la carcasa	47.80	mm	Carcasa cilíndrica
Radio exterior de la carcasa	50.80	mm	Carcasa cilíndrica
Longitud de la carcasa	500	mm	0.5 m
Número de vueltas del serpentín	28	vueltas	-
Longitud total del serpentín	7.5	m	-
Fluido usado	Agua	-	-

Serpentín (Fluido caliente):

$$Caudal\ \dot{v}_h = \frac{3L}{min} = \frac{0.003m^3}{min} = 5 * \frac{10^{-5}m^3}{s}\ (recordemos\ que\ 1l = 0.001m^3)$$

Carcasa (fluido frio).

$$Caudal\ \dot{v}_c = 5L/min = 8.33 * 10^{-5}m^3/s$$

Serpentín.

$$Diametro\ interno: 8.5\ mm, \rightarrow radio\ interno\ r_i = 0.00425m; \rightarrow Longitud: L = 7.5m$$

Carcasa.

$$radio\ inetrior: 47.8\ mm = 0.0478m$$
$$radio\ exterior: 50.8mm = 0.0508$$
$$Longitud: 0.5m$$

Propiedades del agua.

$$Densidad\ \ \rho = 997\frac{kg}{m^3}$$
$$calor\ específico\ C_p = 4180\frac{J}{kg}°C$$

Conversión de caudales a kg/s.

$$\dot{m}_h = \rho * \dot{v}_h = 997.5 * 10^{-5} \approx 0.04985kg/s$$
$$\dot{m}_c = \rho * \dot{v}_c = 997.833 * 10^{-5} \approx 0.083kg/s$$

Área de transferencia del serpentín.

Para un tubo cilíndrico, el área externa es:

$$A = \pi * D_0 * L$$
$$D_0 = 0.0095\text{m} \rightarrow L = 7.5m$$
$$A = \pi * 0.0095 * 7.5 \approx 0.224m^2$$

Coeficiente global de transferencia U.

Para un cálculo rápido simplificado con agua:

$$Agua\ a\ agua, flujo\ interno\ turbulento \approx U \approx 500W/m^2\ °C$$

Capacidad térmica de los fluidos.

$$c_h = \dot{m}_h * C_p = 0.04985.4180 \approx 208W/°C$$
$$c_c = \dot{m}_c * c_p = 0.083.4180 \approx 347W/°C$$

Factor de capacidad.

$$c_{m_{in}} = 208W/°C \ \rightarrow \ c_{m_{a\chi}} = 347W/°C$$
$$C_r = \frac{C_{m_{in}}}{c_{\max}} \approx 0.559$$

Numero de unidades de transferencia NTU.

$$NTU = U * \frac{A}{C_{min}} = \frac{500 * 0.224}{208} \approx 0.538$$

Eficiencia del intercambiador.

Para flujo en contracorriente, la eficiencia.

$$\in = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c_r)]}{1 - c_r * \exp[-NTU(1 - c_r)]}$$

$$\in = \frac{1 - \exp[-0.538(1 - 0.599)]}{1 - 0.599\exp[-0.538(1 - 0.599)]} = \frac{0.194}{0.517} \approx 0.375$$

Transferencia de calor.

$$Q = \in * C_{m_{in}} * \left(T_{h,in} - T_{c,in}\right)$$
$$Q = 0.375 * 208 * (31.9 - 25.7) = 0.375 * 208 * 6.2$$
$$208 * 6.2 = 1289.6$$

$$Q = 0.375 * 1289.6 \approx 483.6W$$

Temperaturas de salida.

$$T_{h,out} = T_{h,in} - \frac{Q}{C_h} = 31.9 - \frac{483.6}{208} \approx 31.9 - 2.32 \approx 29.58°C$$

$$T_{c,out} = T_{c,in} + \frac{Q}{C_c} = 25.7 + \frac{483.6}{347} \approx 25.7 + 1.39 \approx 27.09°C$$

Al observar las temperaturas de salida de la prueba 1(figura), se obtuvo una gran similitud entre ambos, lo que confirma que el modelo teórico empleado representa adecuadamente el comportamiento térmico del sistema.

Visualización integrada de variables de entrada y salida en tiempo real.

Para una mejor interpretación, se realizó una gráfica conjunta en la que se muestra simultáneamente las temperaturas de entrada y salida. Esto nos permite observar de manera directa la diferencia entre ambas señales y así poder comparar su comportamiento en el mismo intervalo de tiempo.

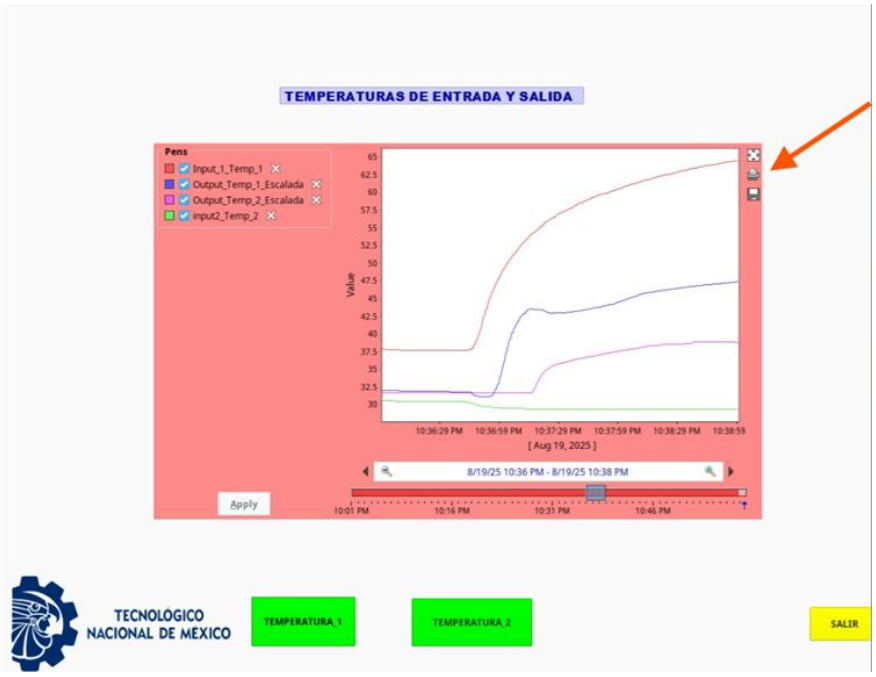


Figura 19. Gráfica simultanea de la temperatura.

Conclusiones.

El desarrollo del intercambiador de calor tipo serpentín cumplió satisfactoriamente con los objetivos de diseño y construcción, garantizando un flujo adecuado de los fluidos y un desempeño térmico eficiente. La selección de materiales —policarbonato para el tubo exterior y cobre para el serpentín— resultó decisiva gracias a sus propiedades de alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión, factores que contribuyeron al buen funcionamiento del sistema.

La integración con la plataforma Ignition permitió un monitoreo básico en tiempo real de las variables térmicas, facilitando la visualización gráfica y el análisis del comportamiento del intercambiador. Esta herramienta se consolidó como un apoyo esencial para la interpretación precisa del proceso de transferencia de calor.

Durante las pruebas experimentales con agua, se registró una disminución de 11.9 °C en el fluido caliente y un incremento de 5.6 °C en el fluido frío, evidenciando la efectividad del sistema en la transferencia térmica, los valores reportados muestran que el fluido caliente cedió una cantidad significativa de calor, mientras que el fluido frío la absorbió de forma proporcional, validando que el intercambiador opera de acuerdo con los principios teóricos de la transferencia de calor por convección y conducción.

En síntesis, los resultados obtenidos confirman que el prototipo responde de manera coherente con los principios teóricos de transferencia de calor y cumple con la función para la cual fue diseñado, demostrando la viabilidad del diseño mecánico y su integración con sistemas de monitoreo industrial.

Referencias bibliográficas.

Atlas Copco (2025). *¿Cómo se transfiere el calor?* Recuperado de https://www.atlascopco.com/es-mx/compressors/wiki/compressed-air-articles/thermodynamics-heattransfer

Autexopen. (2025). *¿Qué es Ignition Software de Automatización Industrial y cuáles son sus características principales?* Recuperado de https://www.autex-open.com/automatizacion-industrial/que-es-ignition-software-de-automatizacion-industrial-y-cuales-son-sus-caracteristicas-principales/#:~:text=caracter%C3%ADsticas%20principales?%20%2D%20AUTEXOPEN-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20Ignition%20Software%20de%20Automatizaci%C3%B3n%20Industrial%20y%20cu%C3%A1les%20son,de%20licenciamiento%20sencillos%20y%20econ%C3%B3micos

Cengel, Yunus A (2023). Termodinámica, cuarta edición, México D.F. Mc Graw Hill Pág. 269 https://www.academia.edu/38408494/Transferencia_De_Calor_y_Masa_4ta_ed_Cengel_McGraw_Hill

IFM. (2025). Resumen del sistema IO-Link. Recuperado 01 de agosto de 2025 de https://www.ifm.com/es/es/shared/technologies/io-link-update/systemueberblick/resumen-del-sistema-io-link

Grupo Acura. (2025). *Serpentín de enfriamiento y calentamiento para tanques industriales*. Recuperado 23 de abril de 2025 de https://grupoacura.com/es/blog/serpentin-enfriamiento/

Pepperl + Fuchs. (2025). *IO-Link: la tecnología de comunicación inteligente*. Recuperado de https://www.pepperl-fuchs.com/es-es/support/technologies/io-link-communication-technology-gp32022#:~:text=Los%20sensores%20y%20actuadores%20est%C3%A1n%20evolucionando%20r%C3%A1pidamente.,m%C3%A1s%20inteligentes%20debido%20a%20los%20microprocesadores%20incorporados

Información de los autores.

Osbaldo Ysaac García Ramos, Ingeniero en Electrónica, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene Cursos especialización en Mecatrónica en Universidad de Esslingen Alemania, en la empresa Emco Salzburgo Austria, en la empresa Festo Estados Unidos y Festo México. Es académico de tiempo completo del Departamento de Eléctrica-Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene 18 años de experiencia docente. Es profesor con perfil deseable PRODEP. Ha desarrollado proyectos de investigación siendo responsable técnico de desarrollo de proyectos financiados por CONACyT y empresas privadas. Cuenta con la certificación de Diseñador mecánico CSWA, CSWP, CSWP Avanzado por la empresa SolidWorks. Obtuvo premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 en Ingeniería Mecatrónica y es Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Con campos de interés en: Automatización de procesos, Industry 4.0, Tecnologías CAD-CAM-CAE, Instrumentación y control.

René Cuesta Díaz, Ingeniería Químico, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la maestría en Ingeniería en Calidad del Agua en la Universidad Autónoma de Chiapas, Campus Ingeniería Civil. Ha realizado estudios en el área ambiental como, por ejemplo, elaboración de prototipos didácticos que brinden información para escalarse en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Se ha desempeñado en Instituciones de gobierno como la Secretaría de Ecología en proyectos de Cuenca Hidrológica en la parte de contaminación de ríos y, en la industria alimenticia en plantas embotelladoras de refrescos en plantas de agua purificada y procesos de envasado. Actualmente se desempeña en la docencia en el Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Félix Eduardo Gómez Vázquez estudió licenciatura en Ingeniería electrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Realizó diversos proyectos que le permitieran desarrollar habilidades relacionadas a su área de estudio. Desarrollo un prototipo a escala nivel laboratorio de un intercambiador de calor de serpentín, proyecto que le permitió obtener el título de la licenciatura en Ingeniería electrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Aldo Esteban Aguilar Castillejos obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el 2011 y el título de Ingeniero en Electrónica en el mismo Instituto, con especialidad en Instrumentación y Control. Cuenta con la certificación CSWA, CSWP, CSWP Avanzado de SolidWorks; así como un Diplomado en el motor de desarrollo de videojuegos UNREAL, Diplomado en Microsoft Teams y Diplomado en competencias para la enseñanza de las ciencias. Acreedor al premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 y Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación (PEI Conacyt) para empresas privadas, desarrollo de patentes con desarrollos tecnológicos en el Estado de Chiapas y fue parte del cuerpo de investigación de la

Universidad del Valle de México Campus Tuxtla hasta el 2022. Actualmente es parte del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes” del I.T.T.G. con desarrollos de proyectos financiados por CONACyT y el TecNM. Con campos de interés en: dispositivos opto-mecatrónicos, manufactura, sensores de fibra óptica, instrumentación y control.

José Ángel Zepeda Hernández es Ingeniero Industrial en Eléctrica y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ITTG. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez e investigador desde 1999, Imparte cátedra en el área de Ingeniería Electrónica y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el ITTG, donde imparte las asignaturas de Diseño con Transistores y Electrónica Básica respectivamente. Líder del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes”.

Alexis de Jesús Flores García es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG 2010); Maestro en Ciencias en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO 2014). Es Técnico-Docente ¾ de tiempo en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG). Tiene 10 años de experiencia docente y Diplomado en Microsoft Teams. Ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación financiados por TecNM. Cuenta con la certificación de Diseñador mecánico CSWA, CSWP por la empresa SolidWorks. Es profesor con perfil deseable PRODEP. Colaborador del cuerpo académico en formación “Sistemas de control inteligentes”. Es presidente de Academia de Ingeniería Electrónica y miembro de la Academia de Ingeniería Mecatrónica.

Machine learning para evaluación de estrategias de enseñanza-aprendizaje del sistema web de planeaciones didácticas.

Machine Learning for evaluating teaching-learning strategies in the web-based didactic planning system.

Luis Manuel Faustino Rico (1).
Estudiante del Tecnológico Nacional de México-Valle de Bravo.
L202007020@vbravo.tecnm.mx.

Mariana Carolyn Cruz Mendoza* (2). Docente del Tecnológico Nacional de México-Valle de Bravo,
mariana.cm@vbravo.tecnm.mx.

Julio Alejandro López Espinoza (3). Estudiante del Tecnológico Nacional de México-Valle de Bravo,
L202007016@vbravo.tecnm.mx.

Cesar Primero Huerta (4). Docente del Tecnológico Nacional de México-Valle de Bravo,
iscprimerocesar@gmail.com.

*corresponding author.

Artículo recibido en diciembre 12, 2024; aceptado en enero 28, 2025.

Resumen.

En el Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo (TESVB), la evaluación de estrategias pedagógicas es un proceso manual y subjetivo que dificulta el análisis efectivo y la identificación de estrategias alineadas con las competencias académicas. Para resolver esta problemática, se desarrolló un modelo de Machine Learning que automatiza la clasificación de estrategias utilizando BERT, un modelo avanzado de PLN, y el algoritmo K-means para agruparlas en categorías significativas. El modelo mejora la precisión en la evaluación al identificar patrones relevantes y proporcionar una base objetiva para decisiones pedagógicas. Las representaciones semánticas generadas por BERT permiten un análisis profundo del contexto y la efectividad de las estrategias, mientras que K-means organiza las estrategias según sus similitudes pedagógicas. Este enfoque optimiza el proceso de enseñanza-aprendizaje al alinear las estrategias con las competencias esperadas y fomentar su mejora continua, destacando su potencial impacto en la educación.

Palabras claves: Análisis, docencia, enseñanza-aprendizaje, predicción**.**

Abstract.

At the Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo (TESVB), the evaluation of pedagogical strategies is a manual and subjective process that hinders effective analysis and the identification of strategies aligned with academic competencies. To address this issue, a Machine Learning model was developed to automate the classification of strategies using BERT, an advanced natural language processing model, and the K-means algorithm to group them into meaningful categories. The model enhances evaluation accuracy by identifying relevant patterns and providing an objective foundation for pedagogical decision-making. The semantic representations generated by BERT enable an

in-depth analysis of the context and effectiveness of the strategies, while K-means organizes them based on their pedagogical similarities. This approach optimizes the teaching-learning process by aligning strategies with expected competencies and fostering continuous improvement, highlighting its potential impact on education.

Keywords: Analysis, prediction, teaching, teaching-learning.

1. Introducción.

En el TESVB, la evaluación de estrategias de enseñanza-aprendizaje enfrenta diversos desafíos debido a la ausencia de un sistema automatizado basado en datos. Actualmente, este proceso es manual y subjetivo, lo que dificulta la identificación de estrategias pedagógicas alineadas con las competencias académicas y limita la posibilidad de realizar análisis objetivos que respalden decisiones pedagógicas informadas. Para abordar esta problemática, se propone un enfoque basado en Machine Learning (ML) que automatiza la evaluación y clasificación de estrategias pedagógicas, utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de lenguaje natural y aprendizaje automático.

El modelo desarrollado emplea BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), un modelo de PLN diseñado para analizar texto y generar representaciones vectoriales que capturan el significado y el contexto completo de las palabras dentro de una oración. Este enfoque es especialmente útil para comprender la semántica de descripciones textuales complejas, como las estrategias pedagógicas analizadas en este proyecto. Estas representaciones vectoriales generadas por BERT fueron utilizadas como base para el agrupamiento de estrategias mediante el algoritmo K-means, que organiza las estrategias en categorías pedagógicas significativas, revelando patrones útiles para su evaluación.

Además, se implementaron redes neuronales artificiales para modelar las relaciones entre las características textuales y numéricas del conjunto de datos, como relevancia, tasa de éxito y motivación estudiantil. Este enfoque permitió predecir la efectividad de las estrategias de manera precisa y estructurada. El modelo fue evaluado mediante métricas estándar como precisión, recall y F1-score, demostrando un desempeño robusto y ofreciendo una base objetiva para mejorar las prácticas pedagógicas.

Se muestra una descripción general de las metodologías utilizadas, que incluyen la recolección y evaluación de datos provenientes de planeaciones didácticas, el preprocesamiento de texto con BERT, el agrupamiento mediante K-means y la predicción con redes neuronales. Finalmente, se muestran los resultados y su impacto en la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje, destacando la alineación de las estrategias con las competencias esperadas y la contribución del modelo a la toma de decisiones educativas.

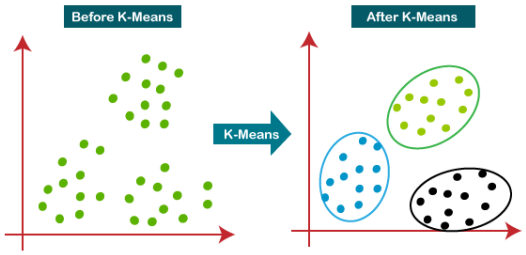
2. Métodos.

La recopilación y análisis de documentos didácticos permitió la recolección de datos, en particular planeaciones de clases. Estos documentos permitieron identificar y generar las variables necesarias para construir el conjunto de datos utilizado en el entrenamiento de nuestro modelo de Machine Learning (ML). El objetivo principal del modelo fue predecir la pertinencia de las estrategias de enseñanza-aprendizaje en función del cumplimiento de las competencias señaladas en las materias.

(Udemy, 2022)
Figura 1. Dataset.

El trabajo de Chakrapani y Praveena (2023) destacó la importancia de utilizar algoritmos de clasificación para identificar atributos clave y seleccionar el modelo de ML más eficiente para predecir el rendimiento académico. Este enfoque es crucial para garantizar que las predicciones sean relevantes y contribuyan al proceso educativo. En este estudio, se empleó una técnica avanzada de análisis de texto mediante el modelo BERT, ampliamente reconocido por su capacidad para captar el contexto completo de las palabras en el texto. BERT transformó las descripciones de las estrategias pedagógicas en representaciones vectoriales semánticamente ricas, lo que facilitó su análisis posterior. Estas representaciones se procesaron posteriormente con el algoritmo de clustering K-means, permitiendo agrupar las estrategias en clusters de acuerdo con sus semejanzas textuales y pedagógicas. (Praveena, Academic Performance Prediction Using Machine Learning: A Comprehensive & Systematic Review, 2022)

La utilización de K-Means como algoritmo de identificación de patrones naturales en los datos y generar agrupamientos homogéneos. Esto permitió una clasificación estructurada de las estrategias, revelando semejanzas y tendencias relevantes para su evaluación. Tal como afirman Yang y Cheng (2023), K-means es una herramienta ampliamente utilizada en ML para dividir los datos en grupos similares, lo que resulta particularmente útil para analizar grandes volúmenes de información. (Yang & Cheng, 2023)



(JavatPoint, 2020)
Figura 2. Fórmula K-Means Clustering.

Además, se emplearon redes neuronales para evaluar la efectividad de las estrategias, utilizando como entrada los datos transformados por BERT y los agrupamientos generados por K-means. Las redes neuronales permitieron modelar relaciones complejas entre las características de las estrategias y realizar predicciones más precisas gracias a su capacidad de aprendizaje. La evaluación del modelo se realizó mediante métricas de rendimiento como precisión, recall y F1-score, siendo esta última seleccionada por su capacidad de combinar precisión y recall en una única métrica. Estas herramientas facilitaron la valoración de la dependencia de los atributos y la efectividad del modelo. Los resultados obtenidos se visualizaron mediante gráficos de clustering y métricas, lo que permitió interpretaciones claras y comprensible.

3. Desarrollo.

El primer paso consistió en recopilar y analizar planeaciones didácticas relacionadas con estrategias de enseñanza-aprendizaje. Este material permitió construir un conjunto de datos estructurado, incluyendo variables como relevancia, tasa de éxito y motivación estudiantil, además de descripciones textuales de las estrategias, pudiendose observar en la figura 3.

Estrategia	Relevancia	Tasa_de_Exito	Motivacion_Estudiante	Viabilidad
Metodo "Circulos de Analisis". Su objetivo es promover un ap	1	70.89730159	1	0
Método "Mesa Debate". Su objetivo es fomentar el sentido cri	4	98.37902758	1	1
Metodo "Actividad Focal Introductoria". Su objetivo es atraer	5	77.39859416	1	1
Método "Discusión Guiada". Su objetivo es que las y los estu	1	71.17354712	5	0
Método "Planteamiento de Objetivos". Su objetivo es concrec	2	78.42601419	3	1
Método "Preguntas Intercaladas". Su objetivo es la conceptu	2	78.79622876	1	1
Método "Organizadores GrÃ¡ficos". Su objetivo es la concrec	1	86.58238776	3	0
Método "Analogía". Su objetivo se basa en la comparaciÃ³n	2	56.38448647	4	0
Método "Clase Expositiva". Su objetivo es que el docente mue	1	62.50082246	2	0
Método "Aprendizaje basado en Proyectos". Su objetivo es pa	5	79.02720062	4	1
Método "De Procedimientos". Su objetivo es centrarse en el p	5	93.35583036	4	0
Método "Aprendizaje basado en Problemas". Su objetivo es r	1	78.09333461	5	0
Dinámica "Globos". Colocar una pregunta en cada globo inf	5	61.92984299	2	0
Dinámica "AsociaciÃ³n de Letras". Se le da una letra de Foan	5	83.992239	4	0
Dinámica "Flashback". Preguntarle al alumno quÃ© recuerd	5	86.99543802	4	0
Dinámica "Abatelenguas". Se escribe el nombre del alumno	3	61.91180762	2	0
Dinámica "Cadena de Asociaciones". Por filas los alumnos v	4	68.88644431	2	1
Dinámica "Lluvia de Ideas". Donde el alumno participa	2	76.71637368	4	1

Figura 3. *Dataset* Estrategias.

Para analizar las descripciones textuales, se utilizó el modelo BERT, que generó representaciones vectoriales profundas. Cada texto fue tokenizado y transformado en un vector usando el token [CLS], que captura el contexto global de la estrategia pedagógica, pudiendo observar esta parte del código en la figura 4.

```
# Inicializar BERT
tokenizer = BertTokenizer.from_pretrained('bert-base-uncased')
bert_model = BertModel.from_pretrained('bert-base-uncased')

# Función para generar embeddings
def obtener_embeddings(texto):
    tokens = tokenizer(texto, return_tensors='pt', truncation=True, padding=True, max_length=512)
    with torch.no_grad():
        output = bert_model(**tokens)
    return output.last_hidden_state[:, 0, :].squeeze().numpy()  # Usar el token [CLS] como representación

# Aplicar BERT a los textos
df['Embeddings'] = df['Estrategia_Texto'].apply(obtener_embeddings)
```

Figura 4. Preprocesamiento y representación de satos.

Las representaciones vectoriales de BERT fueron agrupadas utilizando el algoritmo K-means, que identificó patrones naturales entre las estrategias. Se generaron tres clusters principales, que representaban categorías pedagógicas como trabajo colaborativo, competencias comunicativas y resolución de problemas, como se muestra en la figura 5.

```
# Aplicar K-means
kmeans = KMeans(n_clusters=3, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(embeddings)

# Visualización de clusters
sns.scatterplot(x=embeddings[:, 0], y=embeddings[:, 1], hue=df['Cluster'], palette='viridis')
plt.title("Clusters de estrategias pedagógicas")
plt.show()
```

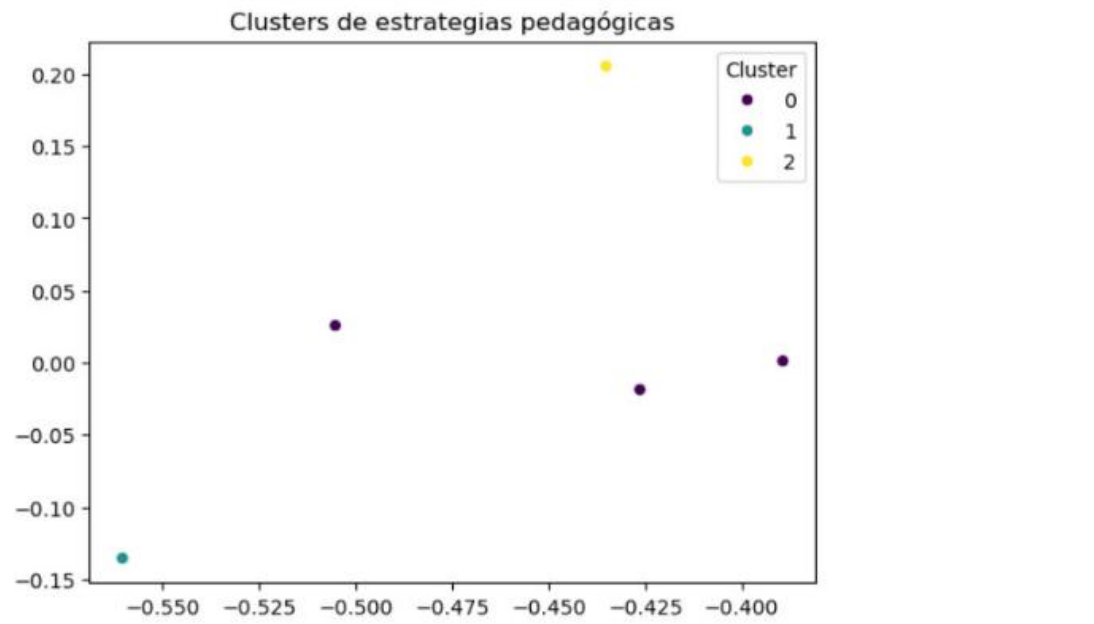


Figura 5. Aplicación K-Means a Estrategias.

Se entrenó un modelo de red neuronal artificial que combinó las representaciones vectoriales de BERT con variables numéricas del conjunto de datos. La arquitectura del modelo incluyó capas densas con funciones de activación ReLU y una capa de salida con activación sigmoide. Mediante el entrenamiento, se optimizaron los hiperparámetros para minimizar la pérdida y mejorar el rendimiento, esto se muestra en la figura 6.

```python
# Dividir en entrenamiento y prueba
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Inicialización de los parámetros (pesos y sesgos)
input_size = X_train.shape[1]  # Número de características
hidden_size = 128  # Tamaño de la capa oculta
output_size = 1  # Para clasificación binaria (0 o 1)

# Pesos y sesgos de las capas
np.random.seed(42)
W1 = np.random.randn(input_size, hidden_size)  # Pesos de la capa 1
b1 = np.zeros((1, hidden_size))  # Sesgo de la capa 1
W2 = np.random.randn(hidden_size, output_size)  # Pesos de la capa 2
b2 = np.zeros((1, output_size))  # Sesgo de la capa 2

# Funciones de activación
def sigmoid(x):
    return 1 / (1 + np.exp(-x))

def sigmoid_derivative(x):
    return x * (1 - x)

def relu(x):
    return np.maximum(0, x)

def relu_derivative(x):
    return np.where(x > 0, 1, 0)

# Propagación hacia adelante
def forward_propagation(X):
    Z1 = np.dot(X, W1) + b1  # Cálculo de la capa oculta
    A1 = relu(Z1)  # Aplicar ReLU
    Z2 = np.dot(A1, W2) + b2  # Cálculo de la capa de salida
    A2 = sigmoid(Z2)  # Aplicar Sigmoid
    return A1, A2  # Retornar la salida y la capa oculta
```

Figura 6. Entrenamiento de red neuronal.

Se entrenó un modelo de Machine Learning utilizando una combinación de técnicas avanzadas como representaciones semánticas generadas por BERT, agrupamiento mediante K-means, y redes neuronales para clasificar las estrategias pedagógicas. El análisis del modelo se realizó mediante métricas estándar (precisión, recall y F1-score). Los resultados demostraron un desempeño robusto, con un F1-score promedio de 1.0, lo que indica un equilibrio adecuado entre precisión y sensibilidad, mostrando el reporte de clasificación en la figura 7. La matriz de confusión mostrada en la figura 8 muestra una alta tasa de aciertos en la clasificación de estrategias viables y no viables, validando la capacidad del modelo para identificar patrones complejos en los datos.

```
F1-Score (weighted): 1.00

Reporte de Clasificación:
              precision    recall  f1-score   support

           0       1.00      1.00      1.00        18
           1       1.00      1.00      1.00         2

    accuracy                           1.00        20
   macro avg       1.00      1.00      1.00        20
weighted avg       1.00      1.00      1.00        20
```

Figura 7. Reporte de clasificación.

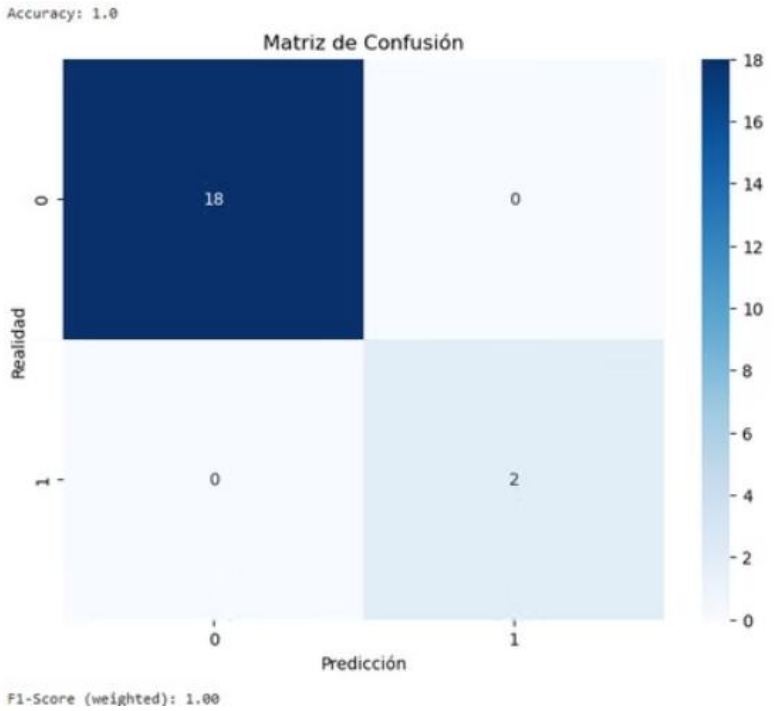


Figura 8. Matriz de confusión.

El análisis mediante el algoritmo K-means permitió identificar tres clusters principales que agrupan las estrategias pedagógicas según sus similitudes textuales y pedagógicas. Estos clusters reflejan categorías pedagógicas significativas: estrategias orientadas a la solución de problemas, actividades colaborativas y estrategias enfocadas en comunicación. Este agrupamiento estructurado reveló patrones importantes en las estrategias de enseñanza-aprendizaje, facilitando su evaluación y comparación.

Finalmente, se demostró la predicción correcta de una nueva estrategia la cual fue la solución de problemas, en conjunto con el producto esperado “Tareas (investigación en Word)”. El modelo evaluó características como relevancia, tasa de éxito, motivación del estudiante y recursos disponibles para realizar la predicción, observando este resultado en la figura 9.

```
[18]: nueva_estrategia = {
          'Estrategia_Cod': label_encoder_estrategia.transform(['Solución de problemas'])[0],
          'Producto_Cod': label_encoder_producto.transform(['Tareas (investigación en Word)'])[0],
          'Relevancia': 5,
          'Nivel_de_Complejidad': 4,
          'Tasa_de_Exito': 85,
          'Motivacion_Estudiante': 5,
          'Interaccion_Docente_Estudiante': 4,
          'Horas_Estudio': 15,
          'Participacion_Estudiante': 5,
          'Recursos_Cod': label_encoder_recursos.transform(['Tutorías'])[0]
      }

[19]: nueva_estrategia_df = pd.DataFrame([nueva_estrategia])

      # Normalizar los datos de la nueva estrategia
      nueva_estrategia_scaled = scaler.transform(nueva_estrategia_df)

      # Hacer predicción
      prediccion = clf.predict(nueva_estrategia_scaled)
      print("¿Es viable la nueva estrategia?", "Sí" if prediccion[0] == 1 else "No")

      ¿Es viable la nueva estrategia? Sí
```

Figura 9. Predicción Nueva Estrategia.

Conclusiones.

El modelo propuesto demostró ser eficaz para clasificar estrategias pedagógicas y revelar patrones significativos que contribuyen al cumplimiento de las competencias educativas. La integración de técnicas avanzadas como BERT, K-means y redes neuronales permitió capturar relaciones complejas entre variables textuales y numéricas, logrando un alto rendimiento evaluado mediante métricas como el F1-score.

Los resultados destacan la importancia de factores como la relevancia, la motivación estudiantil y la tasa de éxito en la viabilidad de las estrategias, ofreciendo una herramienta práctica para mejorar las prácticas pedagógicas. Este enfoque puede ser expandido a diferentes contextos educativos, reforzando el conocimiento en el uso de ML en la optimización del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Referencias bibliográficas.

JavatPoint. (2020). JavatPoint. Obtenido de https://www.tpointtech.com/k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning.

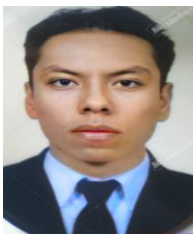
Praveena, C. (23 de ABRIL de 2022). Academic Performance Prediction Using Machine Learning: A Comprehensive & Systematic Review. IEEEXPLORE, 335-340.

Praveena, C., & D, C. (22 de Abril de 2022). Simulation of Machine Learning Techniques to Predict Academic Performance. IEEE XPLORE, 329-334.

Udemy. (2022). Udemy. Obtenido de https://www.udemy.com/course/power-bi-analisis-y-visualizacion-de-datos-basico/?utm_source=bing&utm_medium=udemyads&utm_campaign=BG-Search_DSA_Alpha_Prof_la.ES_cc.MX&campaigntype=Search&portfolio=Bing-Mexico&language=ES&product=Course&test=&audience=DSA&t.

Yang, Y., & Cheng, C. (2023). Construction of accurate group portrait of student funding based on Kmeans algorithm. IEE XPLORE, 154-158.

Información de los autores.



Luis Manuel Faustino Rico, Estudiante del programa de Ingenieria en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México/Valle de Bravo.

Mariana Carolyn Cruz Mendoza, es Maestra en Ingeniería en Sistemas Computacionales por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec e Ingeniero en Sistemas Computaciones por el Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo. Cuenta con el reconocimiento de perfil deseable por PRODEP, es cofundador y miembro del cuerpo académico Procesamiento de datos con industria 4.0. Sus intereses en investigación son el aprendizaje automático y la ciencia de datos. Pertenece a la red nacional de Investigación Aplicación de las Tecnologías de la Industria 4.0 reconocida por el TECNM. Actualmente es docente en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México - Valle de Bravo.

Julio Alejandro Lopez Espinoza, Estudiante del programa de Ingenieria en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México/Valle de Bravo.

Cesar Primero Huerta, es Maestro en Ingeniería en Sistemas Computacionales por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec e Ingeniero en Sistemas Computaciones por el Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo. Cuenta con el

reconocimiento de perfil deseable por PRODEP, es cofundador y miembro del cuerpo académico: Procesamiento de datos con industria 4.0 y miembro activo del colectivo Ambiente Cielo Rojo. Sus intereses en investigación son el aprendizaje automático y la ciencia de datos, Actualmente es docente en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Tecnológico Nacional de México- Valle de Bravo.

Modelos de lenguaje para difusión del conocimiento agrícola.

Language Models for Agricultural Knowledge difussion.

Brayan Rusell Figueroa Orantes (1).
Estudiante de Licenciatura, Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
L20270766@tuxtla.tecnm.mx.

Diego Zapata García (2). Estudiante de Licenciatura, Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, L20270826@tuxtla.tecnm.mx.

Germán Ríos Toledo* (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, german.rt@tuxtla.tecnm.mx.

Aída Guillermina Cossio Martínez (4). Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Tuxtla Gutiérrez, aida.cm@ittg.edu.mx.

Néstor Antonio Morales Navarro (5). Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Tuxtla Gutiérrez, nestor.mn@tuxtla.tecnm.mx.

Karen Daniela Ramón Cristancho (6). Estudiante de Maestría, Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Tuxtla Gutiérrez, M24271381@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 30, 2025; aceptado en diciembre 05, 2025.

Resumen.

En nuestro país, la agricultura enfrenta desafíos como la baja productividad, la degradación del suelo y la contaminación de agua. Por otro lado, existe la falta de difusión del conocimiento agrícola en la población en general. Para abordar este problema, en este trabajo se propone la implementación de un Modelo de Lenguaje Grande y Generación Aumentada por Recuperación. El prototipo utiliza archivos de texto con datos agrícolas generales sobre la planta de arroz, plagas y enfermedades comunes, así como recomendaciones de riego y fertilizantes. La información de estos archivos se almacena en una base de datos vectorial. Cuando el usuario realiza consultas en lenguaje natural, el recuperador de información realiza una búsqueda por similitud en la base de datos vectorial. La información recuperada se inyecta al Modelo de Lenguaje para generar respuestas confiables. La implementación de este modelo representa una estrategia innovadora para superar las limitaciones en la difusión del conocimiento agrícola, promoviendo prácticas más eficientes y sostenibles.

Palabras claves: Base de datos vectorial, búsqueda por similitud, generación aumentada por recuperación, modelo de lenguaje grande.

Abstract.

In our country, agriculture faces challenges such as low productivity, soil degradation, and water pollution. On the other hand, there is a lack of dissemination of agricultural knowledge among the general population. To address this problem, this paper proposes the implementation of a Large Language Model and Retrieval-Augmented Generation.

The prototype uses text files with general agricultural data on rice plants, common pests and diseases, as well as irrigation and fertilizer recommendations. The information in these files is stored in a vector database. When the user makes queries in natural language, the information retriever performs a similarity search in the vector database. The retrieved information is injected into the Language Model to generate reliable responses. The implementation of this model represents an innovative strategy to overcome the limitations in the dissemination of agricultural knowledge, promoting more efficient and sustainable practices.

Keywords: Large Language Model, retrieval-augmented generation, similarity search, vector database.

1. Introducción.

La economía de un país se estructura tradicionalmente en tres grandes sectores: primario, secundario y terciario. El sector primario comprende actividades esenciales como la agricultura, la ganadería, la pesca y la explotación forestal, las cuales representan la base de los recursos que sostienen al resto de la cadena productiva. El sector secundario transforma esas materias primas en bienes industriales, mientras que el sector terciario integra los servicios que dinamizan el comercio, el transporte, la educación y otras actividades fundamentales para el crecimiento económico. Dentro de esta estructura, la agricultura juega un papel fundamental al generar alimentos, materias primas y empleo, contribuyendo de manera directa al Producto Interno Bruto y al fortalecimiento de la economía nacional. Como lo plantea el Comité Estatal de Información y finanzas (2024), el estado de Chiapas se encuentra ubicado en el sureste de México, es un estado que cuenta con abundantes recursos naturales. De acuerdo con cifras reportadas por el Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG) (Comité Estatal de Información y finanzas. (2024), de los 32 estados que conforman la república, Chiapas ocupó el 14º lugar nacional por el valor de la producción agrícola en 2024, con una participación de 2.71% del total nacional, lo que representó un monto de 23,207.2 millones de pesos. En la **Tabla 1** se muestra en valor de la producción de los 12 cultivos predominantes en Chiapas. Se observa la importancia que tiene la producción de maíz, la caña de azúcar y el café para la economía del estado.

Tabla 1. Valor de la Producción Agrícola por Cultivo Principal de Chiapas.

Cultivos Principales	**Valor de la producción (millones de pesos)**
Maíz grano	7,195,558
Caña de Azúcar	2,940,035
Café Cereza	2,150,205
Resto de los cultivos	2,023,416
Plátano	1,708,921
Mango	1,492,232
Palma africana	1,243,952
Frijol	1,024,950
Pastos y praderas	948,605
Papaya	824,528
Tomate rojo	797,064
Aguacate	491,401
Cacao	366,362
TOTAL	**23,207,227**

Por otro lado, la **Figura 1** muestra la proporción de producción de los mismos cultivos respecto a las 8,853,275 millones de toneladas reportadas en el informe de CEIG para el año 2024. La caña de azúcar es el cultivo que más se produce, seguido de pastos y pradera (para la ganadería) y el maíz.

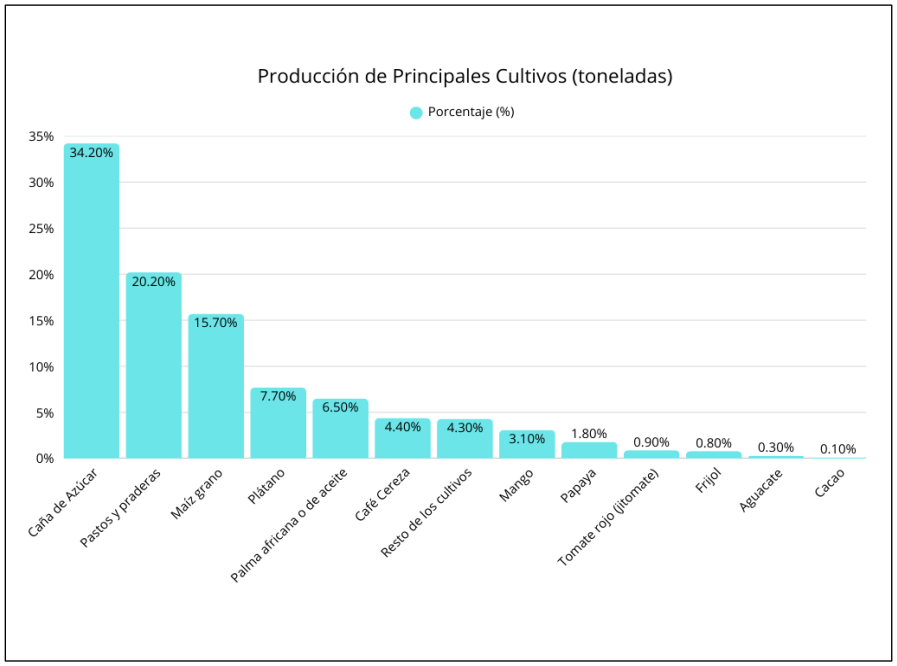


Figura 1. Proporción de la Producción Agrícola Anual de Chiapas según el Informe CEIG 2024.

El gobierno federal tiene como eje principal de su política, impulsar la agricultura para lograr la autosuficiencia en la producción de cultivos más importantes del país a pequeña y gran a escala. El objetivo es factible de alcanzar para los productores a gran escala, ya que cuentan con recursos económicos que les permiten tecnificar el proceso de producción desde la siembra hasta la cosecha. Además, tienen acceso a información actualizada de las más recientes investigaciones y de las tendencias del mercado. Sin embargo, a pequeña escala el panorama es distinto. Si bien muchas personas podrían cultivar sus propios cultivos, esto no ocurre frecuentemente porque para hacerlo de forma eficiente y sostenible, se requieren años de experiencia en la siembra, el cuidado y la prevención de plagas, aunado a habilidades técnicas y prácticas que no están al alcance inmediato de quienes no han trabajado previamente en la agricultura. Más aún, dado que los pequeños productores se basan en gran medida en el conocimiento empírico, no se genera la experiencia necesaria difundir ese conocimiento de forma consistente y ponerla al alcance de más personas.

En ese sentido, los avances en Inteligencia Artificial, especialmente en los Modelos Generativos de Lenguaje, se han convertido en herramientas valiosas para poner al alcance de millones de personas el conocimiento disponible sobre prácticamente cualquier tema de interés. Estos modelos permiten acceder de forma rápida y sencilla a información clara y útil, incluida aquella relacionada con la agricultura, desde técnicas de siembra hasta prácticas de cuidado y manejo de cultivos. Cabe mencionar que el solo hecho del acceso al conocimiento no resuelve el problema, pero permite la auto capacitación de las personas interesadas en ciertos cultivos.

Un modelo generativo de lenguaje es un sistema de IA entrenado con grandes corpus de texto que aprende patrones lingüísticos y produce texto nuevo, coherente y contextualmente relevante, lo que permite su aplicación en diversos ámbitos como la agricultura (Patel *et al*., 2025; Hagos *et al*., 2024). La **Tabla 2** muestra algunos de los Modelos de Lenguaje más utilizados en la actualidad.

Tabla 2. Principales Modelos de Lenguaje Grandes.

Modelo de Lenguaje Grande	URL oficial / ubicación
GPT-4 / GPT-5 (OpenAI)	https://openai.com
Claude 3 / Claude 4 (Anthropic)	https://www.anthropic.com
Gemini (Google DeepMind)	https://deepmind.google
LLaMA 3 (Meta AI)	https://ai.meta.com/llama
Grok (xAI, Elon Musk)	https://x.ai

2. Métodos.

En el panorama actual de la inteligencia artificial corporativa, la mera capacidad de generar texto ya no es suficiente. Las organizaciones requieren sistemas que "razonen" basándose en sus propios datos, políticas y archivos históricos. No obstante, los Modelos de Lenguaje Grande (LLM) presentan un inconveniente: su conocimiento del mundo queda congelado hasta el momento de su entrenamiento. Para superar esta barrera, la industria ha adoptado la arquitectura de Generación Aumentada por Recuperación (**RAG**, **R**etrieval **A**ugmented **G**eneration).

Siguiendo los parámetros de la empresa NVIDIA (2023) y la **Figura 2** el flujo de trabajo de un sistema con RAG de cada etapa, desde el preprocesamiento hasta la recuperación semántica, es vital para garantizar la calidad del resultado final. En el ámbito de la Inteligencia Artificial Generativa, la precisión de los modelos depende intrínsecamente de la calidad y estructura de los datos que consumen. A continuación, se describen cada una de las etapas.

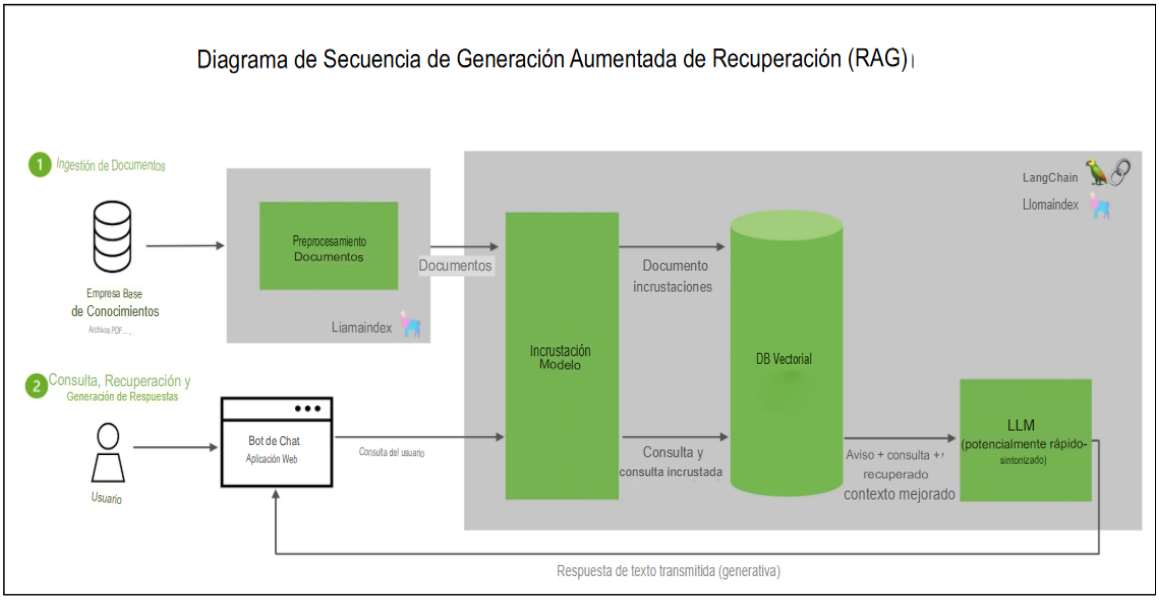


Figura 2. Diagrama de secuencia de recuperación y generación aumentada (RAG) de NVIDIA.

Preprocesamiento de documentos:

Antes de que los datos puedan ser utilizados, como indica Lewis *et al.* (2020) es necesario convertirlos en un formato legible para los modelos de inteligencia artificial. Esto implica tomar documentos en formatos variados como PDF, Word o presentaciones y extraer el texto contenido en ellos, asegurándose de que el texto sea consistente y sea legible para la máquina. Esto implica el uso de reconocimiento de caracteres. Así mismo, también existe texto dentro de las

tablas y los gráficos. Este proceso asegura que los datos mantengan su significado y no se pierda la relación entre cifras y conceptos.

Extracción de metadatos (opcional):

Esta etapa, según Jenna Pederson (2025) es el equivalente a colocar una etiqueta clara en el lomo de cada libro. No se trata solo del contenido, sino de quién lo dijo y cuándo. Para optimizar la recuperación futura de información, se recomienda extraer datos descriptivos del documento, conocidos como metadatos, tales como el Título del documento, el Autor o fuente, el Número de páginas y la URL de origen si el material proviene de la web. Esta información adicional funciona como un índice avanzado, permitiendo que el sistema no solo sepa *qué* dice el documento, sino también *de dónde* proviene, lo cual es vital para la indexación y la priorización de fuentes confiables.

Fragmentación de documentos:

Como explican Schwaber-Cohen y Patel (2025), el *chunking* es una técnica que consiste en dividir información grande o compleja en partes más pequeñas y manejables llamadas *chunks*. Su objetivo principal es facilitar la comprensión, el aprendizaje y el procesamiento de la información, ya sea para personas (por ejemplo, al estudiar o leer) o para sistemas de inteligencia artificial (como al dividir textos largos para analizarlos mejor).

Al crear chunks, es importante cuidar algunos parámetros clave. Uno de ellos es el tamaño del *chunk*, que debe ser lo suficientemente grande para mantener una idea completa, pero no tan extenso como para volver a ser difícil de procesar. Otro parámetro relevante es el solapamiento entre *chunks*, que consiste en repetir una pequeña parte del contenido entre fragmentos consecutivos para no perder contexto.

Por ello, los documentos largos deben ser divididos en fragmentos más pequeños y manejables. El objetivo es asegurar que cada pedazo sea lo suficientemente pequeño para ser procesado por el modelo, pero a la vez, que mantenga la coherencia semántica interna, es decir, que la idea principal no se corte a mitad. Al final, esto mejora notablemente la precisión al recuperar información, permitiendo al sistema recuperar solo la sección específica necesaria sin tener que procesar el documento entero.

Generación de embeddings:

Cada fragmento de texto se convierte en un "vector numérico" o *embedding* mediante modelos de representación semántica. Este proceso traduce el texto a un espacio matemático vectorial, lo que permite representar el contenido del fragmento en dicho espacio. Los textos con significados similares se agruparán muy juntos, lo que permite comparar fragmentos basándose en su significado real y no solo en la coincidencia de palabras clave. Esto es esencial para facilitar la búsqueda rápida y eficiente en bases de datos vectoriales.

Indexación de embeddings:

Los *embeddings* generados se almacenan en una base de datos vectorial. Este paso permite: que los miles de vectores se guardarlos en una estructura que permita encontrarlos instantáneamente. Este almacenamiento estructurado permite recuperar fragmentos de manera eficiente durante la búsqueda, ya que se pueden aplicar técnicas matemáticas de "búsqueda de similitud" (como la distancia coseno o Euclidiana) para encontrar los datos más relevantes. Además, este paso es crucial para mantener actualizada la información disponible en el sistema de recuperación.

Consulta del usuario:

Cuando una persona realiza una pregunta, su consulta pasa por el mismo proceso de transformación: se convierte en un *embedding* para capturar la intención y el contexto de lo que se pregunta. Este nuevo vector de consulta se lanza al espacio vectorial de la base de datos para poder comparar la pregunta con los *embeddings* almacenados y buscar los fragmentos de documentos más similares a la pregunta.

Recuperación de información relevante:

El sistema ejecuta una búsqueda en la base de datos vectorial seleccionando los fragmentos que están "más cerca" matemáticamente de la pregunta del usuario. Esto se logra principalmente mediante la búsqueda de similitud semántica, que encuentra los fragmentos con mayor relación lógica con la pregunta. Adicionalmente, se puede aplicar un filtrado adicional basado en los metadatos extraídos anteriormente para afinar aún más la precisión de los resultados.

Generación de respuesta:

Solo una vez que se han recuperado los fragmentos verificados, el proceso finaliza. Los fragmentos de información altamente relevantes que se recuperaron son pasados a un Modelo de Lenguaje Grande (LLM). El LLM actúa como un redactor inteligente: fusiona múltiples fragmentos si es necesario, y redacta una respuesta fluida, clara y coherente para el usuario, basándose únicamente en la información encontrada. Por último, un sistema completo debe proporcionar referencias a los documentos de origen cuando sea relevante, dando validez a la respuesta generada.

3. Desarrollo.

Para llevar a cabo la experimentación, se utilizó el entorno *Colab* debido a que cuenta con recursos de hardware de altas prestaciones, principalmente la GPU y TPU requeridos para ejecutar modelos de lenguaje con fluidez.

No obstante, se presentaron limitaciones en cuanto a los límites de uso y los tiempos de espera, lo cual impactó en la fluidez del proceso. La experimentación incluyó una recopilación de información de diversas fuentes especializadas en el ámbito agrícola como Climate-Smart Agriculture in Chiapas, México (Zavariz-Romero. 2014), Cultivo de Arroz: Técnicas y Consejos para una Siembra Exitosa (Verdejo, 2024), y Cultivo de arroz: como se realiza, plagas y enfermedades como dicta el Agrotendencia (2025). Sin embargo, el modelo de lenguaje utilizado para la implementación del proyecto Implementación de un modelo LLM Local para su uso en cultivos del Estado de Chiapas son una combinacion de Modelo de lenguaje (LLM) DeepSeek-R1:8B integrado con LangChain usando OllamaLLM para respuestas en RAG y modelos de embeddings (vectorización de texto) que son all-mpnet-base-v2 que maneja un mejor rendimento en la similitudo de semanticas junto a BAAI/bge-base-en que optimiza las tareas de retrieval que se representa en biblioteca de sentence-transformers, el cual estaba restringido al idioma inglés. Para superar esta limitación, se empleó Google Translate para modificar y adaptar los datos, lo que permitió generar preguntas relevantes basadas en la información obtenida.

Finalmente, estas preguntas fueron utilizadas para evaluar el rendimiento del modelo a lo largo de las diferentes etapas del proceso experimental. A continuación, en las **Tablas 3**, **4** y **5**, se presentan las preguntas generadas para cada conjunto de datos.

Tabla 3. Preguntas generadas para Arroz-Agrotendencia.

No.	Arroz-Agrotendencia.txt
1	What is the historical origin of rice cultivation according to ancient Chinese manuscripts?
2	How was rice cultivation introduced to Latin America, and who contributed to its adaptation?
3	What does the scientific term Oryza sativa mean, and what is its origin?
4	Why is rice considered the second most consumed cereal worldwide?
5	What notable nutritional properties does rice have compared to other cereals?
6	How does rice’s adaptability relate to different climatic conditions?
7	Which countries were the top rice producers in 2016 according to FAO data?
8	How does the concentration of rice exporters affect international prices?
9	What are the three agronomic phases of rice’s growth cycle?
10	How do nodal and crown roots contribute to the physiology of rice plants?

Las respuestas a cada pregunta se encuentran en el siguiente enlace:
https://drive.google.com/file/d/1ILrGhELs64chwKLu3Wf_MDWJHsYraOEq/view?usp=sharing.

Tabla 4. Preguntas generadas para Arroz-mundoagricultura.

No.	Arroz-mundoagricultura.txt
1	What are the most common methods for planting rice, and how do they differ?
2	What are the optimal climatic and soil conditions for rice cultivation?
3	What factors should be considered in water management for successful rice farming?
4	What nutritional differences exist between polished rice and palay rice?
5	What steps are involved in harvesting rice, and why must it not be delayed?
6	How long does rice take to mature depending on its variety and cultivation method?
7	What regions in Mexico are the main rice producers, and how is their production distributed?
8	How does soil type help prevent issues like waterlogging in rice cultivation?
9	What practices are recommended for pest and disease control in rice farming?
10	How does temperature affect the development and germination of rice?

Las respuestas a cada pregunta se encuentran en el siguiente enlace:
https://drive.google.com/file/d/1y_GYg4L6RUmF03y_xJbhIYuN92NV7B9e/view?usp=sharing.

Tabla 5. Preguntas generadas para CSA-en-Chiapas-Mexico.

No.	CSA-en-Chiapas-Mexico.txt
1	What is Climate-Smart Agriculture (CSA) and what are its three main pillars?
2	How does agroforestry contribute to CSA in Chiapas?
3	What percentage of Chiapas' Gross Domestic Product (GDP) is contributed by agriculture?
4	What are the main crops produced in Chiapas?
5	What are the key climate risks affecting agriculture in Chiapas?
6	What percentage of greenhouse gas (GHG) emissions in Chiapas comes from agricultural activities?
7	Why is minimum tillage in corn production considered a CSA practice?
8	What are some CSA strategies that can help farmers in Chiapas cope with extreme weather?
9	How does land fragmentation impact agricultural productivity in Chiapas?
10	What role do institutions and policies play in promoting CSA in Chiapas?

Las respuestas a cada pregunta se encuentran en el siguiente enlace:
https://drive.google.com/file/d/10jeiNyGyCUZqc5P0uvXX1CFhov5n9vYM/view?usp=sharing.

Resultados de los experimentos.

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la evaluación exhaustiva del sistema propuesto. El objetivo principal es medir la eficacia de la implementación de la técnica de Generación Aumentada por Recuperación (RAG) frente a un modelo de lenguaje (LLM) estándar utilizando su conocimiento base.

La experimentación se llevó a cabo utilizando tres conjuntos de datos específicos: Agrotendencia, Mundoagricultura y CSA en Chiapas, México. Para garantizar una validación integral, el análisis se ha estructurado en tres etapas secuenciales que permiten aislar y evaluar cada componente del flujo de trabajo. Para cuantificar el rendimiento y la precisión semántica en cada etapa, no se utilizaron comparaciones textuales simples, sino que se emplearon dos modelos de *embeddings* (representación vectorial) considerados estados del arte en el procesamiento de lenguaje natural. Estos modelos actúan como "jueces" para determinar qué tan similar es el significado de la respuesta generada con respecto a la respuesta esperada:

MPNET (Masked and Permuted Pre-training): Es un modelo robusto conocido por su alta precisión en tareas de similitud semántica. Evalúa qué tan bien captura el modelo la estructura y el significado profundo de las oraciones, ofreciendo una medida fiable de la coherencia del texto.

BGE (BAAI General Embedding): Desarrollado por la *Beijing Academy of Artificial Intelligence*, es uno de los modelos de recuperación y embedding más avanzados actualmente. Se utiliza en este experimento para contrastar los resultados de MPNET y ofrecer una segunda validación de alta sensibilidad sobre la relevancia de la información.

Etapa 1: Preguntas directamente al modelo.

La evaluación busca medir la capacidad del modelo para generar respuestas basadas únicamente en su entrenamiento previo, sin utilizar datasets externos o procesos de recuperación como RAG. Esto permite establecer una línea base de conocimiento y determinar si el modelo tiene información preexistente sobre los temas o contextos asociados a cada conjunto de datos.

Como se muestra en la **Tablas 6**, **7** y **8**, los puntajes de los modelos MPNET Y BGE representan la **similitud del coseno**. Un porcentaje más alto indica que la respuesta generada es semánticamente más cercana a la respuesta ideal o al fragmento de referencia.

Tabla 6. Agrotendencia || resultados obtenidos del modelo.

Pregunta	MPNET	BGE	Tiempo (S)
1	74.17	86.60	58.04
2	80.34	91.83	18.20
3	77.70	91.53	22.58
4	64.10	85.24	27.95
5	83.04	89.93	30.88
6	86.71	89.48	32.64
7	84.21	91.87	24.11
8	83.53	89.27	34.95
9	87.14	92.93	18.61
10	82.36	90.23	23.53

Tabla 7. Mundoagricultura || resultados obtenidos del modelo.

Pregunta	Puntaje MPNET	Puntaje d BGE %	Tiempo (S)
1	79.14	89.15	44.41
2	77.99	91.32	37.91
3	75.61	88.77	24.55
4	88.11	90.06	36.92
5	78.41	87.95	32.26
6	79.12	85.99	33.02
7	82.84	90.45	26.64
8	84.44	91.61	30.40
9	77.28	88.52	36.11
10	79.12	89.43	28.27

Tabla 8. CSA en Chiapas México || resultados obtenidos del modelo.

Pregunta	Puntaje MPNET	Puntaje BGE	Tiempo (S)
1	81.48	92.25	23.12
2	68.94	89.74	30.372
3	71.12	94.86	22.623
4	79.97	91.42	28.821
5	82.15	91.90	42.602
6	76.22	92.61	29.762
7	74.27	88.52	26.924
8	78.99	89.82	35.562
9	80.27	90.77	23.92
10	53.48	87.39	38.791

En la **Figuras 3** y **4**, se muestra el rendimiento general del modelo basado en las puntuaciones de similitud obtenidas durante las consultas. El gráfico de pastel refleja cómo se distribuyen las respuestas en 6 categorías de similitud: Muy malo (0-50 (%)), Malo (50-60 (%)), Regular (60-70 (%)), Bueno (70-80 (%)), Muy bueno (80-90 (%)), Excelente (90-100 (%)).

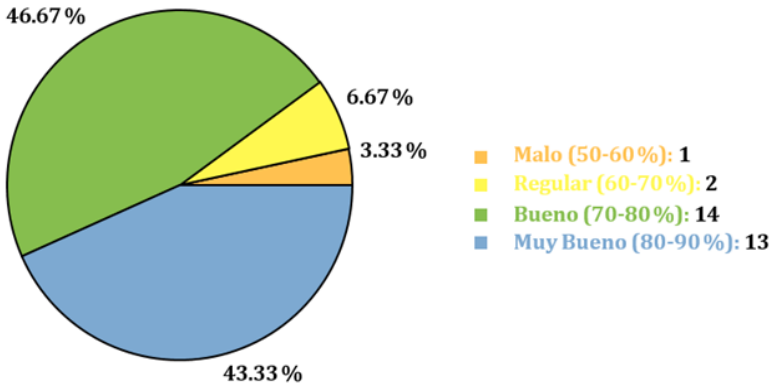


Figura 3. Distribución de puntaje de similitud MPNET.

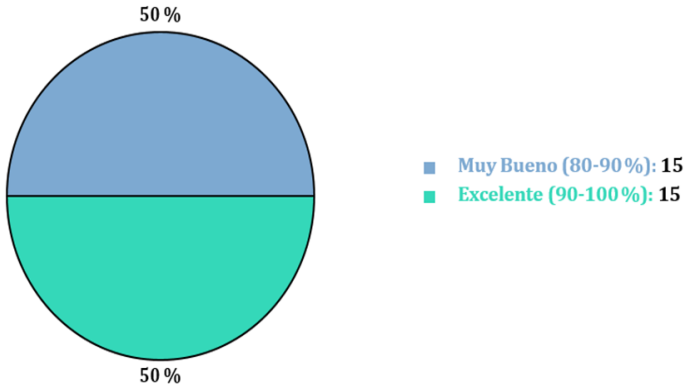


Figura 4. Distribución de puntaje de similitud BGE.

Estos gráficos confirman la importancia de integrar sistemas como RAG y bases de datos especializadas (como ChromaDB o PineCone) para mejorar la precisión y relevancia de las respuestas del modelo.

Etapa 2: Preguntas Chromadb.

El propósito de esta sección es verificar que la base de datos vectorial, creada mediante ChromaDB, haya sido configurada correctamente y que contenga todos los documentos relevantes. En la **Tablas 9**, **10** y **11**, el proceso asegura que la información proporcionada al modelo esté disponible de manera íntegra y organizada, lo cual es fundamental para el éxito de las consultas realizadas durante las etapas posteriores. Además, esta verificación permite confirmar que todos los documentos han sido incorporados y que no existen datos faltantes que puedan afectar la recuperación de información.

Tabla 9. Agrotendencia || resultados obtenidos de Chromadb.

Pregunta	Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	88.06	62.45	86.03	58.57	86.03	58.57
2	88.86	75.13	86.13	78.08	86.13	78.08
3	87.52	42.12	83.33	33.12	76.76	40.08
4	89.92	70.90	85.40	71.12	86.28	73.36
5	88.77	73.56	85.39	74.85	86.47	71.19
6	84.57	55.16	82.54	64.68	83.52	67.78
7	85.48	66.74	82.38	56.98	83.82	58.57
8	87.48	72.81	81.25	57.29	81.25	57.29
9	93.92	86.83	83.53	62.79	82.45	65.32
10	87.67	67.40	81.45	55.50	81.45	55.50

Tabla 10. Mundoagricultura || resultados obtenidos de Chromadb.

Pregunta	Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	85.03	74.05	83.90	74.77	83.90	74.77
2	87.75	72.09	81.95	62.86	84.59	70.08
3	84.20	56.61	82.85	52.78	83.39	57.14
4	87.83	67.36	80.44	45.56	79.92	57.70
5	86.56	70.76	87.76	76.09	88.05	74.63
6	88.08	70.26	81.93	69.13	84.02	78.74
7	84.81	69.62	83.25	60.67	83.25	60.67
8	86.42	70.77	82.05	53.36	84.08	60.79
9	82.89	53.28	82.32	53.10	79.94	53.12
10	85.34	64.99	82.00	55.82	84.18	68.00

Tabla 11. CSA || resultados obtenidos de Chromadb.

Pregunta	Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	88.43	72.21	88.11	66.91	88.11	66.91
2	89.31	69.56	86.56	68.45	84.52	67.96
3	89.49	67.22	84.06	57.59	81.69	56.35
4	87.06	74.41	82.85	56.45	80.44	53.88
5	90.80	70.48	87.49	62.26	85.96	69.14
6	93.23	77.69	86.04	61.04	83.31	61.96
7	87.07	61.45	83.40	48.86	82.90	57.38
8	88.09	76.68	86.46	64.88	84.66	68.44
9	88.98	69.53	85.22	49.76	84.00	56.30
10	89.11	68.51	86.62	55.23	84.65	55.89

En las **Figuras 5** y **6** podemos observar la distribución del rendimiento general de los fragmentos basado en las puntuaciones de similitud recuperados de la base de datos vectorial ChromaDB.

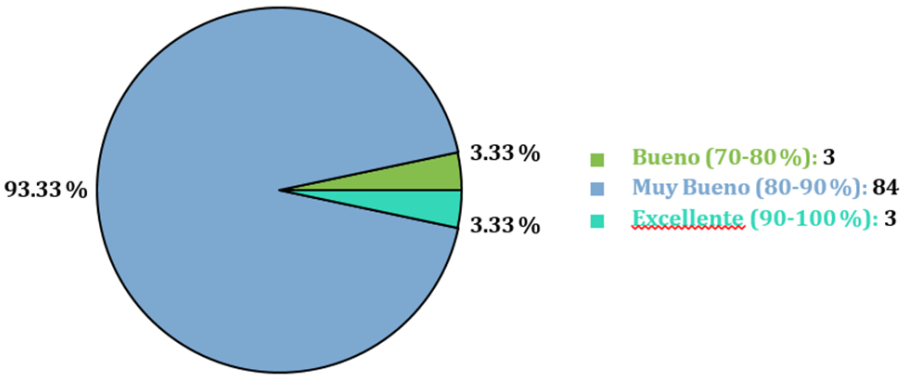


Figura 5. Distribución de puntaje de similitud BGE || Fragmentos.

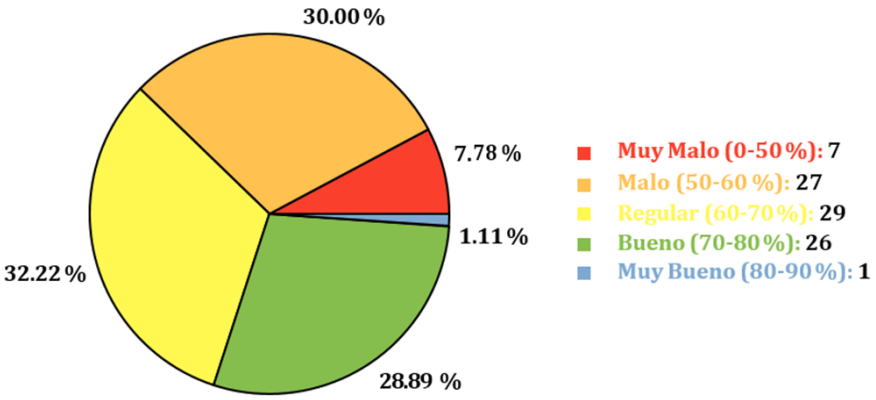


Figura 6. Distribución de puntaje de similitud MPNET || Fragmentos.

Se identifican áreas en las que la recuperación de fragmentos de las bases de datos vectoriales no resulta completamente relevante. Los gráficos presentados destacan la importancia de validar el conocimiento proporcionado al modelo LLM, asegurando que el análisis de la información suministrada sea preciso y alineado con la consulta realizada. Este proceso es fundamental para optimizar la capacidad del modelo de generar respuestas altamente pertinentes y enriquecedoras para el usuario.

Etapa 3: Preguntas después de la implementación de la técnica RAG.

En esta última etapa en la **Tablas 12**, **13** y **14**, se evalúa el impacto de la implementación de la técnica RAG (Generación Aumentada por Recuperación) en el modelo LLM, utilizando la base de datos ChromaDB.

RAG fue implementado para mejorar la capacidad del modelo de generar respuestas más precisas y relevantes, al permitirle recuperar información de una base de datos externa en lugar de depender exclusivamente de su entrenamiento previo. Esto permite al modelo acceder a datos adicionales almacenados en los documentos, lo que mejora significativamente la calidad, relevancia y el enfoque de las respuestas, especialmente en áreas donde el modelo original podría carecer de conocimiento directo.

Tabla 12. Agrotendencia || resultados obtenidos RAG.

Pregunta	Respuesta		Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	92.88	80.36	88.06	62.45	83.61	57.82	82.09	59.17
2	91.37	82.08	87.82	82.28	88.86	75.13	87.66	72.57
3	93.90	83.58	87.52	42.12	79.72	47.76	78.68	44.09
4	89.64	78.38	89.92	70.90	85.55	62.67	84.16	60.58
5	90.78	82.09	88.06	76.44	88.77	73.56	82.16	50.16
6	88.71	78.20	84.46	64.22	83.16	62.58	82.31	62.00
7	91.95	82.93	85.48	66.74	84.60	62.41	82.09	54.99
8	90.42	79.65	87.48	72.81	79.03	51.54	77.90	50.32
9	94.85	87.86	93.92	86.83	85.32	67.99	82.95	62.12
10	91.92	78.37	87.67	67.40	81.28	52.33	79.48	51.21

Tabla 13. Mundoagricultura || resultados obtenidos RAG.

Pregunta	Respuesta		Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	90.21	83.33	85.03	74.05	82.26	68.48	83.53	64.58
2	89.25	81.39	86.21	74.27	87.75	72.09	82.52	61.59
3	87.86	79.42	83.38	59.93	84.20	56.61	81.88	56.47
4	91.63	83.11	87.83	67.36	82.62	62.12	79.66	52.19
5	89.81	81.92	86.56	70.76	85.27	64.99	85.51	60.67
6	94.50	78.13	88.08	70.26	84.02	66.05	82.44	66.37
7	91.81	81.13	84.81	69.62	83.83	61.00	83.19	58.53
8	92.28	81.82	86.42	70.77	84.72	63.98	83.10	64.65
9	91.93	77.89	82.71	56.31	81.99	56.89	80.55	55.68
10	91.69	80.97	85.34	64.99	82.72	60.35	81.42	61.46

Tabla 14. CSA || resultados obtenidos RAG.

Pregunta	Respuesta		Fragmento A		Fragmento B		Fragmento C	
	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET	BGE	MPNET
1	92.33	86.02	88.43	72.21	87.20	73.39	85.68	73.62
2	89.26	64.58	89.07	73.44	88.49	72.73	88.10	72.98
3	93.38	76.43	89.49	67.22	87.75	63.65	84.60	63.60
4	92.36	78.85	87.06	74.41	84.85	67.09	83.13	65.69
5	92.54	80.53	90.80	70.48	87.27	72.50	88.24	70.78
6	93.96	82.89	93.23	77.69	86.88	65.93	87.01	63.46
7	89.51	68.59	87.07	61.45	84.90	62.63	83.54	61.54
8	88.96	81.94	88.09	76.68	87.63	73.78	88.05	71.11
9	91.93	83.30	86.61	73.90	88.98	69.53	86.79	68.81
10	90.46	66.41	89.11	68.51	88.38	66.72	87.41	67.39

En las siguientes **Figuras 7 y 8**, se observa la distribución de la similitud entre la consulta y la respuesta (Query-Response) después de la implementación de RAG. La similitud fue calculada utilizando la similitud del coseno, que mide la cercanía entre dos vectores (en este caso, las consultas y las respuestas) basándose en las palabras comunes que contienen, sin tener en cuenta el significado contextual o semántico profundo.

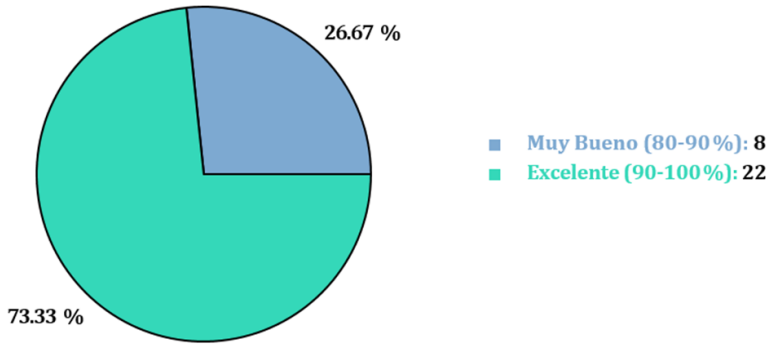


Figura 7. Distribución de puntaje de similitud BGE || RAG.

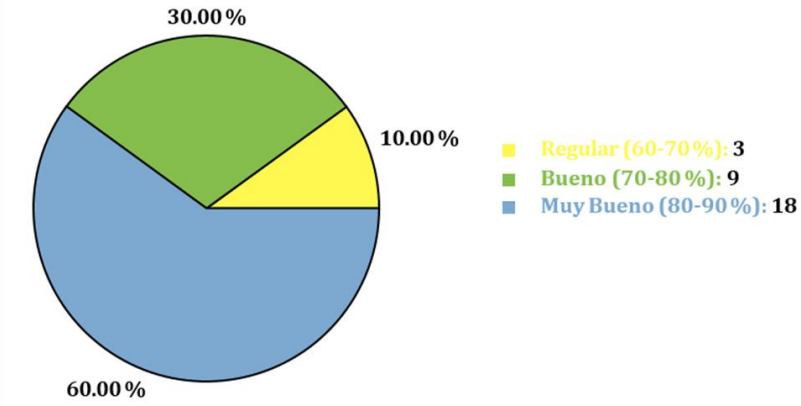


Figura 8. Distribución de puntaje de similitud MPNET || RAG.

Conclusiones.

El proyecto de implementación de un Modelo de Lenguaje Grande (LLM) para cultivos en Chiapas logró configurar el modelo Llama 2 7b, el cual es capaz de responder a preguntas relacionadas con la agricultura. Este avance representa un paso significativo para abordar el déficit de conocimiento agrícola, no solo para los productores, sino también para la población en general.

Durante el desarrollo de este proyecto, se mostró la relevancia de la técnica de Generación Aumentada por Recuperación. Dada su versatilidad, esta técnica permite proporcionar información al modelo sin la necesidad de entrenarlo continuamente, lo que mejora su eficiencia y aplicabilidad en escenarios donde se requiere acceso a datos específicos sin recurrir a un reentrenamiento constante. La Generación Aumentada por Recuperación destaca por su capacidad para integrar información actualizada y específica. Esto permite una mayor eficiencia computacional y reduce los costos asociados al entrenamiento tradicional. Además, facilita la adaptación del sistema a distintos dominios mediante la incorporación de nuevas fuentes de conocimiento. En conjunto, esta técnica mejora la precisión y confiabilidad de las respuestas en contextos especializados. La Generación Aumentada por Recuperación permite a los Modelos de Lenguaje Grande proporcionar respuestas más completas y precisas, favoreciendo la difusión de conocimiento agrícola accesible a los productores y la comunidad en general. La inclusión de información externa amplió la perspectiva del sistema, mejorando su aplicabilidad y utilidad en el contexto local, y contribuyendo a la mejora del entendimiento y la adopción de mejores prácticas agrícolas en la región.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto a través de la convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2025.

Referencias bibliográficas.

Agrotendencia. (2025). Cultivo de arroz: conoce cómo se realiza y sus plagas. Agrotendencia.tv. https://agrotendencia.tv/agricultura/cultivos/cereales/el-cultivo-de-arroz/

Comité Estatal de Información y Finanzas. (2024). Cuaderno de información agrícola 2024. https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/storage/posts/productos/CIGECH/Cuaderno_Agricultura_2024.pdf

Hagos, D. H., Battle, R., & Rawat, D. B. (2024). Recent advances in generative ai and large language models: Current status, challenges, and perspectives. *IEEE transactions on artificial intelligence*.

Jenna Pederson. (2025). Pinecone. https://www.pinecone.io/learn/retrieval-augmented-generation/

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). https://arxiv.org/abs/2005.11401

NVIDIA. (2023). RAG 101: Retrieval-Augmented Generation Pipeline. NVIDIA Technical Blog. https://developer.nvidia.com/blog/rag-101-demystifying-retrieval-augmented-generation-pipelines/

Patel, R., et al. (2025). Large Language Models in 2024–2025: Trends, Techniques and Challenges. Journal of Emerging Management Studies.

Schwaber-Cohen Roie & Arjun Patel. (2025). Chunking Strategies for LLM Applications. https://www.pinecone.io/learn/chunking-strategies/?utm_source=chatgpt.com

Verdejo, E. (2024, May 15). Cultivo de arroz: Consejos y para una siembra exitosa. Mundo Agricultura. https://mundoagricultura.com/cultivos/cultivo-de-arroz-como-se-da-el-arroz/

Zavariz-Romero. (2014). Climate-smart agriculture in Chiapas, Mexico. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/3095a84a-033d-47c0-991e-a0ebba40855a/content

Información de los autores.

Brayan Rusell Figueroa Orantes, Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, curso la especialidad en tecnología web y móvil aplicada al comercio electrónico, realizo su tesis profesional con el proyecto denominado “Implementación de un modelo LLM Local para su uso en cultivos del Estado de Chiapas”.

Diego Zapata García, Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, curso la especialidad en tecnología web, realizo su tesis profesional con el proyecto denominado “Implementación de un modelo LLM Local para su uso en cultivos del Estado de Chiapas”.

Germán Ríos Toledo, obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de la Computación en 2019 por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en Cuernavaca, Morelos, México. Actualmente, es profesor de tiempo completo en el Departamento de Computación del Tecnológico Nacional de México/ I.T. de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas), imparte materias en la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales y en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Su área de especialización es el Procesamiento del Lenguaje Natural.

Aída Guillermina Cossío Martínez es Maestra en Ciencias en Administración por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2002. Es profesora de tiempo completo del área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, desde 1994. Se especializa en la formulación y evaluación de proyectos, así como el emprendimiento y desarrollo de planes de negocio, perfil deseable desde 2015 y trabaja en la línea de investigación Sistemas de Información, actualmente miembro del Cuerpo Académico Tecnología de Información para el Desarrollo de Ventajas Competitivas.

Néstor Antonio Morales Navarro. Doctor en Desarrollo Tecnológico de la Universidad Descartes. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Ingeniero en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel Candidato del Conahcyt. Miembro del Sistema Estatal de Investigadores del estado de Chiapas como Investigador Científico Honorifico. Tiene el reconocimiento a Profesor de Tiempo Completo con Perfil Deseable. Sus intereses de investigación incluyen visión por computadora, aprendizaje profundo y automatización en sistemas mecatrónicos.

Karen Daniela Ramón Cristancho. Ingeniera Electrónica egresada de la Universidad de Pamplona (Colombia). Actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas), donde desarrolla trabajo académico en el área de sistemas mecatrónicos inteligentes aplicados a la agricultura de precisión.

Monitoreo inteligente de la calidad del agua: gestión sostenible del recurso hídrico.

Intelligent water quality monitoring: sustainable management of water resource.

Felisa Vanessa López Pineda (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
D23271374@tuxtla.tecnm.mx.

Héctor Ricardo Hernández de León* (2). Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
hector.hl@tuxtla.tecnm.mx.

Andrés Eduardo de Paz Martínez (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
M17270661@tuxtla.tecn.mx.edu.mx.

Miguel Ángel Guillen Ramos (4), Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
M19270281@tuxtla.tecn.mx.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en abril 07, 2025; aceptado en mayo 09, 2025.

Resumen.

El acceso al agua potable se encuentra amenazado por el crecimiento de la población, la contaminación y el cambio climático. Garantizar la calidad requiere una gestión sostenible que incluya la protección de las fuentes de agua y un monitoreo constante. Las plantas potabilizadoras realizan un proceso complejo para transformar el agua cruda en potable, asegurando su inocuidad para el consumo humano. Sin embargo, muchas de estas etapas aún dependen de métodos manuales de análisis, lo que retrasa la detección de problemas y la toma de decisiones.Para optimizar este proceso, se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos (Figura 1) implementado internet de las cosas (IoT) que permite la recolección y análisis automatizado de datos. Con el uso de sensores, se miden los parámetros físico-químicos como el pH, turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y temperatura, estos datos se registran en una base de datos y se analizan para determinar la calidad del agua. Cuando los valores se desvían de los estándares establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, el sistema emite alertas para una respuesta inmediata. Este enfoque tecnológico permite una vigilancia continua y adaptable, reduciendo tiempo de análisis y mejorando la precisión de las mediciones. Además, sienta las bases para la integración de modelos de aprendizaje automático que puedan predecir variaciones en la calidad del agua, optimizando la gestión del recurso hídrico y previniendo riesgos para la salud pública.

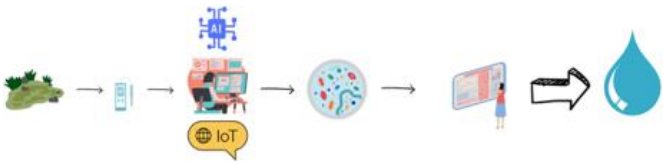


Figura 1. Sistema de adquisición de datos

Palabras claves: Agua potable, calidad del agua, IoT, NOM-127-SSA1-202, sistema de adquisición de datos.

Abstract.

Access to drinking water is threatened by population growth, pollution and climate change. Guaranteeing quality requires sustainable management that includes the protection of water sources and constant monitoring. Water treatment plants follow a complex process to transform raw water into drinking water, ensuring its safety for human consumption. However, many of these stages still depend on manual analysis methods, which delays problem detection and decision-making. To optimize this process, a data acquisition system has been developed (Figure 1) based on the implementation of the Internet of Things (IoT) that allows the collection and automated data analysis. With the use of sensors, physicochemical parameters such as pH, turbidity, total dissolved solids (TDS), conductivity and temperature. These data are recorded in a database and analyzed to determine the quality of the water. When the values deviate from the standards established in NOM-127-SSA1-2021, the system issues alerts for an immediate response. This technological approach allows continuous and adaptive surveillance, reducing analysis time and improving the accuracy of measurements. In addition, it lays the foundation for the integration of machine learning models that can predict variations in water quality, optimizing the management of water resources and preventing risks to public health.

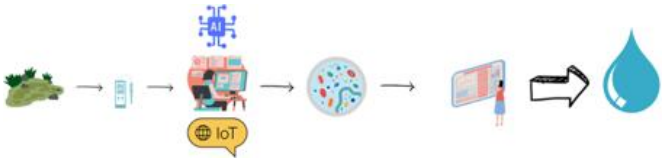


Figure 1. Data acquisition system.

Keywords: Data acquisition system, drinking water, internet of Things (IoT), NOM-127-SSA1-2021, water quality.

1. Introducción.

El agua potable es un tema de salud pública, su disponibilidad está amenazada por factores como el crecimiento en la población, la contaminación y el cambio climático (Figura 2). La gestión sostenible del recurso hídrico requiere proteger los cuerpos de agua y hacer uso responsable, con vigilancia constante de la calidad.

Para lograr una gestión sostenible del recurso hídrico es importante implementar medidas que aseguren la protección de las fuentes de agua, así como el uso responsable y eficiente. La vigilancia y monitoreo constante de la calidad del agua son acciones para identificar problemas tempranos y tomar medidas correctivas.

La contaminación del agua, el cambio climático y los desastres naturales son consecuencia del continuo desarrollo industrial, la interferencia humana en los ecosistemas naturales. Analizar el proceso de potabilización es una acción que permite una gestión sostenible de los recursos hídricos (K. Szramowiat-Sala, 2023).

Figura 2. Cañón del Sumidero, río Grijalva, Chiapas.

El proceso de potabilización del agua consta de una serie de etapas y proceso de tratamiento para convertir el agua cruda, proveniente de fuentes naturales como ríos, lagos o pozos, en agua potable segura apta para consumo humano. Las fases del tratamiento del agua están conformadas de la siguiente manera: captación y pretratamiento, coagulación y floculación, sedimentación, filtración, desinfección, ajuste de pH, adición de químicos, almacenamiento y distribución.

Al realizar el proceso de producción en las plantas potabilizadoras se consideran diferentes parámetros de medición que se estudian para predecir la pureza del agua. El uso de un sistema de adquisición de datos para la recolección de la información, que implementa tecnologías como IoT, monitoreo ambiental y gestión del recurso hídrico (Palermo, 2022), realizando un análisis de los datos históricos y actuales mediante la instrumentación de sensores para medir los principales parámetros como pH, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), turbidez, conductividad, entre otros. Los datos obtenidos del sistema aplicando sensores se registran en una base de datos para posteriormente ser enviados para su análisis en una plataforma. El sistema emite un mensaje de alerta al usuario cuando los parámetros son inferiores a los valores estándar (Yang, 2022) establecidos en la NOM 127-SSA1-2021. La combinación de IoT y la gestión de información en la plataforma permite la recopilación de datos continuos, diversidad de tipos de datos, conectividad de dispositivos, adaptabilidad y mejora continua de la información, lo que puede ayudar a prevenir problemas de calidad del agua antes de que se conviertan en una amenaza para la salud pública (Boccadoro, 2022).

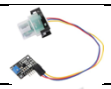
El desarrollo de esta investigación busca diseñar un sistema de monitoreo para la adquisición de datos que permita analizar de forma continua la calidad del agua a partir de sensores habilitados y la integración de un conjunto de datos históricos obtenidos de una planta de potabilización, el uso de IoT permite analizar datos que brindan información para generar como trabajo futuro, un modelo de predicción mediante el procesamiento de los datos obtenidos, generando modelos de aprendizaje automático y realizar predicciones de la calidad del agua, así como ajustar continuamente a los nuevos datos reportados para mejorar el tiempo de procesamiento y la precisión de las mediciones; lo anterior para realizar una correcta toma de decisiones en el proceso de análisis de la calidad del agua (Chen, 2023).

2. Método.

Diseñar el sistema de monitoreo para la adquisición de datos requiere cumplir con estandades de tecnologías de comunicación, sensores y aplicación de plataforma para el almacenamiento continuo de los datos. El sistema se diseña y desarrolla con el objetivo de analizar el proceso de estudio de la calidad del agua y recolectar datos de forma continua a los largo de un período de tiempo establecido, lo que permite monitorear de forma continua la calidad del agua.

Está integrado por componentes que permiten la recolección, almacenamiento y transmisión de los datos. Se integran sensores como: temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales y pH (Tabla 1), que son seleccionados para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

Tabla 1. Sensores de medición.

No.	Tipo de sensor	Unidad	Rango de medición	Sensor
01	Temperatura	Centigrado	0-100	
02	Turbidez	Nefelométrica	0-4000	
03	Sólidos disueltos totales (TDS)	Partes por millón	0-2000	
04	pH	Potencial de Hidrógeno	0-14	

Para la medición de la conductividad se realiza la siguiente operación: conductividad=2*valor de TDS. Esta relación es una simplificación universalmente precisa debido a la variable en la composición de los sólidos disueltos totales en el agua (Barros, 2020).

$$Conductividad = 2 * Valor\ TDS$$

El sistema de monitorio para la adquisición de datos (Figura 3) cuenta con una serie de componentes electrónicos interconectados alámbrica y conectividad inalámbrica a IoT mediante conexión Wi-Fi, llevando a cabo los procesos de registro y almacenamiento con una tarjeta Raspberry Pi 5 y sensores; sin embargo, el sistema puede trabajar en dos modalidades, en línea o fuera de línea, para comodidad del usuario en función de las necesidades que se presente.

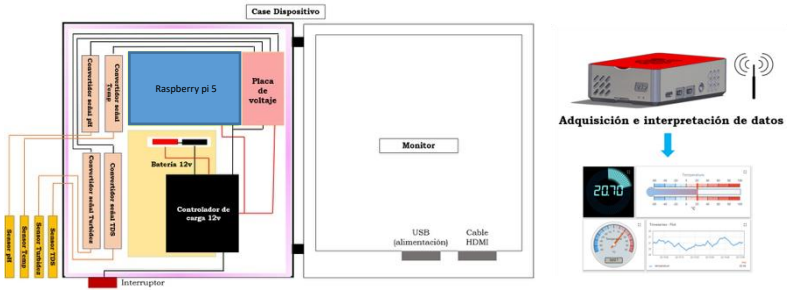


Figura 3. Esquema del sistema de monitoreo para la adquisición de datos.

En la arquitectura del sistema se usa el lenguaje Python para la programación de la Raspberry Pi 5. El trabajo de programación es para el uso de sensores como temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y pH, lo que permite obtener mediciones de cada parámetro, alojando los datos de forma local y en una plataforma en donde ser almacena la información continua. El parámetros de conductividad es obtenido por medio de una conversión

Para el desarrollo del proyecto de investigación (Figura 4) se realizó la calibración de los sensores, la programación de la tarjeta, la conexión electrónica y la configuración de la conexión Wi-Fi. El usuario puede interactuar mediante un display que muestra el sistema, se interactúa mediante un teclado táctil, que permite la ejecución del sistema de monitoreo para la recolección de datos.

Figura 4. Sistema de monitoreo para la adquisición de datos

3. Desarrollo.

La potabilización del agua consta de una serie de pasos para convertir el agua cruda, proveniente de fuentes naturales, en agua potable segura y apta para consumo humano. El proceso de tratamiento de potabilización inicia en la fase de captación y pretratamiento; el proceso inicia en la recolección de agua cruda desde un cuerpo de agua natural (ríos, lagos, arroyos o pozos), el siguiente paso es el pretratamiento, la remoción de los sólidos (orgánicos o inorgánicos). A continuación, la fase de coagulación y floculación, en este paso se añade un coagulante (sulfato de aluminio o policloruro de aluminio) que ayuda a unir pequeñas partículas y sólidos suspendidos para formar flóculos más grandes. Lo siguiente es la sedimentación, el agua pasa a través de grandes tanques de sedimentación donde los flóculos más grandes se asientan en el fondo de los tanques de sedimentación; el agua bruta se mueve hacia la siguiente etapa, mientras que los sólidos sedimentados se eliminan como por ejemplo el lodo. Sé prosigue con la filtración, el agua bruta se somete a una etapa de filtración a través de diferentes medios, como por ejemplo arena. La desinfección es uno de los últimos pasos, para asegurar que el agua esté libre de microorganismos y el agua sea segura para consumo humano. Finalmente se almacena y distribuye, una vez completado el proceso de potabilización, el agua tratada se almacena en tanques para ser distribuida a través de una red de tuberías hacia los hogares y otros sitos en donde se requiere agua potable.

El proceso de potabilización del agua (Figura 5) es amplio y elaborado, el cuidado que se requiere en el manejo, uso de químicos y control de los parámetros requeridos para la obtención del agua potable, es un arduo trabajo, el cual se realiza en la mayoría del proceso de forma manual en tiempos prolongados de análisis. Por lo que se denota la importancia de la implementación de un sistema de monitoreo continuo para el estudio de la calidad del agua (S.T. Chen, 2021).

Figura 5. Proceso de potabilización.

Para identificar la calidad del agua, durante el proceso de potabilización, es necesario realizar una serie de procedimientos, en donde se analizan los distintos parámetros y se evalúa el rango en el que se encuentran; realizar evaluaciones manuales de los rangos de los parámetros físicos-químicos para identificar la situación que guarda el agua durante el proceso de potabilización implica un tiempo de reacción prolongado para el análisis de las muestras, por lo que este trabajo de investigación propone diseñar un sistema de monitoreo que realice el análisis de forma continua y automática para evitar catástrofes que puedan dañar la salud de la población.

Los parámetros que se analizan para el estudio de la calidad del agua en el país son físico, químicos y biológicos, en donde se establecen rangos de mediciones según la Organización Mundial de la Salud por sus siglas OMS y en específico en México a través de la norma NOM 127-SSA1-2021. En el estado del arte los parámetros (Kurniawan, 2020) comúnmente estudiados son: temperatura, turbidez, conductividad, color verdadero, oxígeno disuelto, sólido disuelto total, pH y E-Coli. En el desarrollo de esta investigación, el sistema de monitoreo para la adquisición de datos de la calidad del agua, considera los parámetros físicos-químicos, contemplando sensores de temperatura, turbidez, total de sólidos disueltos (TDS), pH y conductividad eléctrica. Los datos obtenidos de los sensores se registran en una base de datos y se analizan para identificar el estado del agua, generando alertas para el usuario como buena, mala o regular. El sistema genera una alerta al usuario cuando no se cumple con el rango establecido en la NOM 127-SSA1-2021. Con este sistema se propone una solución para el análisis, recolección y procesamientos de los datos con una mejora en los tiempos de trabajo, lo que ayuda a prevenir problemas de la calidad del agua.

Para la revisión y evaluación de las mediciones se realizó un estudio de cotejo de los parámetros contra lo descrito en la NOM 127-SSA1-2021 y revisión de los especialistas en el área del estudio de la calidad del agua. Se efectúo una validación cruzada con los datos obtenidos del sistema y el análisis de muestras procesados por los especialistas, obteniendo datos en un menor tiempo y con un menor margen de error.

Durante el proceso de experimentación del sistema de adquisición de datos, se realizaron pruebas in situ en el río Grijalva y en una planta de potabilización (Figura 6), exponiendo el sistema a un ambiente no controlado, dando como resultado un correcto funcionamiento del sistema fuera de línea (Figura 7), los datos recolectados se almacenan de forma correcta en la memoria del sistema y detecta los estados del agua. Durante el proceso de experimentación en el río se presentaron problemas de conectividad a internet, debido a la ubicación geográfica en el río en donde se realizaron los test; sin embargo, en la planta de potabilización las pruebas funcionaron de forma correcta, enviando los datos recolectados a la plataforma, emitiendo las alertas y almacenando la información, se tiene contemplado realizar más pruebas en el río Grijalva y brindar una solución a la conexión de internet.

Figura 6. Pruebas en río Grijalva y planta de potabilización.

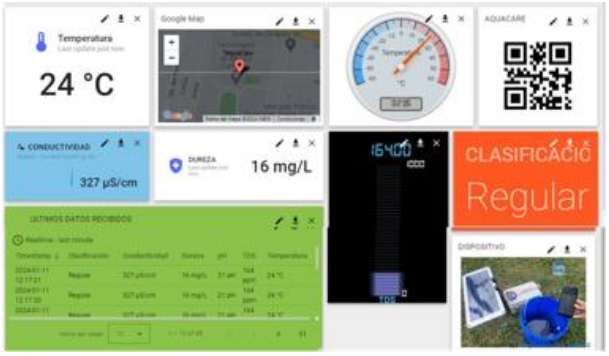


Figura 7. Panel del sistema de adquisición de datos

Conclusiones.

El diseño del sistema de adquisición de datos es una herramienta que brinda un aporte el proceso de análisis del agua y monitoreo continúo de los parámetros físicos-químicos para identificar la calidad del agua que se recolecta en ríos y es procesada en plantas de potabilización. El funcionamiento del sistema es flexible y de fácil aplicación, el funcionamiento es intuitivo, los sensores se sumergen en el agua y el sistema realiza la lectura de los parámetros, en este caso temperatura, turbidez, TDS, conductividad y pH, la información se almacena en la memoria interna, para posterior realizar un análisis de los parámetros y determinar el tipo de calidad de agua. Las etiquetas usadas en el sistema muestran si la calidad del agua es buena, mala o regular. El sistema emite alertas para notificar al usuario del tipo de agua que se analiza.

Las pruebas realizadas al sistema de adquisición demuestran robustez al no presentar fallos en las pruebas realizadas tanto en el río Grijalva como en la planta de potabilización. Sin embargo, existen situaciones como algunos fallos en la conectividad de wifi, lo que no permite realizar pruebas online. Aún se analizan alternativas de solución para contar con estabilidad en la conectividad y no sufrir de perdida de información.

Como trabajos futuros se contempla instalar el sistema de adquisición de datos en una planta de potabilización, recopilar datos de los parámetros físicos-químicos y diseñar un dataset que procese mediante un algoritmo de machine learning (B. K. Jha, 2020) y realiza predicciones de la calidad del agua (I. Kurniawan, 2020) en un tiempo estimado, esto con la intención de optimizar los tiempos de respuesta en el proceso de toma de decisiones ante una contingencia.

Créditos.

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento recibido de este proyecto, al Sistema Municipal de Agua Potable a través de la planta de potabilización “Ciudad del agua” brindando asesoría de expertos en el estudio de la calidad del agua potable y al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por el apoyo recibido durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Referencias bibliográficas.

B. K. Jha (2020), “Cloud-Based Smart Water Quality Monitoring System using IoT Sensors and Machine Learning,” International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 3403–3409, Jun. 2020, doi: 10.30534/ijatcse/2020/141932020.

I. Kurniawan, G. Hayder, and H. M. Mustafa (2020), “Predicting Water Quality Parameters in a Complex River System,” Journal of Ecological Engineering, vol. 22, no. 1, doi: 10.12911/22998993/129579.

L. Barros, T. Siepman, and S. Drexler (2020), “Correlations between TDS and electrical conductivity for high salinity formation brines characteristic of south Atlantic pre salt basins”, Journal Water SA. Doi: 10,17159/wsa/2020,v46.i4.9073

L. Yang and A. Shami (2022), “IoT data analytics in dynamic environments: From an automated machine learning perspective,” Eng Appl Artif Intell, vol. 116, doi: 10.1016/j.engappai.2022.105366.

K. Szramowiat-Sala (2023), “Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Application of Artificial Neural Networks and Machine Learning for Pollution Prevention and Toxicity Measurements”.

P. Boccadoro, V. Daniele, P. Di Gennaro, D. Lofù, and P. Tedeschi (2022), “Water quality prediction on a Sigfox-compliant IoT device: The road ahead of WaterS,” Ad Hoc Networks, vol. 126, doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102749.

P. Chen, B. Wang, Y. Wu, Q. Wang, Z. Huang, and C. Wang (2023), "Urban river water quality monitoring based on self-optimizing machine learning method using multi-source remote sensing data," Ecol Indic, vol. 146, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109750.

S. A. Palermo et al. (2022), "Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. doi: 10.3390/s22166225.

S. T. Chen, S. S. Lin, C. W. Lan, and T. I. Chou (2021), "Design and development of a LoRa based Water Quality Monitoring System," in ISPACS 2021 - International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems: 5G Dream to Reality, Proceeding. doi: 10.1109/ISPACS51563.2021.9651127.

Información de los autores.

Felisa Vanessa López Pineda. Su formación académica inicial es en Informática, egresada del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con una maestría en Administración, un Doctorado en Pedagogía con especialidad en Ambientes Virtuales de Aprendizaje (AVA) y, actualmente, es Doctorante en Ciencias de la Ingeniería, donde desarrolla el proyecto de investigación "Sistema de monitoreo y pronóstico de la calidad del agua potable basado en IoT y técnicas de aprendizaje automático". Ha cursado diversos diplomados en el Tecnológico Nacional de México, entre ellos "Agua limpia y saneamiento" y "Ciencia de datos". Recientemente, realizó una estancia de investigación en la Universidad de Antioquia, en Medellín, Colombia, donde participó en el curso "Inteligencia computacional". Actualmente, colabora como vicepresidenta de la rama estudiantil del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y vicepresidenta del Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE).

Héctor Ricardo Hernández de León. Es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional, tiene estudios de Maestría y Doctorado en Ciencias en Sistemas Automáticos por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de la ciudad de Toulouse, Francia. Es miembro del SNI-I, perfil deseable SEP-PRODEP, responsable del Cuerpo Académico en "Automatización de Procesos" SEP-PRODEP. En el 2017, recibió el PREMIO Estatal de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación. Desde el 2019, es SENIOR MEMBER por la Asociación Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE. El área de interés es el control, supervisión y diagnóstico de fallas de procesos industriales, así como la Inteligencia Artificial aplicada a sistemas basados en datos. Tiene una patente otorgada del IMPI relacionado con biorreactores. Actualmente es Profesor Investigador en los programas académicos de Ingeniería, Maestría y Doctorado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Andrés Eduardo De Paz-Martínez. Ingeniero en sistemas computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, maestro en ciencias de la ingeniería mecatrónica. Participo en INNOVATEC 2023 y 2024, siendo integrante de uno de los equipos que obtuvo dos años consecutivos el galardón a nivel nacional en el evento de innovación. Actualmente es docente en la carrera de ingeniería en sistemas computacionales en la Universidad Valle de México (UVM).

Miguel Ángel Guillen-Ramos. Originario de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en la carrera de ingeniería electrónica. Participó en el evento nacional de ciencias básicas 2022(ENECB) en la etapa nacional, así como en el INNOVATEC 2023 y 2024, ambas en instancias nacionales. Actualmente es maestrante del posgrado en ciencias de la ingeniería mecatrónica.

Perspectiva tecnológica del Tren Maya ante la llegada del Turista: un enfoque sobre infraestructura digital, experiencia del usuario y desarrollo tecnológico en Escárcega, Campeche.

Technological perspective of the Mayan Train in the face of tourist arrival: a focus on digital infrastructure, user experience, and technological development in Escárcega, Campeche.

Iván Humberto Fuentes Chab* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega.
ivan.fc@escarcega.tecnm.mx.

Yesenia Nayrovick Hernández Montero (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega,
yesenia.hm@escarcega.tecnm.mx.

Alma Patricia Chávez Damián (3), Tecnológico Nacional de México/I. T. S. de Escárcega,
alma.cd@escarcega.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 11, 2025; aceptado en diciembre 01, 2025.

Resumen.

El Tren Maya representa una de las infraestructuras ferroviarias más significativas del sureste mexicano, diseñada para impulsar el turismo y el desarrollo económico regional. Este estudio analiza la perspectiva tecnológica del proyecto desde la experiencia del usuario en Escárcega, Campeche, evaluando la infraestructura digital existente y su impacto en la satisfacción turística. Mediante una metodología cuantitativa descriptiva, se aplicaron 139 encuestas a usuarios de la Estación Escárcega durante mayo-junio de 2025. Los resultados revelan que el 87.8% de los encuestados utiliza dispositivos digitales durante su viaje, mientras que el 97.8% manifiesta interés en una aplicación móvil turística integral. Sin embargo, solo el 29.5% tiene acceso constante a internet móvil, y el 75.5% percibe falta de información turística en estaciones. La satisfacción general con la tecnología alcanza el 92.1%, aunque el 87.1% considera necesaria mayor integración tecnológica. Los hallazgos evidencian una brecha significativa entre las expectativas digitales de los usuarios y la infraestructura tecnológica disponible, sugiriendo oportunidades críticas para el desarrollo de soluciones de turismo inteligente que mejoren la experiencia del visitante y fortalezcan la competitividad del destino.

Palabras claves: Experiencia del usuario, infraestructura tecnológica, Tren Maya, turismo digital, turismo inteligente.

Abstract.

Tren Maya represents one of the most significant railway infrastructures in southeastern Mexico, designed to boost tourism and regional economic development. This study analyzes the technological perspective of the project from the user experience in Escárcega, Campeche, evaluating the existing digital infrastructure and its impact on tourist satisfaction. Using a descriptive quantitative methodology, 139 surveys were conducted with users at the Escárcega

Station during May–June 2025. The results reveal that 87.8% of respondents use digital devices during their trip, while 97.8% express interest in an integrated mobile tourism application. However, only 29.5% have constant access to mobile internet, and 75.5% perceive a lack of tourist information at stations. Overall satisfaction with technology reaches 92.1%, although 87.1% consider greater technological integration necessary. The findings highlight a significant gap between users' digital expectations and the available technological infrastructure, suggesting critical opportunities for developing smart tourism solutions that enhance visitor experience and strengthen destination competitiveness.

Keywords: Digital tourism, technological infrastructure, *Tren Maya*, user experience, smart tourism.

1. Introducción.

El desarrollo del Tren Maya constituye una de las obras de infraestructura más ambiciosas en el sureste de México, con el objetivo estratégico de conectar 1,554 kilómetros de vías férreas que interconectan cinco estados: Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán (Fonatur, 2021). Este megaproyecto, estimado en 30 mil millones de dólares, busca transformar la conectividad regional y posicionar la península de Yucatán como un destino turístico integrado de clase mundial (Railway Technology, 2023).

En el contexto de la economía digital contemporánea, la integración de tecnologías de la información y comunicación (TIC) en el sector turístico se ha convertido en un factor determinante para la competitividad de los destinos (Gretzel et al., 2015). La digitalización del transporte público no solo mejora la eficiencia operacional, sino que transforma fundamentalmente la experiencia del usuario, permitiendo servicios personalizados, información en tiempo real y procesos de pagos automatizados (Calatayud et al., 2022; ITDP, 2025).

Escárcega, Campeche, ubicada estratégicamente en la intersección de importantes corredores de transporte del sureste mexicano, representa un caso de estudio particularmente relevante para analizar cómo la tecnología puede transformar un nodo de conectividad tradicional en un destino turístico digitalmente habilitado (Fonatur, 2021; Railway Technology, 2023). La ciudad enfrenta el desafío único de adaptar su infraestructura y servicios a las expectativas de los viajeros digitales del siglo XXI, quienes demandan experiencias integradas, información accesible y servicios tecnológicos avanzados (Sustacha et al., 2023).

La literatura internacional documenta que los sistemas ferroviarios modernos exitosos integran tecnologías como boletos electrónicos, aplicaciones móviles informativas, sistemas de información en tiempo real y plataformas de navegación digital (Buhalis & Amaranggana, 2015; Gretzel et al., 2015). En América Latina, ciudades como México, Guadalajara y Mérida han implementado estrategias de digitalización del transporte público que han demostrado mejoras significativas en la satisfacción del usuario y eficiencia operacional (ITDP, 2025).

Esta investigación aborda una brecha crítica en el conocimiento sobre la percepción y adopción de tecnologías digitales en el contexto específico del Tren Maya, particularmente en estaciones que sirven como puntos de conexión más que como destinos turísticos tradicionales. El estudio busca proporcionar evidencia empírica sobre las expectativas tecnológicas de los usuarios, identificar oportunidades de mejora en la infraestructura digital, y generar recomendaciones específicas para el desarrollo de soluciones de turismo inteligente.

2. Métodos.

Este estudio empleó un diseño cuantitativo descriptivo de corte transversal para evaluar la perspectiva tecnológica de los usuarios del Tren Maya en la Estación Escárcega (Hien & Trang, 2024). La metodología se fundamentó en los principios de investigación en turismo digital establecidos por la literatura especializada contextualizando las áreas de enfoque dirigidas al impacto de la digitalización, la percepción de la seguridad tecnológica y la implementación en el desarrollo de software que actualmente ofrece el Tren Maya y son evaluados por los usuarios que arriban en la Estación de la ciudad de Escárcega, Campeche.

Figura 1. Delimitación de la muestra y caracterización del enfoque.

La población objetivo incluyó a todos los usuarios del Tren Maya que transitaron por la Estación Escárcega, ubicada en Calle 31 por 44, Colonia Salsipuedes I, C.P. 24350, Escárcega, Campeche, México. Se utilizó un muestreo por conveniencia durante el período de recolección de datos comprendido entre el 21 de mayo y el 4 de junio de 2025.

El tamaño de muestra final fue de 139 participantes, distribuidos según las siguientes características demográficas: 54.7% masculino y 45.3% femenino, con una edad promedio de 39.4 años (rango: 20-75 años). La distribución por grupos etarios incluyó: 18-25 años (23.7%), 26-35 años (25.9%), 36-50 años (26.6%), 51-65 años (19.4%), y mayores de 65 años (4.3%).

Como instrumento para la recolección de datos en la perspectiva del impacto de la digitalización, la seguridad tecnológica y las necesidades o satisfacción en la implementación de software se desarrolló un cuestionario estructurado de 41 ítems que abarcó cinco dimensiones principales : (1) datos demográficos, (2) uso de tecnología digital, (3) seguridad y confianza tecnológica, (4) necesidades de información turística, y (5) satisfacción general con el servicio (Gretzel et al., 2015; Ramyar & Halim, 2020). El instrumento incorporó escalas de Likert de 5 puntos para medir actitudes y percepciones, siguiendo las mejores prácticas metodológicas en investigación de estándares éticos y satisfacción turística (Ramyar & Halim, 2020).

La recolección de datos se realizó mediante encuestas presenciales administradas por encuestadores capacitados en la Estación Escárcega. Se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes, garantizando la confidencialidad y anonimato de las respuestas. El protocolo de recolección siguió los estándares éticos establecidos para investigación enfocados al turismo.

Los datos fueron procesados utilizando técnicas de estadística descriptiva, incluyendo medidas de tendencia central, distribuciones de frecuencia y análisis de correlación. Se calcularon porcentajes de respuesta para cada variable categórica y se generaron índices de satisfacción para las escalas Likert. El análisis se complementó con pruebas de significancia estadística para identificar patrones relevantes en los datos tal como se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1. Significancia estadística de patrones identificados.

Métrica	Población		Descripción
	n	%	
Total de participantes	139	100.0%	Total de encuestados en la Estación de Escárcega del Tren Maya
Participantes masculinos	76	54.7%	Distribución masculina por género
Participantes femeninos	63	45.3%	Distribución femenina por género
Edad promedio	39.4	--	Edad promedio de los participantes en años
Uso de dispositivos digitales	122	87.8%	Usuarios que emplearon dispositivos digitales durante la visita y el trayecto
Acceso constante a Internet	41	29.5%	Usuarios con acceso y uso constante a Internet durante el viaje

Uso de aplicaciones turísticas	94	67.6%	Usuarios que utilizaron aplicaciones móviles turísticas
Pagos digitales	99	71.2%	Usuarios que realizaron pagos digitales durante el viaje
Satisfacción tecnológica	128	92.1%	Usuarios satisfechos con los servicios tecnológicos actuales
Necesita más tecnología	121	87.1%	Usuarios que opinan que se necesita implementar más tecnología
Solicitan aplicación móvil	136	97.8%	Usuarios que desean una aplicación móvil integral para el turista
Carecen de información turística	105	75.5%	Usuarios que perciben falta de información turística antes, durante o después del trayecto
Dificultades para encontrar servicios locales	83	59.7	Usuarios que tuvieron dificultades para encontrar servicios turísticos
Dispuestos a probar nuevas aplicaciones	133	95.7%	Usuarios dispuestos a participar en las pruebas de una nueva aplicación

3. Desarrollo.

Caracterización Demográfica de los Usuarios.

El análisis demográfico reveló un perfil diverso de usuarios del Tren Maya en Escárcega, con una distribución equilibrada por género y una concentración significativa en grupos etarios económicamente activos. El propósito principal de viaje se distribuyó como sigue: turismo (41.7%), visitas familiares (36.0%), negocios (12.2%) y otros motivos (10.1%). Esta composición indica que la estación atiende tanto a viajeros recreativos como a usuarios por motivos utilitarios, lo que plantea requisitos tecnológicos diferenciados.

Los lugares de origen más frecuentes incluyeron Campeche (10.8%), la propia Escárcega (10.8%), Mérida (6.5%), y Bacalar (4.3%), evidenciando tanto flujos de conectividad regional como patrones de movilidad local. Esta diversidad geográfica sugiere la necesidad de interfaces tecnológicas que acomoden diferentes niveles de familiaridad con el destino y sus servicios.

Adopción y Uso de Tecnologías Digitales.

Los resultados demuestran una alta penetración de dispositivos digitales entre los usuarios, con el 87.8% reportando el uso de smartphones, tablets o laptops durante su viaje. La frecuencia de uso se distribuyó en: varias veces (46.8%), ocasionalmente (36.0%), una vez (12.9%), y ninguna vez (4.3%). Esta alta adopción tecnológica indica una base de usuarios receptiva a soluciones digitales avanzadas (Buhalis & Amaranggana, 2015; ITDP, 2025).

Sin embargo, se identificó una brecha crítica en la conectividad a internet, con solo el 29.5% de usuarios reportando acceso constante a internet móvil durante su trayecto. El 48.9% experimentó acceso intermitente, mientras que el 12.9% careció completamente de conectividad. Esta limitación representa un obstáculo significativo para la implementación efectiva de servicios de turismo inteligente.

El uso de aplicaciones turísticas alcanzó el 67.6% de los encuestados, concentrándose principalmente en mapas digitales (31.7%) y redes sociales (28.8%). La combinación de ambas herramientas fue reportada por el 24.5% de usuarios. Notablemente, solo el 35.3% había utilizado alguna aplicación oficial relacionada con el Tren Maya, indicando una oportunidad significativa para el desarrollo de plataformas específicas del servicio (Hien & Trang, 2024).

Percepción de la Seguridad Tecnológica.

La evaluación de la confianza en sistemas digitales reveló niveles moderadamente positivos, pero con áreas de mejora identificables. La confianza en sistemas de pago digital del Tren Maya alcanzó una calificación promedio de 3.83/5, mientras que la protección de datos personales obtuvo 3.69/5. El indicador más alto fue la confiabilidad del sistema de boletaje digital (4.23/5), y el más bajo correspondió a la percepción de protección de datos personales identificando un área de oportunidad para incrementar la satisfacción del usuario (Yap et al., 2025).

El promedio general de confianza en seguridad tecnológica se situó en 3.90/5, sugiriendo una aceptación moderada, pero con espacio para mejoras en transparencia y comunicación de medidas de seguridad. El 85.6% de usuarios expresó que se sentiría más seguro con certificaciones visibles de seguridad en las plataformas digitales.

Necesidades de Información Turística y Aplicaciones Móviles.

Los resultados evidenciaron una demanda considerable por mejores sistemas de información turística. El 75.5% de encuestados percibió falta de información turística en estaciones o durante el viaje, mientras que el 72.7% había tenido acceso a información sobre Escárcega u otros destinos. Esta aparente contradicción sugiere que, aunque existe cierta información disponible, su calidad, accesibilidad o completitud no satisface las expectativas de los usuarios (Morelos-Gómez et al., 2024).

La demanda por una aplicación móvil integral fue prácticamente universal, con el 97.8% de usuarios expresando interés en una plataforma que muestre rutas, hospedaje y gastronomía local. Las características más solicitadas incluyeron: lugares de interés (múltiples menciones), información de horarios y precios, restaurantes y hospedajes, y servicios de navegación local o guías turísticos.

La influencia de la información digital en la experiencia turística fue calificada como significativa por el 63.3% de usuarios ("mucho") y el 32.4% ("algo"), confirmando la importancia estratégica de invertir en sistemas de información digital robustos para el desarrollo de una aplicación turística integral (Sustacha et al., 2023; Buhalis & Amaranggana, 2015).

Dificultades en el Acceso a Servicios y Satisfacción General.

El 59.7% de usuarios reportó dificultades para encontrar servicios de hospedaje, transporte, guías y restaurantes, lo que correlaciona directamente con la percepción de falta de información turística. Esta cifra representa una oportunidad crítica para soluciones tecnológicas que faciliten la localización y contratación de servicios locales.

La satisfacción general con el servicio del Tren Maya alcanzó niveles altos, con el 69.8% de usuarios "muy satisfechos" y el 25.9% "satisfechos". La satisfacción específica con la presencia de tecnología en servicios turísticos fue del 92.1%, aunque paradójicamente, el 87.1% considera que el Tren Maya necesita más tecnología para apoyar al turismo derivado a que los servicios digitales actuales aunque poseen datos informativos, no proveen de un amplio catálogo de servicios ni de paraderos o locaciones de interés, así como también, no se brinda relevancia a comercios o emprendimientos locales que provean de productos originarios de la región (Lopes et al., 2024; Martínez et al., 2024).

La disposición a participar en pruebas de aplicaciones turísticas regionales fue extraordinariamente alta (95.7%), indicando no solo demanda sino también voluntad activa de colaborar en el desarrollo de soluciones tecnológicas.

Análisis Comparativo por Segmento de Usuarios.

El análisis por motivo de viaje reveló patrones diferenciados en el uso tecnológico. Los usuarios de negocios mostraron la edad promedio más baja (32.2 años) y alta adopción de dispositivos digitales. Los turistas representaron el segmento más numeroso en el uso de tecnología digital (53 usuarios) y la mayor demanda por aplicaciones móviles (58 usuarios). Los visitantes familiares exhibieron patrones de uso moderados, pero consistentes diferenciados según el motivo de viaje: los turistas fueron el segmento más numeroso en demanda digital (Yap et al., 2025).

Esta segmentación sugiere la necesidad de enfoques tecnológicos diferenciados que atiendan las necesidades específicas de cada tipo de usuario, desde funcionalidades orientadas a negocios hasta características especializadas para turismo recreativo.

Conclusiones.

Esta investigación proporciona evidencia empírica crucial sobre la perspectiva tecnológica del Tren Maya desde la experiencia del usuario en Escárcega, Campeche. Los hallazgos revelan una paradoja fundamental: mientras existe una alta adopción de dispositivos digitales (87.8%) y satisfacción con la tecnología existente (92.1%), persiste una demanda abrumadora por mayor integración tecnológica (87.1%) y servicios digitales más completos.

Brecha de Conectividad Crítica: La limitación más significativa identificada es el acceso inconsistente a internet móvil, con solo el 29.5% de usuarios reportando conectividad constante. Esta deficiencia infraestructural obstaculiza fundamentalmente la implementación efectiva de soluciones de turismo inteligente y debe ser prioritariamente abordada.

Demanda Universal por Aplicaciones Integradas: La demanda prácticamente unánime (97.8%) por una aplicación móvil turística integral indica una oportunidad estratégica excepcional para el desarrollo de plataformas digitales especializadas. Esta aplicación debería integrar información de rutas, servicios locales, navegación y funcionalidades de reservación.

Déficit de Información Turística: El 75.5% de usuarios percibe falta de información turística adecuada, correlacionándose directamente con las dificultades reportadas para encontrar servicios (59.7%). Esto sugiere la necesidad urgente de sistemas de información digital más robustos y accesibles.

Confianza Tecnológica Moderada: Los niveles de confianza en seguridad digital (3.90/5) indican aceptación, pero con margen para mejora. La implementación de certificaciones visibles de seguridad y mejor comunicación de políticas de privacidad podría incrementar significativamente la adopción de servicios digitales.

Segmentación de Usuarios: Los patrones diferenciados por tipo de viajero sugieren la necesidad de enfoques tecnológicos personalizados que atiendan específicamente las necesidades de turistas recreativos, viajeros de negocios y visitantes familiares.

Implicaciones para el Desarrollo Tecnológico: Los resultados evidencian que Escárcega se encuentra en una posición estratégica para implementar soluciones de turismo inteligente, dado el alto nivel de receptividad tecnológica de sus usuarios y la disposición excepcional (95.7%) a participar en el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Este estudio revela una alta adopción tecnológica y satisfacción, pero también una brecha crítica en acceso a internet y sistemas de información digital (Gretzel et al., 2015; Buhalis & Amaranggana, 2015). Recomendaciones concretas incluyen inversiones en conectividad, desarrollo de aplicaciones móviles y certificación de seguridad tecnológica (Calatayud et al., 2022; Sustacha et al., 2023).

Recomendaciones Estratégicas:

1. Inversión prioritaria en infraestructura de conectividad móvil.
2. Desarrollo de una aplicación móvil integral del Tren Maya con funcionalidades turísticas específicas.
3. Implementación de sistemas de información digital en tiempo real en estaciones.
4. Establecimiento de certificaciones de seguridad visibles en plataformas digitales.
5. Creación de alianzas con proveedores de servicios locales para integración digital.

Este estudio contribuye al conocimiento académico sobre digitalización del transporte ferroviario en América Latina y proporciona evidencia empírica para la toma de decisiones en el desarrollo del Tren Maya. Las limitaciones incluyen

el enfoque en una sola estación y el período de recolección específico, sugiriendo la necesidad de estudios longitudinales y comparativos en múltiples ubicaciones del sistema ferroviario.

La implementación efectiva de las recomendaciones derivadas de esta investigación podría posicionar al Tren Maya como un modelo de referencia en turismo ferroviario inteligente para América Latina, contribuyendo significativamente al desarrollo económico y turístico del sureste mexicano.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de Escárcega por las facilidades brindades para el desarrollo de este proyecto. También se agradece al Tren Maya, al personal de la Estación Escárcega del Tren Maya por la vinculación y apertura para llevar a cabo el proyecto.

Referencias bibliográficas.

Buhalis, D., & Amaranggana, A. (2015). *Smart tourism destinations enhancing tourism experience through personalisation of services*. In I. Tussyadiah & A. Inversini (Eds.), Information and Communication Technologies in Tourism 2015 (pp. 377-389). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14343-9_28

Calatayud, A., Sánchez González, S., Bedoya-Maya, F., Giraldez, F., & Palacin, R. (2022). *Driving the digital transformation of transportation in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank. https://doi.org/10.18235/0004214

Fonatur. (2021). *Tren Maya: Desarrollo regional sustentable*. Fondo Nacional de Fomento al Turismo.

Gretzel, U., Sigala, M., Xiang, Z., & Koo, C. (2015). *Smart tourism: Foundations and developments*. Electronic Markets, 25(3), 179-188. https://doi.org/10.1007/s12525-015-0196-8

Hien, H. N., & Trang, T. T. (2024). *Decoding smart tech's influence on tourist experience quality: Examining smart tourism technology attributes through connectivity, information, personalization, mobility, and interactivity*. Asian Journal of Business Research, 14(1), 96-116. https://doi.org/10.14707/ajbr.240167

Instituto para el Desarrollo del Transporte y Políticas de Desarrollo (ITDP). (2025). *Digitalization in public transport: Lessons from Mexico's cities*. ITDP Mexico. https://itdp.org/2025/07/11/digitalization-in-public-transport-lessons-from-mexicos-cities/

Lopes, J. D., Ferreira, J. J., & Farinha, L. (2024). *Contributions to the design of regional tourism innovation systems in Latin America*. Journal of Innovation & Knowledge, 9(3), Article 100520. https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100520

Martínez, C. I. P., Herrera-Franco, G., Restrepo, J. E., & Berrezueta, E. (2024). *Efficiency and sustainability of the tourism industry in Latin America and the Caribbean*. Cleaner and Responsible Consumption, 13, Article 100186. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100186

Morelos-Gómez, J., Arroyo-Cañada, F. J., & Gil-Saura, I. (2024). *Digital transformation in the tourism sector: The key role of social networks in business management*. Estudios Gerenciales, 40(170), 27-37.

Railway Technology. (2023). *Tren Maya Railway Project, Mexico. Railway Technology*. https://www.railway-technology.com/projects/tren-maya-railway-project/

Ramyar, M., & Halim, N. (2020). *Tourist expectation and satisfaction towards existing infrastructure and facilities in Golestan National Park, Iran*. American Research Journal of Humanities & Social Science, 3(7), 89-108.

Sustacha, I., Sarmiento-Pelayo, M. P., & García-Muiña, F. E. (2023). *The role of technology in enhancing the tourism experience in smart destinations: A meta-analysis*. Journal of Destination Marketing & Management, 29, Article 100800. https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2023.100800

Yap, Y. Y., Low, M. P., & Ali, M. H. (2025). *Smart tourism technologies and tourist satisfaction: A systematic literature review*. Annals of Tourism Research, 110, Article 103879.

Información de los autores.

Iván Humberto Fuentes Chab. Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Campeche, con Maestría en Ciencias de la Computación por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Se desempeña como docente del programa de estudios de Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico Superior de Escárcega. Tiene la distinción de Perfil Deseable ante PRODEP.

Yesenia Nayrovick Hernández Montero. Ingeniera Civil por el Instituto Tecnológico de Chetumal, estudiante de la Maestría en Economía Social y Solidaria en el Instituto Tecnológico Superior de Escárcega. Se desempeña como docente y presidenta del programa de estudios de Ingeniería Ferroviaria en el Instituto Tecnológico Superior de Escárcega.

Alma Patricia Chávez Damián. Licenciada en Turismo por la Universidad Mesoamerica de San Agustin, con Maestría en Administración por el Instituto de Estudios Universitarios del Estado de Campeche. Se desempeña como docente del programa de estudios de Licenciatura en Turismo en el Instituto Tecnológico Superior de Escárcega. Tiene la distinción de Perfil Deseable ante PRODEP.

Planificación de trayectoria en mapa de ocupación para robot móvil de almacén.

Occupancy map path planning for a mobile warehouse robot.

José Ángel Zepeda Hernández* (1).
Estudiante del DCI del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
jose.zh@tuxtla.tecnm.mx.

Ildeberto de los Santos Ruiz (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
ildeberto.dr@tuxtla.tecnm.mx.

Osbaldo Ysaac García Ramos (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx.

Fernando Rafael Martínez Algarín (4). Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, m18270404@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en marzo 31, 2025; aceptado en abril 24, 2025.

Resumen.

Este trabajo presenta un enfoque para la navegación autónoma de robots móviles basado en la generación de mapas de ocupación y la planificación de trayectorias mediante el algoritmo $\boldsymbol{A*}$. *Se emplea un método para construir mapas de ocupación a partir de imágenes del entorno, permitiendo representar de manera eficiente las áreas navegables y los obstáculos. A partir de estos mapas, se aplica el algoritmo* $\boldsymbol{A*}$ *para determinar trayectorias óptimas desde un punto inicial hasta un destino, garantizando un desplazamiento seguro y eficiente. Los resultados obtenidos en simulaciones demuestran la efectividad de la combinación de estos métodos para la navegación autónoma en entornos estructurados y dinámicos.*

Palabras claves: Algoritmo A*, mapas de ocupación, navegación autónoma, planificación de trayectorias, robots móviles.

Abstract.

This paper presents an approach for autonomous mobile robot navigation based on occupancy map generation and trajectory planning using the $\boldsymbol{A*}$ *algorithm. A method is employed to construct occupancy maps from environment images, effectively representing navigable areas and obstacles. Based on these maps, the* $\boldsymbol{A*}$ *algorithm is applied to determine optimal trajectories from an initial point to a destination, ensuring safe and efficient movement. Simulation results demonstrate the effectiveness of combining these methods for autonomous navigation in structured and dynamic environments.*

Keywords: A* algorithm, autonomous navigation, mobile robots, occupancy maps, trajectory planning.

1. Introducción.

El incremento global del comercio electrónico ha demandado la implementación de nuevos procesos de automatización en logística y en la eficiente gestión de almacenes, los cuales son esenciales en la actual cadena de suministro. Ante el crecimiento exponencial del comercio electrónico y las elevadas expectativas de los consumidores respecto a la rapidez y precisión en las entregas, las empresas se enfrentan a una presión creciente para optimizar sus operaciones logísticas. Esto ha resultado en la adopción de tecnologías avanzadas, entre las que se destacan los robots móviles (MR, por sus siglas en inglés) como soluciones innovadoras y disruptivas. Asimismo, se han desarrollado estrategias que automatizan el flujo de mercancías y la gestión de materiales, contribuyendo así a la mejora de la productividad (Moshayedi, 2019).

Los robots móviles descritos ejecutan operaciones de almacenaje y movilidad sin necesidad de dirección externa, debido a sus avanzados sistemas de control y seguimiento de trayectoria. Esto les confiere la habilidad de desplazarse de manera autónoma en el interior de un almacén, con la capacidad de evadir obstáculos y optimizar rutas. Así, pueden efectuar tareas como el transporte de mercancías, la administración de inventarios y el reabastecimiento (Guillén, 2021).

Para que un robot pueda navegar eficazmente dentro de un mapa de ocupación, que representa de manera virtual el espacio operativo, es fundamental que el robot sea capaz de determinar su posición con respecto a una referencia. En este contexto, se considera como referencia el origen del mapa, así como los puntos o coordenadas que definen el comienzo y el final de su misión. Con el propósito de lograr esto, el robot utiliza una serie de sensores, tales como *encoders*, los cuales miden el movimiento angular o lineal de las ruedas del robot y lo convierten en señales eléctricas para estimar la velocidad de desplazamiento, una unidad de medición inercial conocida como IMU (Inertial Measurement Unit por sus siglas en inglés) que integra acelerómetros y giroscopios, y en algunos casos, magnetómetros para estimar la orientación, aceleración y velocidad angular del robot. Además, de un sensor para la detección y medición por luz LIDAR (Light Detection and Ranging por sus siglas en inglés), el cual utiliza un dispositivo de luz láser para medir distancias a objetos en su entorno. El uso de estos sensores permite medir el desplazamiento de las ruedas, la velocidad lineal del robot, y detectar tanto obstáculos fijos como móviles. Mediante el procesamiento de la información recopilada por los sensores instalados en el robot, es viable que éste siga una trayectoria predefinida y además conozca su posición actual en el entorno de navegación.

La elaboración del mapa de ocupación es parte fundamental del proceso de planificación de trayectorias y su construcción inicia con la elaboración de un croquis, esquema o diagrama que indique la distribución de planta del almacén, el procesamiento de éste y la planificación de trayectorias optimizadas en función de la estructura propuesta empleando algún algoritmo para este fin, que en este caso se utiliza el algoritmo $\boldsymbol{A}*$, con el objetivo de planear el desplazamiento de un robot móvil desde un punto inicial hasta un objetivo previamente establecido, mientras evita los obstáculos fijos representados en el mapa de ocupación.

2. Métodos.

Mapas de ocupación.

Un mapa de ocupación constituye una representación del ambiente circundante y de trabajo de un robot móvil dentro de un almacén, ilustrando áreas libres, ocupadas o desconocidas, paredes, pasillos u obstáculos, lo cual resulta fundamental para la navegación autónoma y la planificación de trayectorias, adecuadas y seguras.

La Figura 1 ilustra un croquis utilizado como ejemplo, con una rejilla de dimensiones de 10x10 metros, con el objetivo de explicar el proceso para construir y ser usado como mapa de ocupación. El croquis o esquema contiene dos diferentes áreas, las áreas representadas en color blanco indican las celdas en las que se permiten el tránsito de un robot móvil, mientras que aquellas en color negro denotan obstáculos o paredes donde el tránsito no está permitido.

El mapa de ocupación se representa como una cuadrícula rectangular o de forma irregular, donde cada celda tiene un valor entre 0 y 1 que indica la probabilidad de estar ocupada: 0 (negro) para obstáculos, 1 (blanco) para áreas transitables y valores intermedios para zonas de incertidumbre, que podrán ser seleccionables para transitar dependiendo del valor de la probabilidad de la celda con relación a un valor de umbral determinado por el usuario.

Estos esquemas de cuadriculas o mallas, en conjunto con la matriz de valores de probabilidad asignados en cada celda, conforman el mapa de ocupación, el cual nos permite realizar la planificación de trayectorias entre dos o más puntos, denominados inicio (*start*) y meta (*goal*), para logra esto es necesario utilizar algún algoritmo de planificación de trayectorias, en este caso será utilizado el algoritmo A* (A estrella), el cual cuenta con ventajas respecto al tipo de aplicación en esta investigación.

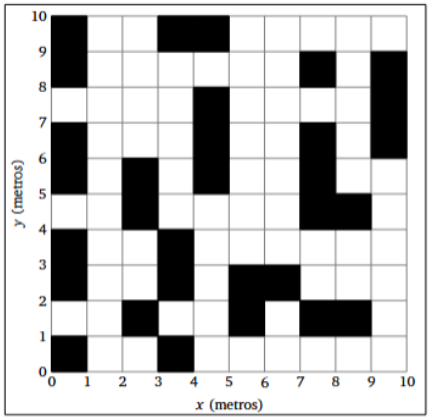


Figura 1. Mapa de ocupación.

Algoritmo A*

El algoritmo $\boldsymbol{A*}$ es un método de búsqueda preferente para encontrar la mejor trayectoria (*Best First Search*). Es muy popular en la planificación de trayectorias para ambientes estructurados y ha sido exitosamente utilizado en Inteligencia Artificial y Robótica.

Constituye un método de búsqueda heurística empleado para determinar la trayectoria óptima entre un punto inicial y un objetivo dentro de un espacio de búsqueda o mapa de ocupación. Se fundamenta en la combinación de la Búsqueda en Anchura (BFS) y el Algoritmo de Dijkstra, lo que le confiere eficiencia en la identificación de trayectos cortos en grafos y mapas de ocupación (Aramayo, 2017).

$\boldsymbol{A*}$ es un algoritmo de búsqueda informada que basa su comportamiento en la evaluación de la siguiente expresión:

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (1)$$

Donde $\boldsymbol{g(n)}$ es el costo del mejor camino desde el estado inicial hasta el estado $\boldsymbol{n}$, $\boldsymbol{h(n)}$ es la estimación heurística del costo desde $\boldsymbol{n}$ hasta un estado final óptimo, $\boldsymbol{f(n)}$ es el costo estimado de la mejor solución que pasa por el estado $\boldsymbol{n}$, donde $\boldsymbol{n}$, el $\boldsymbol{n}$ -ésimo punto donde se está evaluando la trayectoria del robot móvil.

El algoritmo $\boldsymbol{A*}$ se basa en el costo total $\boldsymbol{f(n)}$, calculada con la ecuación 1, la cual esta definida como la suma del costo acumulado más el costo heurístico, y se emplea para evaluar de manera objetiva la calidad de una trayectoria entre nodos. El costo acumulado se representa mediante la función $\boldsymbol{g(n)}$, que indica el costo desde el nodo inicial hasta el nodo actual $\boldsymbol{n}$. En este contexto específico, la métrica utilizada es la distancia entre nodos. Es importante destacar que el costo de $\boldsymbol{g(n)}$ se incrementa a medida que la búsqueda avanza. El costo heurístico $\boldsymbol{h(n)}$, proporciona una estimación del costo remanente desde el estado actual $\boldsymbol{n}$ hasta el objetivo. Dado que la estructura es una cuadrícula ortogonal y las reglas de movimiento permitidas en este ejemplo son exclusivamente en direcciones horizontales y

verticales, se utiliza la distancia de Manhattan que está definida en la ecuación 2. Si se permitiese el movimiento en cualquier otra dirección, podría emplearse la distancia euclidiana, adecuada para ese propósito.

Funcionamiento del Algoritmo $A*$

El algoritmo $A*$ integra la longitud del camino desde la raíz hasta el estado actual en la función de evaluación h, evaluando no solo la calidad del estado, sino también el trayecto seguido para alcanzarlo.

Utiliza dos tipos de estructuras, denominadas lista abierta y lista cerrada; la primera incluye los nodos que potencialmente podrían formar parte de la trayectoria, mientras que la segunda lista comprende los nodos que ya han sido evaluados y no requieren una reevaluación.

Algoritmo 1. Búsqueda de trayectoria basada en el costo total $f(n) = g(n) + h(n)$

Require: Mapa de ocupación, posición inicial n_{start}, posición objetivo n_{goal}
Ensure: Trayectoria desde n_{start} hasta n_{goal} (si existe)
Initialization:
Definir el nodo inicial n_{start} y el nodo objetivo n_{goal}
Inicializar la lista abierta $Open = \{n_{start}\}$
Inicializar la lista cerrada $Closed = \emptyset$
while $Open \neq \emptyset$ **do**
  Seleccionar el nodo $n_{current}$ en $Open$ con el menor costo calculado con $f(n) = g(n) + h(n)$, donde $g(n)$= costo acumulado de n_{start} hasta el nodo actual $n_{current}$ y el costo heuristico $h(n) = |X_{actual} - X_{meta}| + |Y_{actual} - Y_{meta}|$
  Mover $n_{current}$ de $Open$ a $Closed$
  if $n_{current} = n_{goal}$ **then**
    return reconstrucción de la trayectoria desde n_{goal} hasta n_{start}
  end if
  for cada vecino $n_{neighbor}$ de $n_{current}$ **do**
    if $n_{neighbor} \notin Closed$ y es transitable **then**
      Calcular $f(n)$ **para** $n_{neighbor}$
      if $n_{neighbor} \notin Open$ **then**
        Agregar $n_{neighbor}$ a $Open$
      end if
    end if
  end for
end while
return "No se encontró una trayectoria"

Suponiendo una cuadrícula de 5x5, como se muestra en la Figura 2 donde el robot debe moverse desde una celda de inicio que se denomina $S(0,0)$ hasta el objetivo o meta $G(4,4)$. Se permite movimiento en cuatro direcciones: arriba, abajo, izquierda y derecha.

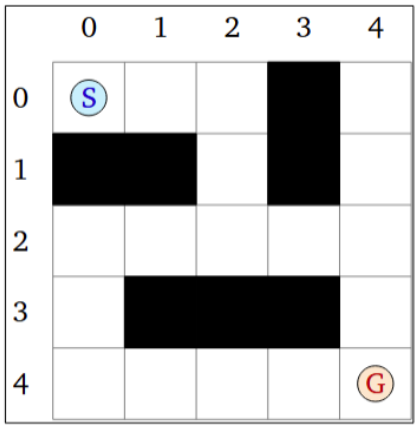


Figura 2. Mapa de la cuadrícula

Usando la distancia de Manhattan definida en la ecuación 2 como heurística para el cálculo de la distancia restante al objetivo y considerando los valores de $\boldsymbol{X}$ y $\boldsymbol{Y}$ de la celda mostrada en la figura 2, entonces:

$$h(n) = |X_{actual} - X_{meta}| + |Y_{actual} - Y_{meta}| \quad (2)$$

Se buscan diferentes alternativas de trayectorias del nodo o celda de inicio al objetivo expandiendo el algoritmo para la evaluación de los nodos más prometedores hasta encontrar la ruta óptima, que en este caso es:

$$(\mathbf{0},\mathbf{0}) \rightarrow (\mathbf{0},\mathbf{1}) \rightarrow (\mathbf{0},\mathbf{2}) \rightarrow (\mathbf{1},\mathbf{2}) \rightarrow (\mathbf{2},\mathbf{2}) \rightarrow (\mathbf{2},\mathbf{3}) \rightarrow (\mathbf{2},\mathbf{4}) \rightarrow (\mathbf{3},\mathbf{4}) \rightarrow (\mathbf{4},\mathbf{4})$$

Si se va recorriendo la secuencia de puntos indicados, se puede constatar el recorrido de la trayectoria a lo largo del mapa de la cuadricula mostrado en la figura 2, existen otras alternativas, pero la indicada es la trayectoria mas corta. En este caso por la naturaleza y simplicidad del ejemplo se puede apreciar por simple inspección, sin embargo, en mapas de ocupación de mayor tamaño y complejidad de objetos representados, la tarea se vuelve casi imposible de resolver por simple inspección, por tanto, es donde toma valor los diferentes algoritmos para resolverlo.

3. Desarrollo.

Partiendo de la vista en planta de un almacén, que puede ser una imagen fotográfica, un croquis realizado en computadora o un mapa generado a partir de sensores como un LiDAR o cámaras RGB-D, el cual es una representación del entorno de trabajo del robot, tal como se presenta en la Figura 3, posteriormente y a través de un proceso computacional, se obtiene el mapa de ocupación.

Inicialmente, el croquis de tipo RGB es transformado a una escala de grises; y en seguida, se procede a su binarización mediante un umbral determinado a partir de la imagen en escala de grises utilizando el método de Otsu.

Este método proporciona un umbral que minimiza la varianza interclase entre los píxeles blancos y negros que han pasado por el umbral. El umbral se emplea para convertir una imagen en escala de grises a una imagen binaria (Otsu, N., 1975) y (Xu, 2011).

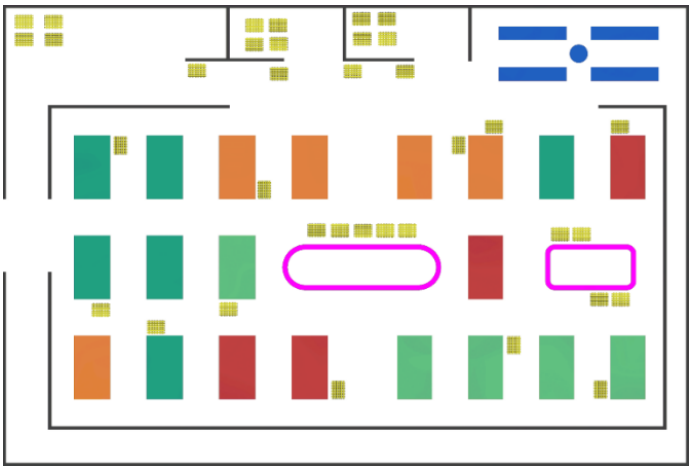


Figura 3. Vista de planta de un almacén.

Posteriormente, se calcula la varianza entre clases y se identifica el valor T que maximiza dicha varianza.

Finalmente, la imagen se convierte en binaria al asignar el valor cero (negro) a los píxeles menores o iguales a T, y el valor uno (blanco) a los píxeles mayores a T. La imagen binaria se transforma en un mapa de ocupación, en el cual cada píxel contiene un valor probabilístico (p) en el rango de cero a uno. El valor de esta probabilidad se indica mediante el color de las celdas del mapa, tomando el valor de $(p = 1)$ para las regiones blancas y $(p = 0)$ para las regiones negras, tal como se muestra en la Figura 4, existen otros casos que no se aborda en este trabajo, en la que el valor de probabilidad considera valores intermedios entre 0 y 1.

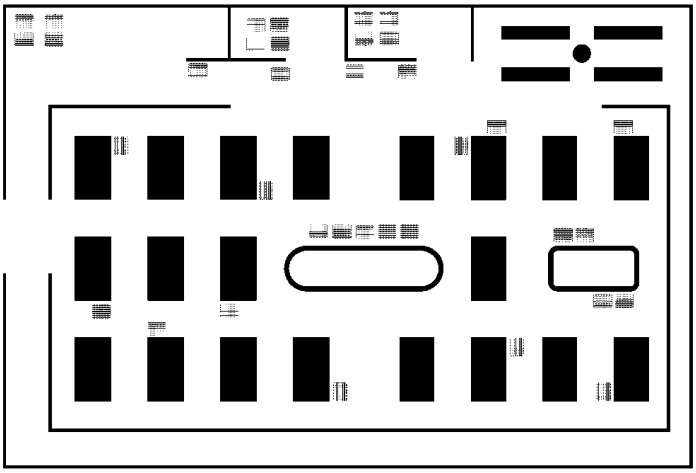


Figura 4. Mapa de ocupación del almacén.

Un paso importante, antes de proceder con la planificación de trayectorias en los mapas de ocupación, es efectuar la expansión de las áreas ocupadas por obstáculos en un determinado porcentaje, con el fin de mejorar la seguridad en la navegación. La finalidad principal de esta expansión es evitar colisiones al aumentar el tamaño de los obstáculos en el mapa, teniendo en cuenta las dimensiones del robot y proporcionando un margen de seguridad.

Esta práctica es especialmente beneficiosa en contextos donde la precisión en la localización y percepción puede estar comprometida por errores en los sensores. La expansión generalmente se implementa mediante una operación de

dilatación morfológica en la imagen binaria del mapa de ocupación, y consiste en convertir un radio de inflación definido en metros a unidades de celdas del mapa, para luego expandir las áreas ocupadas de manera proporcional.

La expansión de los obstáculos es esencial en la planificación de trayectorias, ya que permite a algoritmos como $A*$ ($A\ estrella$), Dijkstra (El algoritmo de **Dijkstra** recibe su nombre en honor a su creador, **Edsger W. Dijkstra**, un científico de la computación neerlandés.), RRT (Rapidly-exploring Random Tree por sus sigla en inglés) o PRM (Probabilistic Roadmap Method por sus siglas en inglés) evitar la generación de trayectorias que se aproximen demasiado a los obstáculos, disminuyendo así, el riesgo de colisiones y mejorando la viabilidad de la navegación autónoma. La tabla 1 presenta con fines de comparación los diferentes algoritmos de planificación de trayectorias utilizados en la navegación autónoma de robots móviles:

Tabla 1. Comparación de algoritmos para planeación de trayectorias.

Algoritmo	Tipo de búsqueda	Ventajas	Desventajas
A*	Informada, basada en heurística	Encuentra rutas óptimas rápido si la heurística es buena	Puede ser costoso en grafos grandes
Dijkstra	No informada, costo uniforme	Encuentra rutas óptimas y funciona con cualquier grafo	Ineficiente sin heurística
RRT	Aleatoria, exploración rápida	Funciona bien en espacios grandes y con obstáculos	No garantiza la mejor solución
PRM	Aleatoria, basada en grafos	Eficiente para múltiples consultas en el mismo entorno	Puede ser ineficiente en entornos dinámicos

La expansión del mapa asegura que la ruta planificada disponga de espacio suficiente para que el robot se desplace sin riesgo de impacto, lo cual contribuye a una navegación más segura y eficiente en entornos dinámicos o con incertidumbre en la percepción.

Tras la obtención del mapa de ocupación expandido del almacén del entorno de estudio, se procede a aplicar el algoritmo $A*$, especificando los puntos de inicio y destino en el mapa. La trayectoria generada se exhibe en la Figura~5 ya en el contexto del mapa original, previo a la expansión, desde el punto de inicio y hasta el punto de llegada, evitando con éxito los obstáculos existentes en el mapa de ocupación original.

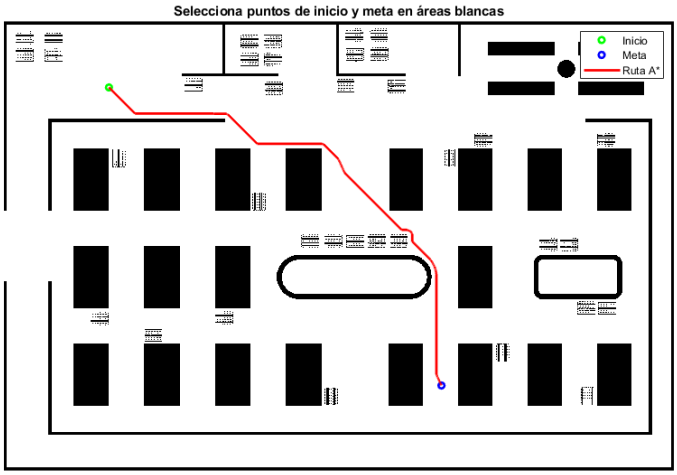


Figura 5. Trayectoria del robot en el mapa de ocupación.

Es pertinente señalar que la trayectoria de desplazamiento del robot mostrada en la Figura 5, aún no incorpora consideraciones cinemáticas del robot; únicamente describe el camino que debe seguir el robot para realizar la misión de trasladarse de un punto de inicio a un punto objetivo.

Resultados.

Los resultados obtenidos en la investigación han evidenciado la eficacia del método en contextos estructurados, logrando generar rutas óptimas en términos de distancia mientras evita obstáculos con eficiencia. Al comparar con otros métodos de planificación de rutas, el algoritmo $A*$ presenta ventajas considerables sobre Dijkstra, pues incorpora heurísticas que disminuyen la cantidad de nodos explorados, al tiempo que asegura soluciones óptimas en la mayoría de los escenarios. En contraste con RRT, que es más idóneo para ambientes dinámicos con alto índice de incertidumbre, $A*$ proporciona trayectorias óptimas en mapas estáticos y claramente definidos. No obstante, al compararse con métodos fundamentados en potenciales artificiales, $A*$ previene los inconvenientes de mínimos locales, aunque esto exige un mayor esfuerzo computacional para el cálculo de rutas a nivel global.

El algoritmo $A*$ en combinación con un mapa de ocupación faculta una navegación eficiente en ambientes controlados, ofreciendo garantías de optimalidad y una facilidad de implementación con representaciones fundamentadas en cuadrículas o grafos. Sin embargo, exhibe limitaciones en espacios de gran escala debido a su elevado costo computacional, así como en entornos dinámicos, donde la necesidad de recalcular la trayectoria desde el inicio disminuye la eficiencia en tiempo real. Adicionalmente, no toma en consideración restricciones cinemáticas tales como el radio de giro o la aceleración máxima, lo que podría afectar su aplicabilidad en ciertos tipos de robots.

Conclusiones.

La planificación de trayectorias es aplicable y adecuada para diversos mapas de ocupación mediante la implementación del algoritmo $A*$ y sus diversas variantes. Por consiguiente, los resultados de este estudio son pertinentes para la navegación de robots autónomos, proporcionando la base necesaria para que estos sistemas operen sin colisiones con obstáculos estáticos, asegurando así un desplazamiento eficiente de los robots móviles en un entorno de almacén.

Para trabajos futuros se requiere la integración de algoritmos más eficientes, dado que la evasión de obstáculos en tiempo real exige la planificación de trayectorias dinámicas, lo que implica un mayor esfuerzo computacional. Esto podría inducir una latencia incompatible con los estándares de seguridad necesarios para la navegación de robots en entornos dinámicos, particularmente en escenarios donde hay interacción de robots móviles con personal humano. Asimismo, se tiene previsto incorporar en el cumplimiento de la trayectoria planificada la cinemática del robot, la cual, sin duda, añadirá un significativo nivel de complejidad al trazo y seguimiento de la trayectoria, ya que esta cinemática presenta restricciones de desplazamiento sobre el entorno de trabajo.

Aportaciones.

El presente trabajo se inscribe dentro de un proyecto orientado hacia la navegación autónoma de un robot móvil para uso en almacenes. El objetivo general consiste en desarrollar un algoritmo de navegación autónoma a través de un enfoque que combine técnicas de aprendizaje profundo por refuerzo basado en modelos. Este algoritmo debe ser capaz de aprender a seguir trayectorias, ejecutar tareas de navegación y evadir obstáculos tanto fijos como móviles en entornos dinámicos y específicamente en un contexto de almacén. Entre los objetivos específicos se encuentra la adaptación de un algoritmo para la generación de trayectorias en el sistema de navegación del robot móvil, con el fin de optimizar la eficiencia en la planificación y seguimiento de dichas trayectorias. Este trabajo pretende explorar el algoritmo $A*$ y sus diversas modificaciones, utilizándolos como base para su implementación en el proyecto.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por brindar los espacios y la infraestructura para la obtención de los resultados, que redunda en beneficio de los programas de posgrado del Instituto.

Referencias bibliográficas.

Aramayo Monrroy, E. R. (2017). Búsqueda de caminos en aplicaciones robóticas, Bachelor's thesis, Universitat Politécnica de Catalunya).

Guillén Matos, S. S. (2021), "Diseño conceptual de un robot móvil para optimizar el proceso de picking en el almacén de una empresa", Bachelor's thesis, Pontificia Universidad Católica de Perú 'Facultad de ciencias e ingeniería.

Moshayedi, A. J., Jinsong, L, & Liao, L. (2019). AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance. Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, 12(4), 5-18.

Otsu, N. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. Automatica, 11(285-296), 23-27.

Xu, X., Xu, S., Jin, L., & Song, E. (2011). Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. Pattern recognition letters, 32(7), 956-961.

Información de los autores.

José Ángel Zepeda Hernández. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, profesor del área de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y actualmente estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el mismo Instituto. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2014. Sus intereses de investigación incluyen la robótica móvil, control inteligente y el aprendizaje profundo por refuerzo.

Ildeberto de los Santos Ruiz. Doctor en Automática, Robótica y Visión (2021) por la Universidad Politécnica de Cataluña, en España. Es profesor investigador a tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 1995. El doctor Santos-Ruiz es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, Nivel I. Sus intereses científicos incluyen control inteligente y diagnóstico de fallas en robótica móvil y en redes de distribución de agua.

Osbaldo Ysaac García Ramos, Ingeniero en Electrónica, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. académico del Departamento de Eléctrica-Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. profesor con perfil deseable PRODEP. Ha desarrollado proyectos de investigación financiados por CONACyT y empresas privadas. Cuenta con la certificación de Diseñador mecánico CSWA, CSWP, CSWP Avanzado por la empresa SolidWorks. Con campos de interés en: Automatización de procesos, Industry 4.0, Tecnologías CAD-CAM-CAE, Instrumentación y control.

Fernando Rafael Martínez Algarín. Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica. Su especialización se centra en robótica móvil y algoritmos de localización.

Planificador inteligente preliminar basado en PDDL para ensamble de piezas a nivel industrial.

PDDL based preliminary intelligent planner for industrial-level parts assembly.

Arturo Fernando Cruz Reyes (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
L20270798@tuxtla.tecnm.mx.

Guillen Meza Mauricio Antonio (2). Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
L20270281@tuxtla.tecnm.mx.

Héctor Guerra Crespo* (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. hector.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Luis Tomás García Andrade (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
luis.ga1@tuxtla.tecnm.mx.

Néstor Antonio Morales Navarro (5), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
nestor.mn@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 26, 2025; aceptado en diciembre 05, 2025.

Resumen.

Este documento presenta el desarrollo preliminar de un planificador inteligente basado en PDDL para automatizar la secuencia de ensamblaje de piezas en un entorno industrial. La planificación automática, como rama de la inteligencia artificial, permite generar planes que transforman un estado inicial en uno objetivo mediante acciones formalmente definidas. El proyecto toma como caso de estudio la planta Yazaki Tuxtla 2, dedicada a la manufactura de arneses automotrices, donde la complejidad operativa justifica la necesidad de un planificador formal. El método incluye la definición de requisitos, modelado en PDDL, validación conceptual y pruebas en el entorno editor.planning.domains. El dominio modela una línea de producción con cuatro etapas: cortar, taladrar, pulir y empacar, cada una representada mediante predicados, precondiciones y efectos en estilo STRIPS. Se especifica un ejemplo completo con estado inicial, objetivo y el plan óptimo generado. El trabajo demuestra que PDDL es capaz de representar secuencias industriales reales y constituye la base para futuras implementaciones de planificación integral en líneas de producción automotriz.

Palabras claves: Industria, PDDL, planificación.

Abstract.

This document presents the preliminary development of an intelligent planner based on PDDL to automate the assembly sequence of parts in an industrial environment. Automatic planning, as a branch of artificial intelligence, allows for the generation of plans that transform an initial state into a target state through formally defined actions. The project uses the Yazaki Tuxtla 2 plant, dedicated to the manufacture of automotive wiring harnesses, as a case study, where operational complexity justifies the need for a formal planner. The method includes requirements

definition, PDDL modeling, conceptual validation, and testing in the editor.planning.domains environment. The domain models a production line with four stages: cutting, drilling, polishing, and packaging, each represented by predicates, preconditions, and effects in the STRIPS style. A complete example is specified with the initial state, target state, and the generated optimal plan. This work demonstrates that PDDL is capable of representing real industrial sequences and provides a foundation for future implementations of comprehensive planning in automotive production lines.

Keywords: Industry, PDDL, planning.

1. Introducción.

La planificación automática constituye una disciplina central dentro de la inteligencia artificial que se ocupa de generar secuencias de acciones (planes) que permiten a un agente alcanzar objetivos deseados bajo restricciones temporales, de recursos y operativas. Desde sus orígenes, la comunidad de planificación ha trabajado en la formalización de lenguajes y modelos que permitan describir dominios y problemas de forma independiente del algoritmo, facilitando la comparación, validación y transferencia de soluciones entre contextos aplicados.

Dentro de la planificación automática el lenguaje de definición de dominios en planificación (PDDL, Planning Domain Definition Language) surgió como estándar para describir dominios y problemas de planificación, y sus sucesivas versiones (por ejemplo PDDL 2.1) añadieron soporte para fenómenos temporales y recursos numéricos, elementos esenciales para modelar procesos industriales reales (McDermott D. et al, 1998).

En el ámbito industrial, en particular industria automotriz, la planificación automática juega un papel crítico en tareas como secuenciación de operaciones, asignación de recursos, replanteo on-the-fly ante fallos de línea y coordinación de vehículos y manipuladores. La complejidad de las líneas de producción automotriz (multiple estaciones, restricción de herramientas, tiempos de acoplamiento, y requisitos de calidad) exige representaciones que capten duración de acciones, recursos numéricos y condiciones continuas; por ello, extensiones del lenguaje PDDL que permiten durativas y expresiones numéricas han sido empleadas para acercar la planificación académica a problemas industriales. (Fox M., 2003):

El desarrollo de este documento se inspira en el trabajo que realiza la planta Yazaki Tuxtla 2 (figura 2), dedicada a la manufactura de arneses automotrices (figura 1).

Figura 1. Arnés eléctrico para vehículos híbridos y eléctricos de las marcas GM y Subaru. Fuente sitio web empresa japonesa Yazaki. Recuperado diciembre 2024.

Figura 2. Planta Yazaki Tuxtla 2. Fotografia diciembre 2024.

La planta cuenta con 6 líneas de producción.
Línea modelo. Estandariza la fabricación del arnés. Esta lìnea es la piloto en el desarrollo de este trabajo.
Cada línea cuenta con 4 estaciones subensamble, direccionado, encintado y línea final.
Cada línea tienen entre 12 y 20 estaciones de subensambles dependiendo de la complejidad del arnés.

2. Métodos.

En esta etapa del desarrollo el propósito es desarrollar la parte del planificador que contenga al menos la secuencia de tres piezas que ilustre el potencial para implementar de manera real una línea completa de producciòn.

1. Análisis de Requisitos.
   Definir el componente inicial (pieza) del planificador
   Establecer los recursos necesarios: herramientas, componentes, estaciones de ensamblaje.
   Incorporar restricciones de ensamblaje (ej. secuencia lógica, espacio físico, tiempo de operación).
   Considerar restricciones de seguridad.
   Determinar la tecnología de implementación.

2. Modelo PDDL del planificador, pieza inicial del ensamblaje.
   Definir estado inicial
   Definir estado final
   Acciones (parámetros, precondiciones, efectos)

3. Validación preliminar del planificador
   Validar el modelo conceptualmente
   Validar el modelo en un editor PDDL
   Crear escenarios de prueba representativos de ensamblajes reales.
   Ajustar el modelo (acciones) de acuerdo a los escenarios.

Breve historia de la planificación automática.

Planificación concepto general.

La real academia española (RAE, 2025) define planificación como

1. Acción y efecto de planificar.
2. Plan general, metódicamente organizado y frecuentemente de gran amplitud, para obtener un objetivo deter minado, tal como el desarrollo armónico de una ciudad, el desarrollo económico, la investigación científica, el funcionamiento de una industria, etc.

Planificacion automática como rama de la inteligencia artificial se dedica a la generación de secuencias de acciones (planes) que transforman un estado inicial en uno o varios estados objetivo, teniendo en cuenta las restricciones del dominio y los efectos de las acciones. La planificación produce deliberadamente planes antes de su ejecución o durante la ejecución cuando es necesario replantearlos, lo que la hace esencial para sistemas autónomos, robótica, logística y optimización de procesos industriales (Ghallab, 2004).

General Problem Solver (GPS).

Se reconoce como el primer planificador y uno de los primeros programas del área de Inteligencia Artificial desarrollado por Newell y Simon en 1959 (Newell y Simon, 1959). El programa se llamó General Problem Solver (GPS) basado en la técnica means–ends analysis es un método heurístico que consiste en:

- Comparar el estado actual con el estado meta.
- Identificar las diferencias entre ambos.
- Seleccionar una operación (medio) que reduzca alguna diferencia (fin).
- Aplicar la operación para acercarse al objetivo.
- Repetir el proceso hasta alcanzar la meta.
- La técnica busca minimizar la diferencia entre el estado actual y el estado deseado paso a paso.

STRIPS.

Un salto importante en las técnicas de planificación fueron los STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver). Es uno de los modelos más influyentes en la historia de la planificación automática en inteligencia artificial. Fue desarrollado por Richard Fikes y Nils Nilsson en el SRI (Stanford Research Institute) a inicios de los años 1970 (Fikes y Nilsson, 1971).

STRIPS es un formalismo para describir problemas de planificación, es decir, para especificar:

- Estado inicial.
- Estado meta (objetivos).
- Acciones disponibles, cada una con:
- Precondiciones (lo que debe cumplirse para ejecutarla).
- Add list (efectos positivos: lo que añade al estado).
- Delete list (efectos negativos: lo que elimina del estado).

STRIPS se convirtió en el estándar para que los algoritmos de planificación puedan razonar y buscar planes.

STRIPS es importante porque introdujo ideas clave que definieron la planificación moderna como:

- Representación lógica de estados. Los estados se representan con predicados lógicos, lo que permite razonar formalmente.
- Efectos separados en add y delete lists lo que facilita la simulación de acciones y cálculo de estados sucesores.
- Precondiciones explícitas. Permite saber qué acciones son aplicables en un estado.
- Base del lenguaje moderno PDDL. El PDDL (Planning Domain Definition Language) usado hoy en competencias internacionales ICLP está basado directamente en STRIPS.
- Fundó la “planificación clásica”.

Graphplan.

A mediados de los 90 la planificación dió un salto importante con la introducción de Graphplan (Blum A. y Furst M., 1995), GraphPlan es un algoritmo de planificación automática que construye una estructura llamada grafo de planificación (planning graph) para encontrar planes eficientes de manera rápida.

Es importante por que.

- Es más rápido que los planificadores anteriores
- Introduce el uso de mutuas exclusiones (mutex). Sirven para evitar combinaciones imposibles.
- Combina expansión estructurada y búsqueda eficiente.
- Genera planes mínimos en número de pasos.
- Se convirtió en la base de muchos planificadores modernos.
- PDDL adoptó su filosofía y muchas aplicaciones de planificación usan variantes de GraphPlan.

PDDL, lenguaje de definición de dominios para planificación.

La planificación en Inteligencia Artificial por lo general utiliza un lenguaje de modelación llamado PDDL (Planning Domain Definition Language), en la actualidad prácticamente es el lenguaje estándar para la codificación de los dominios de planificación dado a conocer por Drew McDermott en la International Planning Competition (IPC) de 1998 (Mcdermott, 1998).

PDDL está basado en STRIPS y cuenta con las versiones 2.1 (2002), 2.2 (2004), 3.0 (2006) hasta la actual 3.1 y última versión de 2011.

International Planning Competition (IPC).

La IPC (ICAPS, 2025) es una competencia académica internacional, organizada por la comunidad de planificación automática, que reúne a investigadores de todo el mundo para evaluar planificadores (planners) usando un conjunto estandarizado de dominios y problemas expresados en PDDL.

Se realiza aproximadamente cada dos años y está vinculada con el congreso ICAPS (International Conference on Automated Planning and Scheduling).

Objetivos principales de la IPC.

- Establecer un marco de evaluación común para comparar planificadores.
- Proveer métricas estandarizadas que permitan medir rendimiento.
- Evaluar eficiencia, escalabilidad, calidad del plan y tiempo de cómputo.
- Motivar el desarrollo de nuevos algoritmos y enfoques de planificación.
- Impulsar la evolución del lenguaje PDDL, que nació junto con la IPC.

3. Desarrollo.

La implementación del planificador preliminar es a través de la herramienta *editor.planning.domains* del proyecto Education.Planning.Domains (Education.Planning.Domains, 2025).

Etapas en la especificación del planificador.

1. Descripción del dominio.

El dominio considera una línea de producción donde cada pieza debe pasar por una secuencia de etapas o procesos

- Cortado.
- Taladrado.
- Pulido.
- Empacado.

Cada operación solo puede realizarse si la pieza está en el área correspondiente y no ha completado aún ese proceso.

Áreas/departamentos
- Cortar.
- Taladrar.
- Pulir.
- Empacar.

2. Predicados (Predicates).

Predicado	Significado
pieza(p)	p es una pieza industrial.
etapa(p,e)	La pieza p se encuentra lista para el proceso/etapa e.
cortado(p)	La pieza p está cortada.
taladrado(p)	La pieza p está taladrada.
pulido(p)	La pieza p está pulida.
empacado(p)	La pieza p está empacada.
libre(m)	La máquina está disponible.
area(p,a)	La pieza p está en un área específica.

p=pieza
e=etapa
m=máquina
a=área

3. Operadores STRIPS (Acciones).

A continuación se listan acciones STRIPS para cada proceso. Cada acción incluye: precondiciones, efectos (add y delete).

Acción 1: cortar_pieza
Action: cortar-pieza(?p)
Preconditions:
  pieza(?p)
  etapa(?p, cortado)
  area(?p, área-cortar)
  libre(máquina-cortar)
Add Effects:
  cortado(?p)
  etapa(?p, taladrado)
Delete Effects:
  etapa(?p, cortado)

Cortar pieza es el proceso inicial y sus precondiciones es que la pieza se encuente en el área de cortado y la máquina de cortar esté libre. Su efecto es que la pieza pase a a la etapa de taladrado y la pieza se defina como cortada.

Acción 2: taladrar_pieza
Action: taladrar-pieza(?p)
Preconditions:
pieza(?p)
cortado(?p)
etapa(?p, taladrado)
area(?p, área-taladrar)
libre(máquina-taladrar)
Add Effects:
taladrado(?p)
etapa(?p, pulido)
Delete Effects:
etapa(?p, taladrado)

Taladrar pieza es el segundo proceso y sus precondiciones es que la pieza se encuente en el área de taladrado, que este cortada y la máquina de taladrar esté libre. Su efecto es que la pieza pase a la etapa de pulido y la pieza se defina como taladrada.

Acción 3: pulir_pieza
Action: pulir-pieza(?p)
Preconditions:
pieza(?p)
taladrado(?p)
etapa(?p, pulido)
area(?p, área-pulir)
libre(maquina-pulir)
Add Effects:
pulido(?p)
etapa(?p, empacado)
Delete Effects:
etapa(?p, pulido)

Pulir pieza es el tercer proceso y sus precondiciones es que la pieza se encuente en el área de pulido, que este taladrada y la máquina de pulir esté libre. Su efecto es que la pieza pase a la etapa de empacado y la pieza se defina como pulida.

Acción 4: empacar_pieza
Action: empacar-pieza(?p)
Preconditions:
pieza(?p)
pulido(?p)
etapa(?p, empacar)
area(?p, área-empacar)
libre(máquina-empacar)
Add Effects:
empacado(?p)
Delete Effects:
etapa(?p, empacar)

Empacar pieza es el cuarto y último proceso y sus precondiciones es que la pieza se encuente en el área de empacar, que este pulida y la máquina de empacar esté libre. Su efecto es que la pieza se defina como empacada. Empacada significa que el proceso de fabricación ha concluido.

4. Estado inicial (Ejemplo).

pieza(p1)
etapa(p1, cortado)
area(p1, área-cortar)
libre(máquina-cortadora)
libre(máquina-taladrar)
libre(máquina-pulir)
libre(máquina-empacar)

5. Objetivo (Goal).

empacado(p1)

6. Secuencia de planificación esperada (Plan).

El plan óptimo STRIPS generado sería:
cortar-pieza(p1)
taladrar-pieza(p1)
pulir-pieza(p1)
empacar-pieza(p1)

Código PDDL del planificador.

```
(define (problem fabricar-pieza-1)
  (:domain piezas-industriales)

  (:objects
    p1 - pieza
    maquina-cortar maquina-taladrar maquina-pulir maquina-empacar - maquina
    area-cortar area-taladrar area-pulir area-empacar - area
  )

  (:init
    ;; Estados iniciales
    (etapa p1 cortar)
    (libre maquina-cortar)
    (libre maquina-taladrar)
    (libre maquina-pulir)
    (libre maquina-empacar)
  )

  (:goal
    (empacar p1)
  )
)


(define (domain piezas-industriales)
  (:requirements :strips :typing)
```

```
(:types pieza area maquina)

;; --------- PREDICADOS ------------------
(:predicates
  (area ?p - pieza ?a - area)
  (etapa ?p - pieza ?e - etapa)
  (cortar ?p - pieza)
  (taladrar ?p - pieza)
  (pulir ?p - pieza)
  (empacar ?p - pieza)
  (libre ?m - maquina)
)

;; --------- CONSTANTES DE ETAPAS ------------
(:constants cortar taladrar pulir empacar - etapa)

;; --------- ACCIONES -------------------------

(:action cortar-pieza
  :parameters (?p - pieza ?m - maquina)
  :precondition (and
    (etapa ?p cortar)
    (libre ?m)
  )
  :effect (and
    (cortar ?p)
    (etapa ?p taladrar)
    (not (etapa ?p cortar))
  )
)

(:action taladrar-pieza
  :parameters (?p - pieza ?m - maquina)
  :precondition (and
    (cortar ?p)
    (etapa ?p taladrar)
    (libre ?m)
  )
  :effect (and
    (taladrar ?p)
    (etapa ?p pulir)
    (not (etapa ?p taladrar))
  )
)

(:action pulir-pieza
  :parameters (?p - pieza ?m - maquina)
  :precondition (and
    (taladrar ?p)
    (etapa ?p pulir)
    (libre ?m)
  )
  :effect (and
    (pulir ?p)
```

```
      (etapa ?p empacar)
      (not (etapa ?p pulir))
    )
  )

  (:action empacar-pieza
    :parameters (?p - pieza ?m - maquina)
    :precondition (and
      (pulir ?p)
      (etapa ?p empacar)
      (libre ?m)
    )
    :effect (and
      (empacar ?p)
      (not (etapa ?p empacar))
    )
  )
)
```

Plan generado.

```
(cortar-pieza p1 maquina-empacar)
(taladrar-pieza p1 maquina-empacar)
(pulir-pieza p1 maquina-empacar)
(empacar-pieza p1 maquina-empacar)
```

Conclusiones.

Es relevante el potencial del uso de PDDL como herramienta para modelar y automatizar procesos industriales complejos. El estudio demuestra que, aun en su etapa preliminar, un planificador basado en PDDL puede representar de manera precisa la lógica operativa de una línea de producción, permitiendo generar planes óptimos y estructurados para el ensamblaje de piezas. La formalización de etapas como cortar, taladrar, pulir y empacar evidencia que los procesos industriales pueden descomponerse en acciones con precondiciones y efectos bien definidos, lo que facilita la validación, el análisis y la futura optimización del flujo de trabajo.

Asimismo, se confirma que las raíces conceptuales provenientes de STRIPS y la evolución del lenguaje PDDL proporcionan un marco robusto para el modelado de dominios industriales reales, incluso cuando existen restricciones de recursos, secuencias obligatorias y condiciones de seguridad. La implementación utilizando herramientas como editor.planning.domains muestra que los planificadores pueden integrarse con relativa facilidad en entornos educativos y de prototipado, permitiendo iteraciones rápidas y mejoras progresivas del modelo.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 21520.25-P “Planificador inteligente de ensamblaje industrial en electromovilidad automotriz implementado en lenguaje de definición de dominios (PDDL)”, de la convocatoria de apoyo a proyectos de desarrollo tecnológico e innovación 2025 y las facilidades del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Blum A. y Furst M. (1995). "Graphplan algorithm," 1995.

Education.Planning.Domains (2025). A central source for educational resources for planning domains, http://planning-domains-education.haz.ca/

Fikes y Nilsson (1971). "Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving," 1971.

Fox, M., & Long, D. (2003). PDDL2.1: An extension of PDDL for expressing temporal planning domains. Journal of Artificial Intelligence Research, 20, 61–124. https://doi.org/10.1613/jair.1129**.**

Ghallab, M., Nau, D., & Traverso, P. (2004). *Automated Planning: Theory and Practice*. Morgan Kaufmann. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080490519_A25022382/preview-9780080490519_A25022382.pdf.

ICAPS (2025). International Conference on Automated Planning and Scheduling, https://www.icaps-conference.org/.

McDermott, D., et al. (1998). PDDL — The Planning Domain Definition Language (AIPS-98 technical report). (Documento fundacional del lenguaje PDDL). https://www.cs.cmu.edu/~mmv/planning/readings/98aips-PDDL.pdf**.**

McDermott, D. M., (1998). The 1998 AI planning systems competition, AI ma-gazine, 2, pags. 35–55, 2000.

Newell y Simon (1959). "Report on a general problem-solving program," 1959.

Rae (2025). Real Academia Española. https://www.rae.es/.

Información de los autores.

Arturo Fernando Cruz Reyes, Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, realizó su tesis profesional con el proyecto llamado "Generación de rutas de aprendizaje basado en modelos de planificación de inteligencia artificial".

Mauricio Antonio Guillén Meza es estudiante/profesional de Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Se interesa por la programación, el análisis de sistemas, infraestructura y el desarrollo de soluciones tecnológicas, destacándose por su responsabilidad y aprendizaje constante.

Héctor Guerra Crespo es egresado del I. T. de Mérida (Yucatán, México) de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en 1994, es Doctor en Sistemas Computacionales por la Universidad del Sur (Chiapas, México) en 2011. Es profesor en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y en el área de Licenciatura en Sistemas Computacionales de la Universidad Autónoma de Chiapas, en ambas desde 1995.

Luis Tomás García Andrade, Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Administración de Redes y Telecomunicaciones por el Instituto de Estudios Superiores de Chiapas, Docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Néstor Antonio Morales Navarro es Doctor en Desarrollo Tecnológico. Docente del departamento de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Jefe del departamento del Centro de Cómputo del Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel Candidato. Se especializa en el área de Visión e Inteligencia Artificial.

Sistema de señalización para la optimización de tiempos en procesos de ensamblaje de arneses eléctricos en la industria autoelectromotriz.

Signaling system for optimizing times in electrical harness assembly processes in the automotive industry.

Anthony Yahir Pérez González (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
L20270816@tuxtla.tecnm.mx.

Luis Tomás García Andrade* (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
luis.ga1@tuxtla.tecnm.mx.

Héctor Guerra Crespo (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. hector.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Galdino Belisario Nango Solís (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
galdino.ns@tuxtla.tecnn.mx.

Aída Guillermina Cossío Martínez (5), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
aida.cm@tuxtla.tecnm.mx.

Ciclalli Cabrera García (6), Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, ciclalli.gc@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 10, 2025; aceptado en noviembre 28, 2025.

Resumen.

El artículo presenta el desarrollo e implementación del Cycle Time Measurement Bar (CTMB), un sistema de señalización visual diseñado para optimizar los tiempos de ciclo en los procesos de ensamblaje de arneses eléctricos en la planta Yazaki Tuxtla 2. La investigación identifica como problemática central la falta de monitoreo en tiempo real, lo cual genera tiempos muertos, defectos y sobreproducción, afectando la eficiencia operativa. Para resolverlo, se diseña un sistema embebido basado en un Arduino Uno y tiras LED WS2812B, integrados con el controlador industrial CB100, permitiendo sincronizar el ciclo productivo y emitir alertas mediante cambios de color que indican el estado de cada operación. El estudio fundamenta su propuesta en principios de Lean Manufacturing, especialmente en el control visual y la reducción de las siete mudas, complementándolo con herramientas de planificación automática mediante PDDL, que permiten modelar secuencias de ensamblaje. La metodología empleada incluye análisis de requerimientos, diseño electrónico, programación, pruebas en campo y validación con personal especializado. Los resultados evidencian mejoras significativas en la supervisión del desempeño, reducción de desperdicios y toma de decisiones rápidas, demostrando que el CTMB constituye una solución tecnológica eficaz para incrementar la productividad y el control operacional en líneas de manufactura automatizada.

Palabras clave: Control visual, *Lean Manufacturing*, sistemas embebidos, tiempo de ciclo.

Abstract.

This paper presents the development and implementation of the Cycle Time Measurement Bar (CTMB), a visual signaling system designed to optimize cycle times in the electrical harness assembly processes at the Yazaki Tuxtla 2 plant. The research identifies the lack of real-time monitoring as the central problem, leading to downtime, defects, and overproduction, thus impacting operational efficiency. To address this, an embedded system based on an Arduino Uno and WS2812B LED strips was designed, integrated with the CB100 industrial controller. This system synchronizes the production cycle and issues alerts through color changes that indicate the status of each operation. The study bases its proposal on Lean Manufacturing principles, particularly visual control and the reduction of the seven wastes (muda), complemented by automated planning tools using PDDL, which allow for modeling assembly sequences. The methodology employed includes requirements analysis, electronic design, programming, field testing, and validation with specialized personnel. The results show significant improvements in performance monitoring, waste reduction, and rapid decision-making, demonstrating that CTMB is an effective technological solution for increasing productivity and operational control in automated manufacturing lines.

Keywords: Cycle time, embedded systems, lean manufacturing, visual control.

1. Introducción.

En los entornos industriales, el control adecuado de los tiempos de ciclo es fundamental para garantizar la eficiencia operativa, la calidad del producto y la estabilidad del flujo de producción. La ausencia de mecanismos de monitoreo en tiempo real puede generar tres problemáticas principales: tiempos muertos, defectos y sobreproducción, afectando de manera directa la productividad y los costos de operación.

En la planta Yazaki Tuxtla 2 (figura 2) (Yazaki, 2025), dedicada a la manufactura de arneses automotrices (figura 1), se identificó la necesidad de implementar un sistema visual que permitiera a operadores y supervisores conocer de manera inmediata el estado de cada ciclo productivo. Con este propósito se desarrolló el Cycle Time Measurement Bar (CTMB), un sistema embebido basado en un microcontrolador Arduino Uno y tiras LED direccionables WS2812B, diseñado para indicar mediante colores el estatus temporal de cada operación.

El sistema se integró al controlador industrial CB100, encargado del sistema de navegación de estaciones de trabajo, lo cual permitió sincronizar el ciclo productivo y proporcionar retroalimentación visual directa. Este artículo presenta el desarrollo del CTMB, la metodología empleada y los resultados obtenidos tras su instalación y validación en campo.

Figura 1. Arnés eléctrico para vehículos híbridos y eléctricos de las marcas GM y Subaru. Fuente sitio web empresa japonesa Yazaki. Recuperado diciembre 2024.

Figura 2. Planta Yazaki Tuxtla 2. fotografía diciembre 2024.

Yazaki Tuxtla 2, también conocida como ARNECOM S.A. de C.V. Planta Tuxtla Gutiérrez 2, es una instalación de la multinacional japonesa Yazaki Corporation ubicada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Esta planta se especializa en la producción de arneses eléctricos y conectores para la industria automotriz, siendo parte de la red global de Yazaki, que opera en más de 40 países.

Yazaki es reconocida mundialmente por su liderazgo en la investigación, desarrollo y suministro de soluciones de energía y datos para vehículos. Sus productos incluyen sistemas de distribución eléctrica, conectores, componentes electrónicos y servicios de ensamble, abasteciendo a fabricantes de automóviles tanto en México como en el extranjero. La planta forma parte de las siete instalaciones que Yazaki tiene en el estado de Chiapas, consolidando su presencia en la región y contribuyendo significativamente al desarrollo económico local mediante la generación de empleos y la atracción de inversiones.

En el momento del desarrollo del proyecto la empresa japonesa esta dedicada a la fabricación de arneses automotrices para las marcas Subaru y GM.

Actualmente se quiere hacer mejoras en las líneas de producción, las cuales servirán para aumentar la producción de arneses en líneas específicas, para ello se llevan a cabo varios análisis y estudios para tener un equilibrio entre cumplimiento y eficiencia.

La toma de tiempos y evaluación del desempeño de los operadores es una de las actividades que se hacen con frecuencia para ver el rendimiento que está teniendo las líneas de producción, esta actividad la realizan diversos departamentos de acuerdo con sus necesidades, pero uno de los problemas que existe es que se pueden realizar más de una vez la toma de tiempos en una línea, esto quiere decir que es trabajo nuevamente realizado, este problemas existe al no tener buena comunicación entre departamentos.

Yazaki al ser una empresa japonesa tiene conceptos y cultura de trabajo japones, una de ellas son las MUDA; Muda significa «desperdicio» en japonés. Es un concepto acuñado por el padre de la fabricación ajustada, Taiichi Ohno. Su objetivo era crear una forma de que las empresas eliminaran los residuos y mejoraran la eficiencia. (Nieto, 2019).

El desperdicio incluye todo lo que no añade valor ni proporciona beneficios, ya sea que cueste dinero, tiempo, materiales, mano de obra o espacio. Una empresa puede reducir el MUDA y aumentar su producción con la ayuda de herramientas como los eventos kaizen y los tableros kanban; que son formas de abordar sistemáticamente los problemas de uno en uno hasta deshacerse de todo el Muda. (Nieto, 2019).

Las siete mudas son:
1. Transporte.
2. Inventario.
3. Movimiento (movimiento sin productividad).
4. Espera
5. Sobreproducción.
6. Sobre procesos.
7. Defectos.

2. Métodos.

Tiempos de Ciclo.

El tiempo de ciclo es uno de los indicadores más importantes en los procesos de manufactura, ya que representa el tiempo total requerido para completar una operación o unidad de producción desde su inicio hasta su conclusión. Un control adecuado de los tiempos de ciclo permite equilibrar las líneas de producción, optimizar recursos, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia general del sistema productivo.

Las desviaciones en los tiempos de ciclo pueden ocasionar tiempos muertos, defectos en los productos o sobreproducción, generando impactos negativos en la productividad, costos operativos y calidad. Por ello, es fundamental implementar sistemas de monitoreo que permitan supervisar en tiempo real el desempeño de las estaciones de trabajo.

Lean Manufacturing y Control Visual.

El concepto de Lean Manufacturing propone estrategias para eliminar desperdicios (muda) dentro de los procesos de manufactura, buscando optimizar cada etapa de la producción. Dentro de sus herramientas se encuentra el control visual, que permite comunicar información operativa de manera rápida y clara mediante señales visibles, colores o indicadores luminosos.

Un sistema de control visual permite que los operadores, supervisores y personal de mantenimiento puedan detectar de inmediato cualquier desviación en los procesos sin necesidad de consultar reportes o pantallas de monitoreo, facilitando la toma de decisiones oportuna. La codificación por colores es una de las técnicas más utilizadas en este tipo de sistemas, debido a su simplicidad y efectividad.

Microcontroladores y Sistemas Embebidos.

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida en un solo chip. Su uso es común en sistemas embebidos, donde se requiere controlar procesos específicos de forma autónoma y económica.

En este proyecto se utiliza un Arduino Uno, microcontrolador basado en el chip ATmega328P, caracterizado por su facilidad de programación mediante el entorno Arduino IDE, múltiples pines de entrada y salida digitales, y compatibilidad con una gran variedad de sensores y actuadores.

Tiras LED WS2812B.

Las tiras WS2812B son dispositivos de iluminación basados en LEDs direccionables individualmente, lo que permite controlar de forma independiente el color y brillo de cada LED a través de una única línea de datos. Estos dispositivos son ampliamente utilizados en aplicaciones decorativas, señalización y sistemas de control visual en entornos industriales y de entretenimiento.

Gracias a la librería Adafruit NeoPixel, disponible para el entorno Arduino, es posible programar secuencias de color y animaciones personalizadas, lo que permite utilizar estas tiras como indicadores visuales de estado en sistemas de supervisión industrial.

Como parte de este trabajo se está modelando la secuenciación de señalizaciones de manera sincronizada en la línea de producción a través de planificación PDDL. PDLL son las siglas en inglés de Planning Domain Definition Languaje, en español Lenguaje de Dominios para Planificación (McDermott D. et al, 1998). PDDL es un área de la Planificación automática (Ghallab, 2004) la cual a su vez es una rama de la inteligencia artificial, rama equivalente a aprendizaje representado por modelos como Machine learning que contiene a las redes neuronales o lenguaje naural o visión por computadora.

Modelo de dominio: Incluye la definición de acciones, predicados y restricciones que describen el comportamiento del sistema, este modelo está basado en la lógica de predicados de las matemáticas discretas. Este esquema permite definir secuencias versátiles de ensamblaje industrial basado en la independencia de cada pieza para componer a su vez otras piezas. Cada pieza establece sus reglas (precondiciones, parámetros, dominio, basado en lógica de predicados) para componer otras piezas (efectos, metas, salidas) y a su vez piezas necesarias para su construcción (precondiciones, entradas), con estos elementos dominio, entrada y salida se puede construir un planificador inteligente robusto que indique la secuencia de ensamble adaptable a cualquier combinación de piezas involucradas.

3. Desarrollo.

Para el desarrollo del sistema Cycle Time Measurement Bar (CTMB) se aplica una metodología basada en el modelo de prototipado rápido, seleccionada por su flexibilidad para validar en campo versiones funcionales tempranas del sistema y realizar iteraciones ágiles sobre su diseño y programación. Este enfoque permite adaptar el funcionamiento del CTMB a los requerimientos dinámicos de producción, minimizando riesgos y optimizando tiempos de implementación.

El proceso metodológico se divide en cinco etapas:

Análisis de requerimientos: Se identifican los tiempos de ciclo en las líneas de producción, los puntos de interacción del operador y las necesidades de retroalimentación visual. Se determina también la necesidad de integrar el CTMB con el controlador CB100, encargado de gestionar el sistema de navegación que sincroniza y coordina las estaciones de trabajo de las áreas como subensamble y línea final.

Diseño del sistema: Se seleccionan los componentes electrónicos: microcontrolador Arduino Uno, tiras LED WS2812B, eliminador de voltaje de 5V 1A, cables calibre 22, . Se define la lógica de interacción entre el Arduino, la barra LED y el controlador CB100, mediante señales analógicas que permiten a este último accionar y reinicia cada ciclo y ajustar los parámetros del sistema de navegación en función del avance operativo.

Desarrollo del código: Se programa el Arduino utilizando Arduino IDE y la librería Adafruit NeoPixel, estructurando funciones específicas para el control de los LEDs, registro de eventos de inicio/término de ciclo y comunicación con el controlador CB100 a través de señales de salida configuradas en los pines analógicos.

Pruebas funcionales y ajustes: Se realizan pruebas en las áreas de SubEnsamble y Línea Final, verificando el comportamiento de las secuencias de color, la precisión en el conteo de tiempos y la correcta interacción entre el CTMB y el controlador CB100. Se registran los resultados y se efectúan los ajustes necesarios en los parámetros de tiempo y configuraciones eléctricas.

Documentación y validación: Se elaboran diagramas de conexión, manual de operación, se valida formalmente el funcionamiento del sistema con supervisores de producción y personal técnico de planta.

El sistema CTMB se programa a través de un microcontrolador Arduino Uno, al cual se conectan tiras LED WS2812B dispuestas en barra, y una señal tomada del CB100 que permiten al operador iniciar y reiniciar el conteo de tiempo de cada ciclo. La programación se desarrolla en Arduino IDE, utilizando estructuras de control y funciones personalizadas para definir las condiciones de cambio de color y tiempos límite.

Además, se configura una señal digital de salida en el Arduino que se conecta al controlador CB100, encargado de gestionar el sistema de navegación, el cual controla la secuencia de trabajo de las estaciones de S/E y la lógica de producción sincronizada.

```
// Función para encendido de los LEDs
void realizarAccion() {
reiniciar:
  apagarLeds(); // Apagar todos los LEDs antes de reiniciar

  for (int i = 0; i < 11; i++) {        // Color verde
    pixels.setPixelColor(i, 0, 3, 0);
    pixels.show();
    delay(delayval);
    valorLeido = analogRead(pinAnalogico);
    voltaje = (valorLeido * 5.0) / 1023.0;
    LecturaVol();
  }

  for (int i = 11; i < 22; i++) {      // Color verde claro
    pixels.setPixelColor(i, 2, 5, 0);
    pixels.show();
    delay(delayval);
    valorLeido = analogRead(pinAnalogico);
    voltaje = (valorLeido * 5.0) / 1023.0;
    LecturaVol();
  }

  for (int i = 22; i < 33; i++) {      // Amarillo
    pixels.setPixelColor(i, 3, 3, 0);
    pixels.show();
    delay(delayval);
    valorLeido = analogRead(pinAnalogico);
    voltaje = (valorLeido * 5.0) / 1023.0;
    LecturaVol();
  }
```

Figura 3. Código de administración del color. Fragmento que define el cambio de color en la barra LED y activa la señal analógica que envía el CB100.

Figura 4. Visualización del sistema CTMB instalado en una estación de Sub-Ensamble, conectado al Arduino y al controlador CB100.

Uso del sistema: El operador realiza el escaneo de su etiqueta KANBAN la cual acciona el sistema de navegación, encendiendo la barra LED en color verde. Conforme avanza el tiempo, la barra cambia a verde claro, seguido del color amarillo, finalmente a rojo y si se excede el tiempo establecido toda la barra LED parpadeara en rojo.

Al finalizar el ciclo, el operador nuevamente realiza el escaneo de su etiqueta KANBAN y la barra se reinicia, realizando así un nuevo ciclo. Esto permite supervisar de forma visual y en tiempo real la eficiencia de cada estación de trabajo y sincronizar el flujo productivo de manera automática mediante la interacción con el CB100.

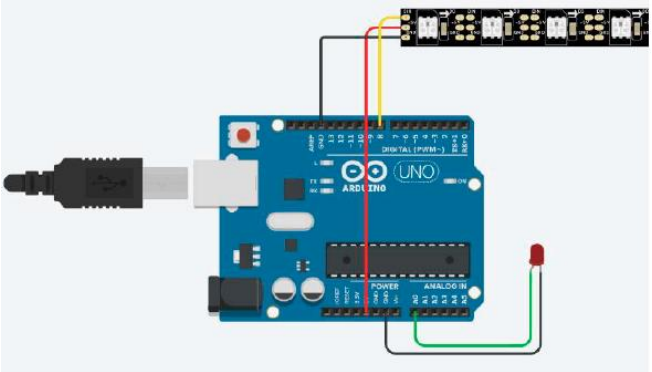


Figura 5. Esquema que muestra la conexión entre eliminador de Voltaje, Arduino, barra LED, y LED controlado por CB100.

Conclusiones.

La implementación del Cycle Time Measurement Bar (CTMB) en las líneas de producción resultó ser una solución eficaz para supervisar y controlar los tiempos de ciclo en tiempo real, proporcionando una señalización visual clara y accesible para operadores, supervisores y personal de mantenimiento. Gracias a su funcionamiento mediante cambios de color preestablecidos en una barra de LED, se logró reducir los tiempos muertos, prevenir defectos por trabajos apresurados y evitar sobreproducción, mejorando así la eficiencia de las estaciones de trabajo. El proyecto cumplió con los objetivos planteados, desde el análisis de necesidades hasta la programación, instalación, pruebas y validación del sistema, generando documentación técnica que permitirá futuras modificaciones o ampliaciones.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 21570.25-P (“Sistema de señalización inteligente para la optimización de tiempos en procesos de ensamblaje de arneses eléctricos en la industria autoelectromotriz”), de la convocatoria de apoyo a proyectos de desarrollo tecnológico e innovación 2025 y las facilidades del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez para la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Ghallab, M., Nau, D., & Traverso, P. (2004). *Automated Planning: Theory and Practice*. Morgan Kaufmann. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080490519_A25022382/preview-9780080490519_A25022382.pdf

McDermott, D., et al. (1998). PDDL — The Planning Domain Definition Language (AIPS-98 technical report). (Documento fundacional del lenguaje PDDL). https://www.cs.cmu.edu/~mmv/planning/readings/98aips-PDDL.pdf**.**

Nieto (2019). *Lean Manufacturing: Revisión histórica.* Tesis. https://files.core.ac.uk/download/pdf/228073973.pdf

Yazaki (2025). Yazaky Global Site. https://www.yazaki-group.com/en/automobile/

Información de los autores.

Anthony Yahir Pérez González. Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), donde desarrolló como proyecto académico el Cycle Time Measurement Bar (CTMB), un sistema orientado a la medición y control de tiempos en líneas de producción mediante el uso de tecnologías electrónicas. Actualmente trabaja en Yazaki, donde se enfoca en la implementación de nuevas tecnologías para la mejora de procesos y la eficiencia operativa.

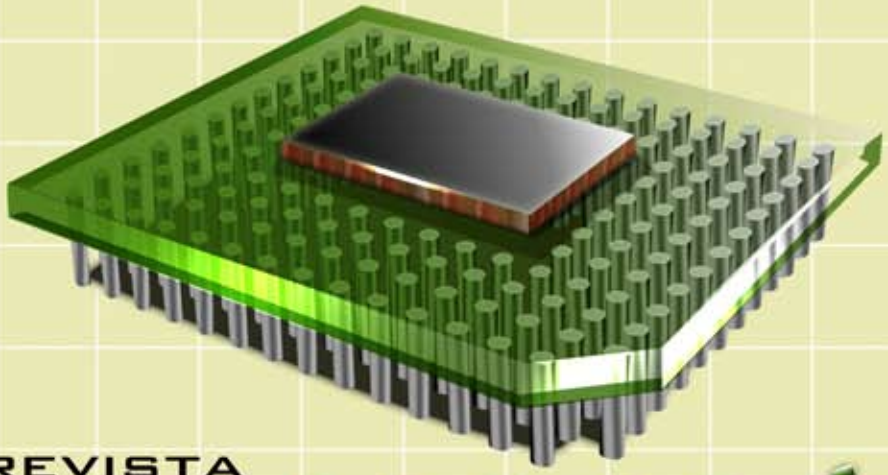
Luis Tomás García Andrade, Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Administración de Redes y Telecomunicaciones por el Instituto de Estudios Superiores de Chiapas, Docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Héctor Guerra Crespo es egresado del I. T. de Mérida (Yucatán, México) de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en 1994, es Doctor en Sistemas Computacionales por la Universidad del Sur (Chiapas, México) en 2011. Es profesor en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y en el área de Licenciatura en Sistemas Computacionales de la Universidad Autónoma de Chiapas, en ambas desde 1995.

Galdino Belizario Nango Solís es Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en 1996. Es Maestro en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, en 2001. Es Doctor en Desarrollo Tecnológico por la Universidad de Ciencia y Tecnología Descartes, en 2016. Es profesor en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde imparte clases en las materias de Programación Lógica y Funcional; y Lenguajes y Autómatas. Es profesor con perfil deseable PRODEP y miembro del Cuerpo Académico Tecnologías de la Información para el Desarrollo de Ventajas Competitivas en la LGAC Sistemas de Información desde 2022.

Aída Guillermina Cossío Martínez es Maestra en Ciencias en Administración por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2002. Es profesora de tiempo completo del área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, desde 1994. Se especializa en la formulación y evaluación de proyectos, así como el emprendimiento y desarrollo de planes de negocio, perfil deseable desde 2015 y trabaja en la línea de investigación Sistemas de Información, actualmente miembro del Cuerpo Académico Tecnología de Información para el Desarrollo de Ventajas Competitivas.

Ciclalli Cabrera García obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Aplicada en el 2020, el grado de Maestra en Tecnologías en Informática en el 2012, terminó la carrera de Licenciatura en Informática en 2008. Actualmente asesora proyectos académicos y en concursos académicos.



REVISTA

TECNOLOGÍA DIGITAL

www.revistatecnologiadigital.com