



RICT

Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

ISSN 2992-7315

Año 3 No. 5 enero-junio 2025

Edición Semestral volumen 3, número 5, enero-junio 2025

Investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación multidisciplinaria con impacto social para el desarrollo y la generación de soluciones a los problemas prioritarios en la salud, el medio ambiente, la seguridad, la educación y el bienestar en las organizaciones, la industria, la academia y la sociedad en general.



DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15062306>

ISSN 2992-7315



9 772992 731002

Volumen 3 – No. 5 – 2025

Semestral

ISSN: 2992-7315

Centro de Investigación Multidisciplinaria

Instituto de Innovación y Ciencias Aplicadas

Investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación multidisciplinaria con impacto social para el desarrollo y la generación de soluciones a los problemas prioritarios en la salud, el medio ambiente, la seguridad, la educación y el bienestar y la innovación en las organizaciones, la industria, la academia y la sociedad en general.

Comité Editorial

Leonardo Miguel Moreno Villalba

Editor en jefe

Tecnológico Nacional de México / TESE

lmoreno@tese.edu.mx

Francisco Jacob Ávila Camacho

Editor asociado

Tecnológico Nacional de México / TESE

fjacobavila@tese.edu.mx

Juan Manuel Stein Carrillo

Investigador

Tecnológico Nacional de México / TESE

jmsteinc@tese.edu.mx

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, año 3, No. 5, Enero – Junio 2025, es una Publicación semestral, indexada y arbitrada a doble ciego editada Leonardo Miguel Moreno Villalba. Av. Valle de Guadiana 59, Col. Valle de Aragón 3ª Sección, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55280, Tel. (+52) 720 460 0897, <https://rictrevista.org>, rictrevista@gmail.com. Editor responsable: Leonardo Miguel Moreno Villalba. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2023-072413552000-102, ISSN: 2992-7315, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número Leonardo Miguel Moreno Villalba, Av. Valle de Guadiana 59, Col. Valle de Aragón 3ª Sección, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55280, fecha de última modificación 8 de abril de 2025.

Directorio

Leonardo Miguel Moreno Villalba

Editor en Jefe (Editor-in-Chief)

<https://orcid.org/0000-0003-0937-3586>

Francisco Jacob Ávila Camacho

Editor Asociado (Associate Editor)

<https://orcid.org/0000-0002-0086-5827>

Consejo Editorial (Editorial Board)

Dr. Adolfo Melendez Ramírez

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

<https://orcid.org/0000-0002-4751-0089>

Dr. Genaro Iván Cerón Montes

Universidad Tecnológica de Tecamac

<https://orcid.org/0000-0002-1111-0307>

Dr. Juan Manuel Stein Carrillo

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

<https://orcid.org/0000-0003-3594-504X>

Dr. José Alberto Hernández Aguilar

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro

Tecnológico Nacional de México / TES Chimalhuacan

<https://orcid.org/0000-0003-3058-9082>

M. en ISC. Roberto Carlos Muñoz Celaya

Tecnológico Nacional de México / TES Coacalco

M. en C. Edgar Corona Organiche

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Comité Técnico Revisor (Reviewer Board)

Dra. Mercedes Flores Flores

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dra. Mercedes Flores Flores

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

M. en C. Edgar Corona Organiche

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dra. María Luisa Lozano Camargo

Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México

M. en ISC Samuel Efren Viñas Alvarez

Tecnológico Nacional de México / I.T. Zitácuaro

Dr. Leonardo Miguel Moreno Villalba

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dr. Juan Manuel Stein Carrillo

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dr. Adolfo Meléndez Ramírez

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Dr. Derlis Hernández Lara

Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

Contenido

Editorial	i
-----------------	---

Artículos de Revisión

1. **Aplicación ubicua: Una solución integral para la gestión y promoción de la SMITEIMYT y CIPIEITYR.**
Brenda Arteaga-Vázquez, Mónica Cervantes-Hernández, Edgar Corona-Organiche, Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro, Griselda Cortes-Barrera 1

Artículos de Investigación

2. **Análisis multitemporal de los índices vegetativos e hidrológicos del embalse de Chingaza.**
José Roncancio Barragan, Laura Mercedes Arteaga Rojas, Sergio González Gil 6
3. **Diseño mecatrónico frugal y ensamble de mano robótica usando manufactura aditiva.**
Erick Axel, Padilla García 14
4. **Diseño, manufactura y control de un péndulo invertido con volante inercial.**
Erick Axel Padilla García, Raúl Dalí Cruz Morales, Gonzalo Hedain López Mera, David Tinoco Varela 24
5. **Algoritmo para la detección de URL's maliciosas y legítimas utilizando máquinas de vectores de soporte (SVM).**
Dylan Alejandro Fernández Molina, Arturo Hernández Martínez, Jimena Meléndez Ramírez, Juan Manuel Stein Carrillo 32
6. **Cómputo heurístico para la medición de calidad de software según el modelo McCall de los productos de software en la empresa CDS, S.C.**
Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro, Griselda Cortés-Barrera, Edgar Corona-Organiche, Norma-Karen Valencia-Vázquez 40
7. **Identificación de Amenazas Zero-Day en Entornos Empresariales con Modelos de Aprendizaje Profundo**
Ana-Laura Barcenás-Medina, Alan-Jair Alcaraz-Cancio 46
8. **Desarrollo e Implementación de una interfaz hombre-máquina a un banco de pruebas empleado para la validación de métodos inversos de identificación de fallas en sistemas rotodinámicos**
Arturo Aguilar Pérez, Juan Manuel Orozco Rojas, Sergio G. Torres Cedillo, Jacinto Cortés Pérez, Mario R. Cruz Deviana, Alberto Reyes Solís, María de la Luz Delgadillo Torres 55

Aplicación ubicua: Una solución integral para la gestión y promoción de la SMITEIMYT y CIPIEITYR.

Ubiquitous application: A comprehensive solution for the management and promotion of SMITEIMYT and CIPIEITYR.

Brenda Arteaga-Vázquez ^a, Mónica Cervantes-Hernández ^a, Edgar Corona-Organiche ^b, Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro ^b,
Griselda Cortes-Barrera ^{b,c}

^a División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

^b Ingeniería en Sistemas Computacionales, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Estado de México

^c Laboratorio Nacional Conahcyt en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Estado de México, México

Resumen

El presente proyecto propone el desarrollo de una aplicación ubicua basada en software libre, cuyo objetivo principal es optimizar la gestión de información en la Sociedad SMITEIMYT y el Congreso CIPIEITYR. Esta solución innovadora busca contribuir al mejoramiento de los procesos de registro, actualización de actividades presenciales y en línea, así como facilitar la promoción y difusión de los eventos. Siguiendo la metodología ágil Scrum, el equipo de desarrollo logrará cumplir con los objetivos propuestos y entregar un producto de alta calidad. La aplicación ubicua generará beneficios significativos, como la reducción de tiempos en la consulta de registros gracias a su organización por categorías, el acceso ágil a la información, un manejo más eficiente de los datos, una búsqueda optimizada de registros, la promoción segmentada a grupos con intereses afines, y una gestión mejorada de las actividades programadas. Esta aplicación se presenta como una solución innovadora que incorpora nuevas tecnologías en el área de gestión de la sociedad y congreso, con el fin de alcanzar un máximo desarrollo y alcance. Al aprovechar las ventajas del software y la ubicuidad, se busca optimizar los procesos manejados y ofrecer una experiencia mejorada tanto para los organizadores como los participantes de estos eventos.

Palabras clave: Aplicación ubicua, Metodología scrum, optimización, gestión, desarrollo

Abstract

This project proposes the development of a ubiquitous application based on free software, whose main objective is to optimize the management of information in the SMITEIMYT Society and the CIPIEITYR Congress. This innovative solution seeks to contribute to the improvement of registration processes, updating of face-to-face and online activities, as well as facilitating the promotion and dissemination of events. Following the agile Scrum methodology, the development team will be able to meet the proposed objectives and deliver a high-quality product. The ubiquitous application will generate significant benefits, such as the reduction of time in the consultation of records thanks to its organization by categories, agile access to information, a more efficient handling of data, an optimized search for records, segmented promotion to groups with similar interests, and an improved management of scheduled activities. This application is presented as an innovative solution that incorporates new technologies in the area of society and congress management, in order to achieve maximum development and scope. By taking advantage of the advantages of software and ubiquity, the aim is to optimize the processes handled and offer an improved experience for both the organizers and the participants of these events.

Keywords: Ubiquitous application, Scrum methodology, automation, management, development, optimization.

*Autor para la correspondencia: aevb201920150@tese.edu.mx

Correo electrónico: aevb201920150@tese.edu.mx (Brenda Arteaga-Vázquez), cehm201921887@tese.edu.mx (Mónica Cervantes-Hernández), ecorona@tese.edu.mx (Edgar Corona-Organiche), ajimenez@tese.edu.mx (Abraham Jorge Jiménez-Alfaro), gcortes@tese.edu.mx (Griselda Cortes-Barrera).

1. Introducción

Este proyecto surge como una iniciativa estratégica impulsada por la Sociedad SMITEIMYT y el Congreso CIPIEITYR, con el objetivo principal de fortalecer su presencia digital y optimizar la gestión de información. En un mundo cada vez más interconectado y digitalizado, resulta crucial aprovechar las tecnologías emergentes para mejorar el acceso al vasto acervo científico-tecnológico que estas instituciones han acumulado a lo largo de los años.

Para lograr esto, se ha planteado el desarrollo de una aplicación ubicua innovadora que tendrá un impacto social al permitir a los miembros y el público en general acceder a recursos y contenidos desde cualquier lugar y dispositivo con conexión a Internet. Además, fomentará la participación y compromiso de la comunidad al facilitar una promoción y difusión segmentada de eventos a grupos con intereses afines. Desde el punto de vista económico, esta solución optimizará procesos y reducirá tiempos en la gestión de información, lo que puede traducirse en ahorros operativos, mientras que tecnológicamente implica la adopción de metodologías ágiles y la integración de diversas tecnologías punteras. En cuanto al impacto ambiental, al facilitar el acceso remoto podría reducirse la necesidad de desplazamientos físicos, disminuyendo la huella de carbono, aunque será necesario considerar medidas de eficiencia energética.

Se implementará también una base de datos integrada, diseñada específicamente para garantizar una gestión eficiente, segura y centralizada de la información. Esta base de datos permitirá almacenar, organizar y resguardar de manera óptima los datos relacionados con los miembros, eventos, publicaciones científicas, recursos educativos y todo el material valioso generado por la Sociedad y el Congreso.

2. Materiales y Método

En el proceso de creación de software, existen diversas metodologías que desempeñan un papel fundamental en guiar el desarrollo y alcanzar los resultados esperados. Para este proyecto, se seleccionó Scrum como el marco de trabajo ideal, ya que su enfoque iterativo e incremental permite evolucionar el desarrollo de software de manera ágil y adaptativa. Scrum facilita la interacción, estructura y gestión del trabajo a través de entregas parciales durante periodos de tiempo definidos, conocidos como Sprints.

Cada Sprint implica una inspección exhaustiva de los avances logrados, proporcionando un resultado completo y adaptado a las circunstancias únicas que puedan presentarse. Al completar exitosamente la planificación y ejecución de las tareas en cada Sprint, el proyecto se desarrolla de manera incremental, alineado con los objetivos y requisitos establecidos. En este artículo, se presenta la metodología Scrum y las tecnologías utilizadas para el desarrollo de la aplicación ubicua, las cuales son:

A. Metodología Scrum

La elección de la metodología adecuada para la gestión de proyectos es fundamental, considerando factores como el tiempo, tamaño y recursos disponibles. En este caso, se optó por Scrum, una metodología ágil y flexible diseñada para maximizar el retorno de la inversión en el desarrollo de software. Scrum se basa en construir primero la funcionalidad de mayor valor para el cliente y en principios clave como la inspección continua, adaptación, autogestión e innovación.

Scrum involucra un conjunto de trabajos grupales enfocados en alcanzar un objetivo común. Su singularidad radica en la forma en que interactúan los diferentes actores del proyecto, incluyendo líderes, miembros del equipo y usuarios finales. El proceso se divide en cuatro fases principales (ADP España, 2022) :

- 1) Planteamiento
- 2) Lista de tareas
- 3) Reuniones diarias de seguimiento
- 4) Demostración y retrospectiva

B. Visual Studio Code

Uno de los mejores editores de código más populares para el desarrollo tanto del front-end como del backend de las aplicaciones modernas. Este editor desarrollado por Microsoft permite integrar diversas herramientas y extensiones que facilitan la programación en diferentes entornos. Además, su característica de depuración en tiempo real y el control de versiones mediante Git contribuyen a un flujo de trabajo más eficiente y organizado (de Zúñiga, 2024).

C. Angular JS

Es un framework MVC (Modelo Vista Controlador), desarrollado por Google para el desarrollo web frontend, adopta el estándar de los componentes web, utilizando un conjunto de APIs que permiten crear etiquetas HTML personalizables y reutilizables.

Angular JS es 100% JavaScript, 100% del lado del cliente y compatible con navegadores de escritorio y móviles. Así que definitivamente no es un complemento o alguna otra extensión del navegador nativo. Angular brinda la vista dinámica que HTML, CSS o JavaScript que no puede dar a los usuarios (Angular, s.f.).

D. Ionic

Es un framework de código abierto para el desarrollo de aplicaciones móviles híbridas. Utiliza tecnologías web como HTML, CSS y JavaScript para crear aplicaciones nativas para iOS y Android. Con esto podemos crear la aplicación y que se ejecute en cualquier plataforma sin necesidad de reajustar todo a un tamaño (Cristancho, F, 2022).

E. Bootstrap

Es un framework que se encuentra compuesto por un conjunto de herramientas de código abierto para desarrollar con HTML, CSS y JS. Cubre el área front-end de desarrollo de aplicaciones web, se basa en el diseño responsive el cual

permite adaptabilidad tanto en ordenadores como dispositivos móviles, agiliza el desarrollo debido a que provee recursos prediseñados y no impide la implementación de otras plantillas CSS. Permite crear de forma sencilla webs de diseño adaptable, es decir, que se ajusten a cualquier dispositivo y tamaño de pantalla y siempre se vean igual de bien. Es Open Source o código abierto, por lo que se puede usar de forma gratuita y sin restricciones (Rock Content,2020).

F. Node.js

Es un entorno de ejecución de código abierto, multiplataforma y basado en el motor de JavaScript. permite la ejecución de JavaScript en el servidor, lenguaje antes limitado al lado del cliente. Este entorno del lado del servidor (basado en eventos) utiliza el motor V8 (desarrollado por google) para ejecutar JavaScript a gran velocidad. Esto último se debe a que V8 compila JavaScript en código de máquina nativo, en lugar de interpretarlo o ejecutarlo. Por diversas razones como su rapidez, ligereza, escalabilidad, además de ofrecer otras herramientas que ayudan al desarrollo, se utiliza este entorno para hacer la aplicación web (Acerca de Node.js, párr. 1).

G. Express.js

Infraestructura de aplicaciones web Node.js. Express es una infraestructura web rápida, minimalista y flexible para las aplicaciones Node.js. Ayuda a no comenzar necesariamente desde cero, como todo framework, sino que provee una infraestructura que permite agilizar el desarrollo de la aplicación web. (Glosario:Express,2017).

Express es propio de Node, por lo cual se posiciona como el primero en la lista de frameworks a usar, además provee plugins de alto rendimiento nombrados middleware. Middleware permite la interacción o comunicación entre aplicaciones, o bien entre la aplicación y otro software, red, hardware y/o sistema operativo (Jesus,2023).

H. phpMyAdmin

Es una aplicación web que sirve para administrar bases de datos MySQL de forma sencilla y con una interfaz amistosa. La ventaja de utilizarlo es que nos permite conectarnos con servidores remotos. Con phpMyAdmin podemos hacer todo tipo de operaciones, desde la creación y borrado de bases de datos a la administración de las tablas y por supuesto a los propios datos (de Zúñiga,2021).

I. Draw.io

Es un componente tecnológico de código abierto para la elaboración de aplicaciones de creación de diagramas y la aplicación de creación de diagramas para usuarios finales (Alder G. y Benson D. ,S.f.)



Ilustración 1 Vista página principal Congreso



Ilustración 2 Vista página principal de la Sociedad

Se presenta la primera vista de la Sociedad y del Congreso que esta disponible para todas las personas, en donde se encontrara el menú para dirigirlos a las secciones que quieran conocer.



Ilustración 3 Concurso del Congreso



Ilustración 4 Talleres de la Sociedad

En estas vistas se puede observar las actividades que se impartirán en cada una de las páginas y las personas se podrán registrar para poder acceder a ellas.



Ilustración 5 Pagina de Registro

- Ponencia
- Taller
- Cartel
- Concurso de programación
- Concurso de robótica

- Ponencia
- Taller
- Cartel
- Concurso de programación
- Concurso de robótica

En cada apartado se pide diferente información para poder aprobar su información y poder clasificarlos, para facilitar la gestión de los registros, esta información se esta optimizando en la base de datos.

La ilustración 6 presenta el diagrama de conexión que tiene la base de datos con las diferentes tablas creadas para poder tener una gestión de los registros que se podrán crear. La creación de esta base de datos tiene la funcionalidad de gestionar los registros dependiendo de la actividad que haya escogido el usuario, una vez aprobadas las personas que estarán dando las actividades o cursos se podrá tener un control de las salas, días y horario, que se estarán impartiendo estas actividades, esto ayudara a tener un mejor control de tiempos y un control de personas que participaran como oyentes.

También se realizó una tabla donde se puede observar el tipo de usuario que se podrá encontrar como es de Administrador, Revisor, Usuario y Evaluador, esto con el fin de que no todos los organizadores podrán tener los privilegios de ver e interactuar con la modificación o eliminación de los usuarios.

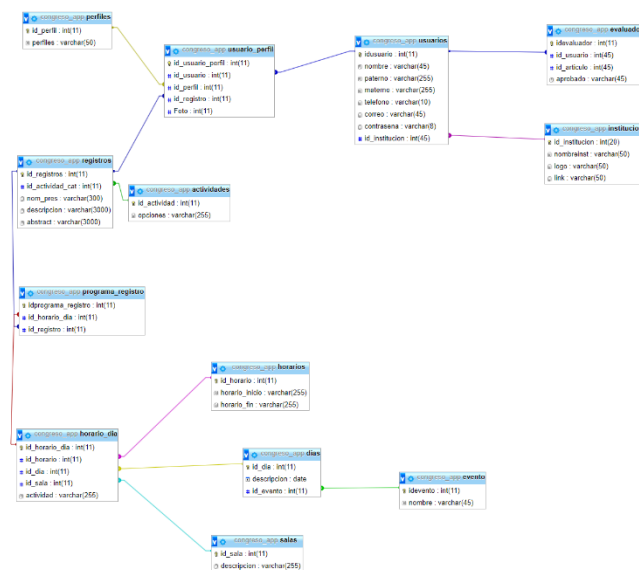


Ilustración 6 Diagrama de contenido sobre la Base de Datos

3. Estado del arte

En los últimos años, se ha evidenciado una creciente tendencia hacia la adopción de aplicaciones web y sistemas informáticos para optimizar la gestión de diversos procesos en diferentes sectores. Desde empresas comerciales hasta instituciones académicas y organizaciones gubernamentales, la implementación de soluciones tecnológicas ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia, la organización y el acceso a la información.

En el ámbito empresarial, varios autores han abordado el desarrollo de aplicaciones web para la gestión de procesos clave. Gómez Martínez (2019) propuso un sistema web para clínicas veterinarias, permitiendo la administración centralizada de servicios, comercio en línea y reservaciones. Por su parte, Hernández Berrones (2020) abordó el desarrollo de una aplicación web con el framework Bootstrap y el precompilador Sass para la gestión de pedidos de productos agrícolas, utilizando estándares de calidad para medir el comportamiento y los tiempos de respuesta de los procesos. Zurita Lara (2020) desarrolló un sistema web para la gestión académica y administrativa en una empresa de capacitación profesional, facilitando la administración de procesos educativos y la emisión de reportes.

Estas investigaciones resaltan la importancia de las aplicaciones web como herramientas para optimizar la gestión de información y procesos en diversos sectores. La implementación de estas soluciones ha permitido mejorar la eficiencia, reducir tiempos, centralizar datos, generar reportes, facilitar la toma de decisiones y brindar una mejor experiencia a los usuarios.

4. Resultados

El desarrollo de la aplicación ubicua y la implementación de la base de datos integrada han generado resultados satisfactorios en cuanto a la optimización de la gestión de

información y el fortalecimiento de la presencia digital de la Sociedad SMITEIMYT y el Congreso CIPIEITYR.

Uno de los principales logros ha sido la reducción significativa en los tiempos de consulta y acceso a los registros de miembros, eventos, publicaciones científicas y recursos educativos. Gracias a la organización por categorías y la estructura eficiente de la base de datos, la información se encuentra disponible de manera ágil y centralizada.

Además, el manejo de los datos se ha vuelto más eficiente, facilitando la búsqueda y recuperación de registros específicos. La aplicación ubicua, en conjunto con la base de datos integrada, ha permitido una gestión mejorada de las actividades programadas, tanto presenciales como en línea, optimizando la asignación de recursos y la coordinación de los eventos.

Otro resultado destacable es la capacidad de promover y difundir los eventos de manera segmentada a grupos con intereses afines.

5. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la implementación de la aplicación ubicua y la base de datos integrada en la Sociedad SMITEIMYT y el Congreso CIPIEITYR están demostrando ser prometedores y abren el camino hacia nuevas oportunidades y desafíos.

En primer lugar, es importante destacar que la adopción de la metodología Scrum está siendo clave para el éxito del proyecto. Su enfoque iterativo e incremental está permitiendo adaptarse a los cambios y requisitos emergentes durante el desarrollo, asegurando la entrega de un producto de alta calidad y alineado con las necesidades de los usuarios finales.

Uno de los aspectos más relevantes a discutir es el impacto positivo que está teniendo la solución en cuanto a la optimización de los procesos de gestión de información. La centralización de los datos y su organización por categorías están simplificando significativamente las tareas de consulta, actualización y mantenimiento de los registros, reduciendo los tiempos y aumentando la eficiencia.

Además, la capacidad de promover y difundir los eventos de manera segmentada a grupos con intereses afines está demostrando ser una herramienta poderosa para fomentar la participación y el compromiso de la comunidad. Esta funcionalidad podría explorarse aún más en el futuro, incorporando técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para una segmentación más precisa y personalizada.

Por otro lado, es importante reconocer que la implementación de una solución tecnológica de esta envergadura no está estando exenta de desafíos. La integración de diferentes tecnologías y componentes, como Visual Studio Code, Angular JS, Ionic, Bootstrap, Node.js, Express.js, phpMyAdmin y Draw.io, está requiriendo un esfuerzo significativo en términos de capacitación y coordinación del equipo de desarrollo.

Sin embargo, estos desafíos también están sentando las bases para futuras mejoras y ampliaciones del sistema. Por

ejemplo, se podría explorar la integración de funcionalidades adicionales, como herramientas de colaboración en tiempo real, videoconferencias y espacios virtuales para el intercambio de conocimientos y la presentación de trabajos científicos.

6. Conclusiones

El presente proyecto ha demostrado ser un éxito al lograr el objetivo principal de optimizar la gestión de información en la Sociedad SMITEIMYT y el Congreso CIPIEITYR mediante el desarrollo de una aplicación ubicua y la implementación de una base de datos integrada. Esta solución innovadora ha contribuido significativamente al mejoramiento de los procesos de registro, actualización de actividades presenciales y en línea, así como a la promoción y difusión de los eventos.

En el camino hacia la excelencia, es crucial mantener un enfoque en la escalabilidad, el rendimiento, la seguridad y la privacidad de los datos. Se deberán implementar estrategias de optimización, adoptar técnicas de protección de datos y cumplir con las regulaciones y normativas aplicables en materia de protección de datos.

7. Agradecimientos

Agradecemos a la Dra. Griselda Cortes Barrera por su dedicación a la enseñanza y la pasión que entrega a su trabajo, ha sido una excelente guía de apoyo para la elaboración de este proyecto compartiendo sus conocimientos y a esforzarnos a cada día a mejorar, y a la revista RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación por su apoyo de la publicación del manuscrito.

8. Referencias

- Alder, G., y Benson, D. (s.f.). Sobre Nosotros: Sitio Web draw.io. Disponible: Web draw.io: <https://about.draw.io/aboutus/>
- Angular. (s.f.). Preguntas Frecuentes: Angular. Disponible: Sitio Web Angular: <https://docs.angularjs.org/misc/faq#isangularjs-a-library-framework-plugin-or-a-browser-extension>
- Bootstrap: guía para principiantes de qué es, por qué y cómo usarlo. (2020, abril 12). Rock Content - ES; Rock Content. <https://rockcontent.com/es/blog/bootstrap/>
- Cómo aplicar la metodología Scrum y qué es el método Scrum. (2024, abril 9). APD España; APD. <https://www.apd.es/metodologia-scrum-que-es/>
- Cristancho, F. (2022, julio 28). ¿Qué es Ionic? Recuperado el 20 de mayo de 2024, de Talently Blog website: <https://talently.tech/blog/que-es-ionic/>
- de Zúñiga, F. G. (2021, noviembre 25). phpMyAdmin: ¿qué es y cómo usarlo? Blog de arsys.es; Arsys. <https://www.arsys.es/blog/phpmyadmin>
- de Zúñiga, F. G. (2024, enero 3). ¿Qué es Visual Studio Code y cuáles son sus ventajas? Blog de arsys.es; Arsys. <https://www.arsys.es/blog/que-es-visual-studio-code-y-cuales-son-sus-ventajas>
- Jesús. (2023, noviembre 12). Introducción a Express.js: Explorando sus Funciones y Beneficios. Tutoriales Dongee. <https://www.dongee.com/tutoriales/que-es-y-para-que-sirve-express-js/>
- Node.js Foundation. (2017). Glosario: Express. Disponible: Sitio Web de Express: <https://expressjs.com/es/resources/glossary.html>
- Node.js Foundation. (s.f.). Acerca de Node.js: Node JS. Disponible: Node JS: <https://nodejs.org/es/about/>

Análisis multitemporal de los índices vegetativos e hidrológicos del embalse de Chingaza

Multitemporal analysis of vegetative and hydrological indices of the Chingaza reservoir.

José Roncancio Barragan ^a, Laura Mercedes Arteaga Rojas ^b Sergio González Gil ^c

^a *Eestudiante de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Politecnico Gran Colombiano, Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia.*

^b *Magister, Facultad de Ingeniería, Politecnico Gran Colombiano, Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia.*

^c *Magister, Facultad de Ingeniería, UNIMINUTO, Bogotá D.C, Cundinamarca, Colombia*

Resumen

El cambio climático ha provocado transformaciones significativas en las condiciones hídricas del embalse de Chingaza y su relación con factores climáticos y ambientales. Esta investigación se enfoca en el uso de tecnologías aeroespaciales, el monitoreo ambiental mediante teledetección satelital y el análisis de datos geospaciales para examinar patrones y tendencias. El estudio enfatiza la importancia del embalse de Chingaza como una fuente de agua crucial para millones de personas en la ciudad de Bogotá, que actualmente enfrenta racionamientos diarios de agua. La correlación entre NDVI (Índice de Vegetación Normalizada) y temperatura muestra un coeficiente de determinación (R^2) de 0.2531, indicando que el 25.31% de la variabilidad en la temperatura puede ser explicada por el NDVI. Esto sugiere una correlación positiva moderada entre NDVI y temperatura, con un valor p de 0.0001, lo que indica una significancia estadística muy alta. En cuanto a la correlación entre NDWI y temperatura, se observó un R^2 de 0.2150, sugiriendo también una correlación positiva moderada, con un valor p de 0.0005. Las predicciones para los años 2026, 2036 y 2046 indican una tendencia decreciente en la vegetación y la humedad superficial, sugiriendo una posible desertificación y pérdida de biodiversidad. Estos resultados subrayan la necesidad urgente de implementar medidas de conservación para mitigar estos efectos negativos y proteger el ecosistema en la región.

Palabras clave: Datos Climáticos, Embalse de Chingaza, NDVI, NDWI, Análisis Geoespacial y Teledetección ambiental

Abstract

Climate change has caused significant transformations in the water conditions of the Chingaza reservoir and its relationship with climatic and environmental factors. This research focuses on the use of aerospace technologies, environmental monitoring through satellite remote sensing, and geospatial data analysis to examine patterns and trends. The study emphasizes the importance of the Chingaza reservoir as a crucial water source for millions of people in the city of Bogotá, which is currently facing daily water rationing. The correlation between NDVI and temperature shows a determination coefficient (R^2) of 0.2531, indicating that 25.31% of the variability in temperature can be explained by NDVI. This suggests a moderate positive correlation between NDVI and temperature, with a p-value of 0.0001, indicating very high statistical significance. Regarding the correlation between NDWI and temperature, an R^2 of 0.2150 was observed, also suggesting a moderate positive correlation, with a p-value of 0.0005. Predictions for the years 2026, 2036, and 2046 indicate a decreasing trend in vegetation and surface moisture, suggesting possible desertification and biodiversity loss. These results underline the urgent need to implement conservation measures to mitigate these negative effects and protect the ecosystem in the region.

Keywords: Climatic Data, Chingaza Reservoir, NDVI, NDWI, Geospatial Analysis, Environmental Remote Sensing

*Autor para la correspondencia: larteagaa@poligran.edu.co

Correo electrónico: jdroncancio@poligran.edu.co (José Roncancio), larteagaa@poligran.edu.co Gabriela Sánchez-Manríquez), segonzalez@uniminuto.edu (Sergio Gonzales Gil).

Historial del manuscrito: recibido el 20/09/2024, última versión-revisada recibida el 20/10/2024 aceptado el 21/10/2024, publicado el 08/04/2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15127280>

1. Introducción

El Acueducto de Bogotá ha hecho un llamado a la ciudadanía a tomar conciencia sobre la gravedad de la situación hídrica. Las imágenes compartidas muestran un embalse de Chingaza cada vez más árido, una señal alarmante de la escasez de agua que amenaza a la región. En 1992, el fenómeno del Niño provocó cortes de agua y energía de hasta 8 horas, e incluso se llegó a bombardear las nubes para inducir la lluvia. El enfoque de este proyecto de investigación es el análisis de datos recopilados en 2019 (Acueducto, 2023). El propósito del análisis es investigar cómo ha cambiado la situación hídrica y cómo se relaciona con los factores climáticos. Además, se busca identificar patrones, tendencias y posibles escenarios futuros utilizando el modelo de aprendizaje automático, modelos estadísticas de coeficiente de regresión lineal en relación con la dispersión de datos. (Avtar et al., 2014a; Sanjay Wagh et al., 2019; Suárez et al., 2017)

En diferentes estudios realizados en el contexto de los cuerpos de agua, se han utilizado metodologías que combinan la teledetección satelital y el análisis de datos geoespaciales. Uno de esos estudios es el puerto de Nueva York presenta un desafío para la teledetección debido a su hidrografía compleja y la fuerte influencia de las mareas. La necesidad de monitorear la calidad del agua en esta región es crucial para evaluar la eficacia de las medidas de reducción de la contaminación y garantizar la salud del ecosistema acuático. (Hellweger et al., 2004) Los métodos usados fueron comparar los datos terrestres de la Encuesta de Calidad del Agua del Puerto de Nueva York con imágenes de los sensores Landsat Thematic Mapper (TM) y Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Se emplearon análisis espaciales promediados en el tiempo para correlacionar las medidas de turbidez y la concentración de clorofila *a* con las reflectancias medidas por los sensores satelitales. (Hellweger et al., 2004)

En el estudio se utilizaron algoritmos y modelos basados en imágenes de Landsat TM y MODIS de Terra. Con Landsat TM, se logró correlacionar la turbidez determinada a partir de la profundidad de Secchi con la reflectancia roja en las regiones afectadas por los sedimentos del río Hudson. Además, la reflectancia roja se utilizó para identificar y cartografiar columnas de turbidez causadas por la escorrentía de lluvia y/o la resuspensión de mareas vivas en la bahía de Newark. También se encontró una correlación significativa entre la concentración de clorofila *a* y la relación entre la reflectancia verde y roja en el East River y Long Island Sound. Por otro lado, las estimaciones de clorofila *a* realizadas con el sensor MODIS de Terra no mostraron correlación con las observaciones terrestres y estuvieron sesgadas hacia valores bajos, resultando en una utilidad limitada para el puerto de Nueva York. (Hellweger et al., 2004)

En el estudio se encontró una correlación significativa ($R^2 = 0.85$) entre la turbidez determinada a partir de la profundidad de Secchi y la reflectancia roja del Landsat TM en las áreas afectadas por los sedimentos del río Hudson, además de que la reflectancia roja del Landsat TM fue útil

para identificar y cartografiar aumentos de turbidez en la bahía de Newark. En cuanto a la clorofila *a*, su concentración se correlacionó con la relación entre la reflectancia verde y roja del Landsat TM en el East River y Long Island Sound ($R^2 = 0.78$). Sin embargo, las estimaciones de clorofila *a* realizadas con MODIS de Terra no fueron fiables debido a su baja correlación con las observaciones terrestres. (Hellweger et al., 2004)

Otra revisión bibliográfica que fundamenta el presente estudio se realiza en la provincia de Zhejiang, China. La monitorización de la calidad del agua en cuerpos de agua continentales, como ríos y embalses, presenta desafíos debido a la variabilidad de las fuentes de contaminación y la falta de modelos de inversión genéricos que puedan aplicarse a diferentes aguas interiores. Este estudio aborda estos desafíos utilizando datos satelitales y técnicas de aprendizaje automático para crear modelos de inversión genéricos aplicables a las aguas interiores de Zhejiang Province, China. (Zhao et al., 2024)

Los métodos que se usaron con los datos de las imágenes satelitales de Sentinel-2 y datos in situ de 311 estaciones de monitoreo automático para construir un gran volumen de coincidencias entre los espectros de agua derivados del satélite y las concentraciones de parámetros de calidad del agua. Se aplicó un algoritmo de árboles de aumento de gradiente extremo (XGBoost) para desarrollar modelos de inversión de calidad del agua, que incluyen cinco parámetros: índice de permanganato (CODMn), nitrógeno total (TN), fósforo total (TP), nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y turbidez (TUB). Los algoritmos y modelos son: el modelo de inversión desarrollados con el algoritmo XGBoost mostraron un rendimiento robusto en un conjunto de datos independiente, con coeficientes de correlación (*r*) de 0.74, 0.79, 0.84, 0.72, y 0.87, y errores cuadrados medios (RMSE) de 0.73 mg/L, 0.56 mg/L, 0.18 mg/L, 0.24 mg/L, y 0.29 NTU para CODMn, TN, TP, NH₃-N, y TUB, respectivamente. Comparaciones entre los valores recuperados por satélite y los observados in situ mostraron buena consistencia en distribuciones espaciales y temporales.

Los resultados fueron que al aplicar estos modelos a las aguas interiores de Zhejiang Province, se obtuvieron distribuciones mensuales de los parámetros de calidad del agua con una resolución de 10 m. Los patrones indicaron valores elevados en las regiones aguas abajo y valores disminuidos en las áreas aguas arriba. Los embalses mostraron buena calidad de agua en general, aunque algunas variaciones temporales en los valores promedio de los embalses y los valores en sitios específicos mostraron tendencias opuestas. Estos hallazgos proporcionan una referencia práctica para la construcción de modelos de inversión satelitales y un soporte técnico robusto para la vigilancia dinámica de la calidad del agua interior mediante teledetección. (Zhao et al., 2024)

El último estudio revisado y que es fundamental para la presente investigación, se llevó a cabo en seis turberas de Finlandia, el estudio aborda la necesidad de monitorear los cambios hidrológicos en turberas después de la restauración, un proceso crucial para revertir la degradación causada por el drenaje para la silvicultura y otras actividades. Sin embargo,

hay pocos estudios que cuantifiquen estos cambios utilizando modelos basados en teledetección.

El enfoque combina datos ópticos (Sentinel-2 y Landsat 7-9) y radar (Sentinel-1) para modelar los cambios espaciotemporales en la tabla de agua (WT) de turberas boreales en el norte de Finlandia. Se utilizaron datos de campo medidos en once turberas (seis restauradas y cinco de control) y se procesaron utilizando el servidor de Google Earth Engine. Se construyó un modelo de regresión de bosque aleatorio para predecir la WT a partir de las características de las imágenes satelitales. Para evaluar los cambios espaciotemporales, se elaboraron mapas representativos de situaciones antes y después de la restauración, para condiciones de agua alta en principios de verano y de agua baja a mediados del verano. (Isoaho et al., 2024)

Se empleó un modelo de regresión de bosque aleatorio, calibrado con datos medidos de WT como variable dependiente y características de imágenes satelitales como variables independientes. El modelo tuvo un ajuste relativamente bueno ($R^2 = 0.71$, RMSE = 6.01 cm). Los datos ópticos y de radar se integraron para mejorar la precisión del modelo. (Isoaho et al., 2024)

Los mapas de WT mostraron que los cambios post-restauración no fueron uniformes, concentrándose cerca de las medidas de restauración. La prueba de bootstrap mostró que el WT aumentó más en las áreas restauradas (4.7-8.8 cm) que en las áreas de control (0.1-5.2 cm). Estos resultados indican que el impacto de la restauración en la hidrología superficial puede cuantificarse con imágenes satelitales multi-sensor y un enfoque de aprendizaje automático en turberas sin árboles. (Isoaho et al., 2024).

Las imágenes por satélite son una valiosa herramienta para seguir el desarrollo de ciudades y zonas urbanas, también permiten analizar su impacto en el flujo de agua el área de estudio es el embalse de Chingaza, se analiza su impacto en el flujo de agua del embalse, estos datos aportan sobre el tamaño y la forma de las ciudades, y su influencia en el entorno natural y climático.

El uso sostenible de los recursos hídricos del embalse de Chingaza, es hoy una preocupación creciente del racionamiento de agua de la región que abastece agua el embalse y su papel clave en la regulación del clima, por ello se requieren herramientas eficaces para vigilar y gestionar el estado ecológico del embalse Chingaza. Para ello, se han desarrollado una serie de soluciones que utilizan tecnologías de análisis de datos geoespaciales. (Ghansah et al., 2022; Li et al., 2020a)

Es importante destacar que una de las ciudades que mayor se abastece de agua es la ciudad de Bogotá y parte de los municipios de Madrid y Funza, zonas que se vieron afectadas por el racionamiento de agua para el presente análisis multitemporal de los cambios vegetativos e hidrológicos en respuesta a las variables meteorológicas del embalse de Chingaza. La necesidad de investigar estos cambios radica en su impacto potencial en el uso del embalse para suministrar el servicio público de agua. Por tal motivo, la hipótesis planteada hace referencia a cómo un análisis multitemporal permite determinar los cambios vegetativos e hidrológicos del embalse de Chingaza, por lo cual esta investigación tuvo

como objetivo realizar un análisis multi-temporal del comportamiento de la vegetación e hidrológico del embalse, con el uso de sensores remotos para monitorear las respuestas del embalse de acuerdo con las variaciones climáticas.

De la Figura 1 se puede observar el color rojo es la sequía del suelo que provoca el clima, y

la situación del suministro de agua en Bogotá, la capital colombiana, es crítica y requiere una atención inmediata. A pesar de las recientes precipitaciones, los embalses muestran niveles preocupantemente bajos, como lo evidencia el estado del embalse de Chingaza, según el informe del 24 de abril. (Acueducto, 2023)

Aunque se ha observado una ligera mejoría en los porcentajes de llenado diario, aún estamos lejos de alcanzar la capacidad deseada del 20.13%. Estos desafíos reflejan los impactos del cambio climático en nuestras grandes ciudades, subrayando la necesidad urgente de investigaciones para comprender la gravedad de estos fenómenos y poder desarrollar predicciones precisas. (Sabogal Velez et al., 2023).

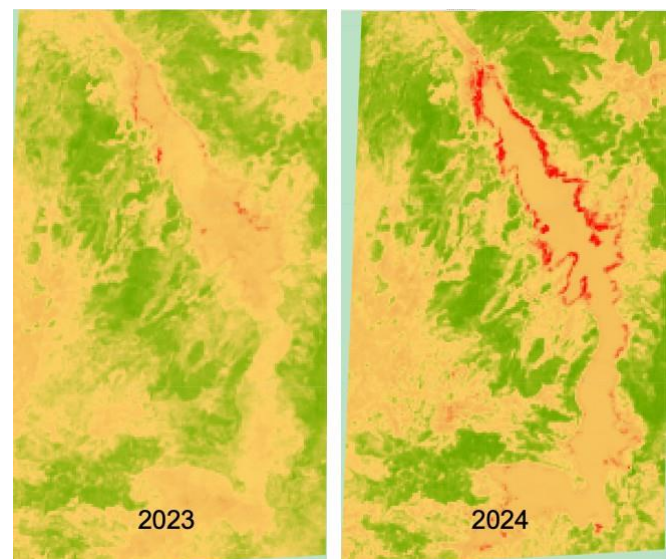


Figura 1: Cambios Vegetativos e Hidrológicos del embalse de Chingaza del año 2023 hasta el año 2024

La adquisición y procesamiento de datos satelitales del reservorio de agua (regulador del clima). Por lo tanto, el uso de métodos de clasificación y aprendizaje no supervisado, permitieron consolidar, analizar y predecir datos vegetativos para los años 2026, 2036 y 2046 en respuesta a los datos climáticos del puerto.

2. Materiales y Método

Para comprender el análisis del territorio se hizo usaron imágenes satélites, que permitieron identificar variables y realizar un análisis a través del procesamiento digital de las condiciones del territorio (Cuellar & Perez, 2023; Li et al., 2020b), por lo cual el área de estudio abordado en este artículo se enfocó en el embalse de Chingaza.

El modelo de análisis multitemporal de vegetación se describe bajo tres fases, Figura 2, la primera fase es la adquisición de los datos de acuerdo con el área de estudio, la

segunda se es el procesamiento y correlación de los datos fenológicos del data set de las imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8 con los resultados data set de imágenes del satélite IDAOH meteorológicos y la última fase es el análisis de los datos y visualización, aplicando modelos de predicción.

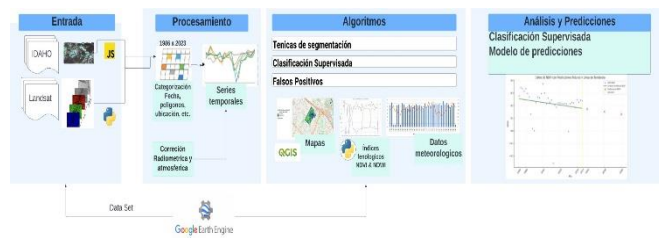


Figura 2: Modelo de análisis multitemporal de vegetación

En la primera fase se adquirieron las coordenadas en el polígono del Embalse de Chingaza. En la Tabla 1 se representan las Coordenadas, usando el Geoportal (GEE) Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>) que aloja un data set de imágenes captadas por diferentes satélites, almacenados en el servidor de GEE contiene la interfaz de JavaScript que proporciona información de diferentes bandas, entre esas, las infrarrojas (SWIR), las rojas (NIR) y entre otras. Permitiendo, combinarse entre sí obteniendo índices de vegetación como NDVI, EVI, SAVI mensuales desde 1984 hasta 2023. Ver tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas del Embalse de Chingaza

Lugar	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
Embalse de Chingaza	4.520277889	73.740036

Es relevante, tener en cuenta los datos meteorológicos del embalse debido a que la vegetación y el agua pueden cambiar sus condiciones, a causa de la temperatura y precipitaciones del ambiente.

Para la selección de las imágenes anuales se usaron desde el año 1984 hasta el año 2023, se tiene en cuenta la cantidad de nubosidad de un 30%. Sin embargo, las imágenes de 1985, 1988, 1992, 1994, 2010 y 2018, son imágenes con una nubosidad mayor al 50% por esta razón no se tuvieron en cuenta para el procesamiento y cálculo de los índices.

Los datos de satélite obtenidos que se procesan y codifican de acuerdo con los índices calculados de vegetación normalizada, vegetación mejorado, Índice de vegetación ajustado por suelo, que se relacionan con los datos de temperatura y de precipitaciones.

La segunda fase, fue el tratamiento de los datos satelitales, se realizó procesando un total de 33 escenas de los satélites Landsat 5, 7 y 8, aplicando técnicas estándar de procesamiento de imágenes, como la mejora de contraste, la selección de áreas de interés y la ecualización de histogramas para mejorar la calidad visual. Debido a la cobertura temporal limitada de las imágenes de Landsat, se seleccionaron datos satelitales de acuerdo con el año de monitoreo de cada satélite. Esto asegura que las imágenes multispectrales puedan ser visualizadas.

También se normalizan y relacionan con los datos de precipitación, y temperatura, utilizando el entorno de servidor de Google Earth Engine (GEE), que opera mediante la interfaz de JavaScript. Esto permite que la recopilación y el alojamiento de datos meteorológicos de cada uno de los años soporte el resultado de los datos vegetativos bajos o altos.

Los datos adquiridos de los satélites MODIS y del satélite IDAHO, desde 1984 hasta 2023 del Puerto se obtuvieron promediando las precipitaciones y la temperatura de cada uno de los 12 meses de cada año, utilizados para controlar los cambios de los índices de vegetación, con respecto a los resultados de las variables climáticas.

La tercera fase, fueron los algoritmos usados para determinar el comportamiento fenológico del ecosistema terrestre, se han desarrollado varios índices que emplean diferentes bandas de longitud de onda obtenidas de imágenes satelitales. Para este estudio se destacan los índices de NDVI, que son dependientes de las condiciones del áreas de estudio, permitiendo identificar la relación normalizada del rojo. Los métodos usados para identificar las propiedades de reflectancia espectral de la vegetación. (Avtar et al., 2014b). Observar Ecuaciones 1.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Las bandas de reflectancia espectral: RED (rojo), GREEN (verde), BLUE (reflectancia azul), G (ganancia de 2.5), C1 y C2 (Coeficientes de aerosol en la corrección atmosférica), L (Valor de Ajuste al Suelo) y NIR (infrarrojo).

El seguimiento operativo de la vegetación y su respuesta a los cambios meteorológicos que implica el uso de índices de vegetación en relación a los datos climáticos, han demostrado que los índices de vegetación derivados de datos satelitales revelan estimaciones. La información de las variaciones del NDVI, SAVI y EVI estaban significativamente relacionadas con la temperatura y precipitaciones. (Avtar et al., 2014a, 2022a). En tres etapas de los cambios fenológicos : (1) la variación temporal de los índices de vegetación basados en los datos de los satélites Landsat y Sentinel -2 , así como los cambios en las precipitaciones y temperatura del puerto con el satélite MODIS e IDOH; (2) comparar las relaciones entre el NDVI, EVI y SAVI con los datos de temperatura y precipitaciones; y (3) modelo coeficiente de regresión lineal de los índices NDVI (índice de vegetación de diferencia)NDWI (índice normalizado de agua). (Avtar et al., 2022b) (Hellweger et al., 2004; Isoaho et al., 2024; Zhao et al., 2024)

Después de obtener el data set de los datos vegetativos y meteorológicos como se observa en la Figura 3 , se implementó el algoritmo para el procesamiento de los datos, permitiendo la comparación entre ellos, de acuerdo con el coeficiente de regresión lineal por cada dato adquirido.

Algoritmo I. Adquisición y procesamiento de imagen**Precondición:**

```

1 declarar polígono de interés
2 declarar variables de nubosidad
3 declarar año
4 declarar bandas
5 declarar temperatura
6 declara precipitaciones
7 crear grafico de índices
8 crear crea mapa
9 función: adquisición
10     clasifica bandas por series temporales
11     crea probabilidades
12     Imprime bandas
12 fin función
13 función: procesamiento
14     descargar datos
15     calcula índices
16     clasificación por tipo de índices
17     crear promedio de los índices
18     compara índices por años
19     calcula coeficiente de regresión lineal
20     crea grafico de comparación
21     imprime mapa
19 retornar
20 fin función
21 función temperatura
22     descargar datos
23     compara temperaturas anuales
24     calcula coeficiente de regresión lineal
25     imprime grafico
22 retornar
23 fin función
24 función precipitaciones
25     descargar datos
26     compara precipitaciones anuales
27     calcula coeficiente de regresión lineal
28     imprime grafico
29 fin función
30 función estadística NDVI, EVI & SAVI
31     Calcular desviación estándar
32     Calcular error cuadrático medio y error absoluto medio
33     Calcular Predicciones
34     Imprimir grafico
36 fin función

```

Figura 3: Pseudocódigo de la adquisición y procesamiento de imagen

La última fase del modelo, correspondió al análisis y predicciones de los datos adquiridos y procesados como se observa en la Figura 4, se correlacionan los datos fenológicos con los datos meteorológicos determinando cambios de acuerdo con los fenómenos meteorológicos a lo largo de los años 1984 hasta 2023 con respecto a los índices de NDVI conforme a los resultados del coeficiente de regresión lineal de cada una de las series temporales de cada data set, se usan modelos predictivos utilizando técnicas de aprendizaje automático con el fin de determinar el NDVI en los años 2026, 2036 y 2046.

3. Resultados

Por consiguiente, los datos de temperatura y precipitaciones adquiridos del satélite IDOH entre los años 2002 a 2023, promediando los 12 meses por cada año y comparándose entre sí, como se puede observar en la Figura 3. Datos de precipitaciones y temperatura de los años 2002 hasta 2023.

El análisis de los datos de precipitación y temperatura desde 2002 hasta 2023, que se visualizan en la Figura 4, son significativos en la región del embalse de Chingaza. Durante los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre, se observa una correlación positiva entre precipitación y temperatura, donde ambos valores son altos, indicando una temporada lluviosa con temperaturas cálidas. En contraste, de mayo a julio, hay una correlación negativa, con mínimas precipitaciones y temperaturas más bajas, reflejando una

estación seca y fresca. Los cambios en la precipitación parecen influir directamente en las temperaturas, destacando la importancia de considerar estos patrones para la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola. Este análisis subraya la necesidad de estrategias adaptativas para enfrentar variaciones estacionales extremas y garantizar la sostenibilidad del ecosistema en Chingaza.

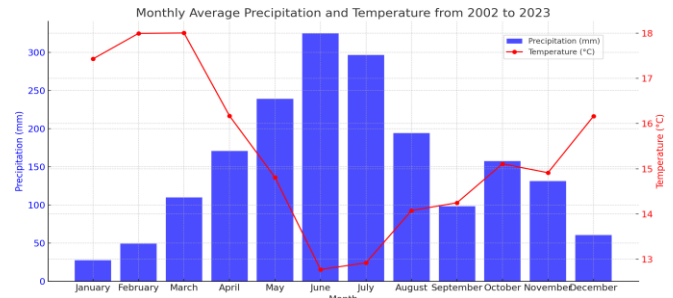
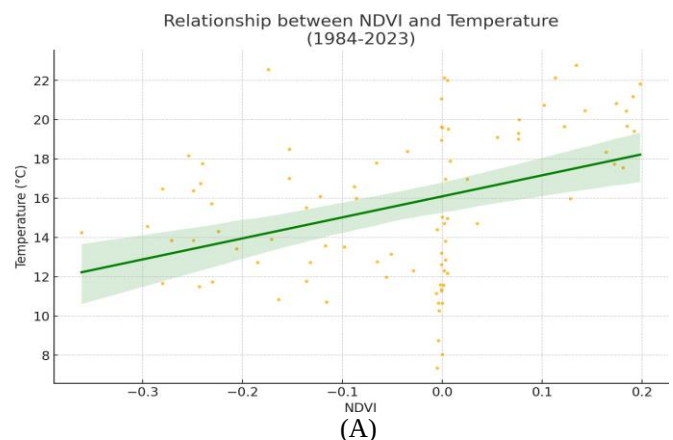


Figura 4: Datos de Precipitaciones y temperatura de los años de 2002 hasta 2023

En las Figuras 5 (A) y (B) se puede observar la correlación entre NDVI y temperatura revela un coeficiente de determinación (R^2) de 0.2531, indicando que el 25.31% de la variabilidad en la temperatura puede ser explicada por el NDVI. Este valor sugiere una correlación positiva moderada entre NDVI y temperatura. El valor p asociado a esta correlación es 0.0001, lo que indica una significancia estadística muy alta, con una probabilidad muy baja de que esta relación observada sea debida al azar. En cuanto a la correlación entre NDVI y temperatura, supongamos que el R^2 es 0.2150, lo que significa que el 21.50% de la variabilidad en la temperatura puede ser explicada por el NDVI, también indicando una correlación positiva moderada. El valor p asociado, supongamos 0.0005, muestra igualmente una significancia estadística alta. Por tanto, el NDVI como el NDWI presentan una correlación positiva moderada con la temperatura, con una significancia estadística alta, sugiriendo que a medida que estos índices aumentan, la temperatura tiende a aumentar.



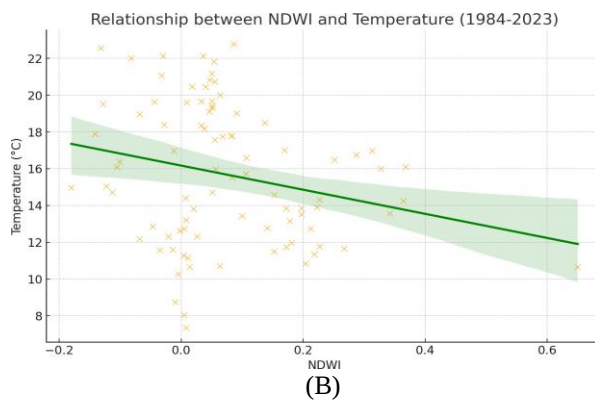


Figura 5: Variación temporal de la temperatura versus los índices de vegetación (A) NDVI y (B) NDWI

En las Figuras 6 (A) y (B) muestran las predicciones de los índices de vegetación normalizado NDVI y el índice de agua normalizado NDWI son datos alarmantes a una tendencia decreciente en la vegetación y humedad del área de estudio. Para el año 2026, ambos índices predicen valores negativos o cercanos a cero, sugiriendo una disminución significativa en la vegetación y la humedad superficial.

Esta tendencia continúa a la baja en 2036 y se agrava aún más para 2046, indicando una posible desertificación y pérdida de biodiversidad. Estas predicciones resaltan la necesidad urgente de implementar medidas de conservación para mitigar estos efectos negativos y proteger el ecosistema.

Las predicciones indican una tendencia preocupante de degradación ambiental en términos de vegetación y humedad superficial. La disminución de NDVI y NDWI sugiere que el área de estudio podría enfrentar serios problemas de desertificación y pérdida de biodiversidad en el futuro si no se toman medidas correctivas.

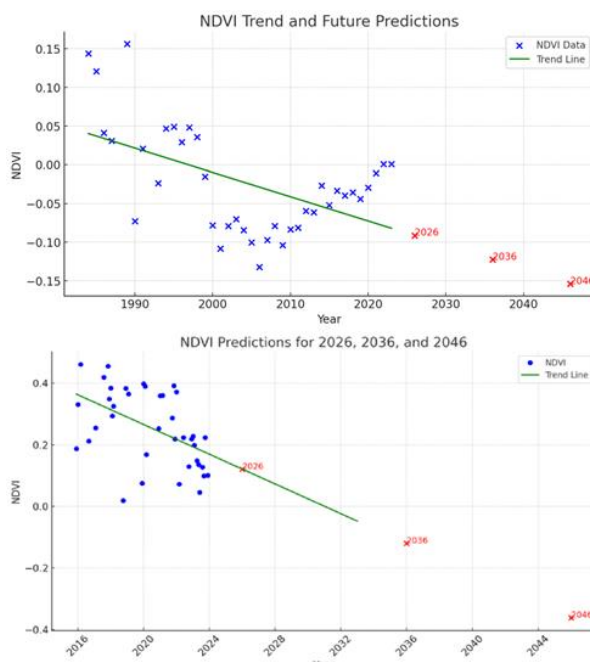


Figura 6: : Predicciones de los índices vegetativo e hidrológico del embalse de Chingaza predicciones de los datos satelitales Landsat, Sentinel y MODIS (A) NDVI y (B) NDWI

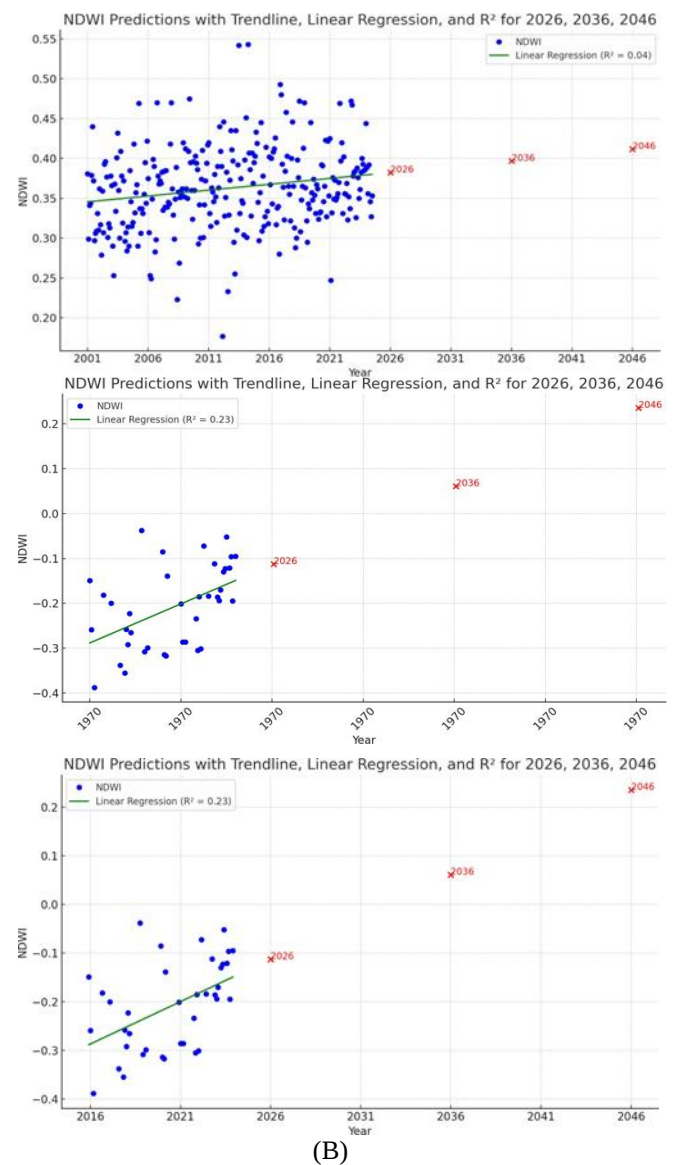


Figura 6B : Predicciones de los índices vegetativo e hidrológico del embalse de Chingaza predicciones de los datos satelitales Landsat, Sentinel y MODIS (A) NDVI y (B) NDWI

La Figura 7 (A) muestra un diagrama de caja que muestra la distribución del NDVI en diferentes períodos de tiempo, comparable a la imagen de referencia. La distribución de los valores de NDVI se agrupa en tres categorías: "Todos", "2012 y 2016" y "2019". El gráfico excluye los valores atípicos, muestra la media e incluye el recuento de puntos de datos (n) para cada categoría. Además, también se muestra que los cuadros comparan los valores de NDVI en tres categorías: "Todos" (n = 1374), que incluye todos los puntos de datos combinados y proporciona una visión general; "2012 y 2016" (n = 3), que muestra valores más altos de NDVI, lo que sugiere una vegetación más saludable; y "2019" (n = 2), donde los valores de NDVI disminuyen ligeramente, lo que indica un posible deterioro en la salud de la vegetación. Aunque las muestras pequeñas en 2012, 2016 y 2019 limitan las conclusiones definitivas, el gráfico muestra una tendencia de variabilidad en la salud de la vegetación a lo largo del tiempo.

y en la figura 7 (b). Este diagrama de caja compara la distribución de los valores de NDWI en tres categorías: todos los datos combinados ($n = 1657$), datos de 2012 y 2016 ($n = 24$) y datos de 2019 ($n = 2$). La tendencia general muestra que los valores de NDWI se mantuvieron relativamente estables con medianas y promedios más altos en los años anteriores (2012 y 2016), pero disminuyeron ligeramente en 2019. La categoría "Todos" captura una gama más amplia de datos, mientras que el tamaño de muestra más pequeño en 2019 muestra una marcada disminución. Esta visualización destaca un posible cambio.

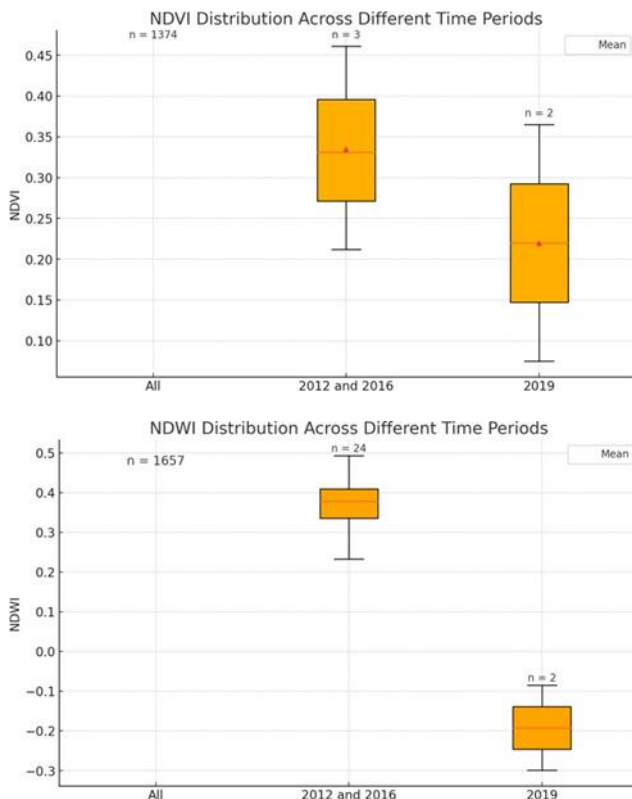


Figura 7. Diagrama de caja de precipitación NDVI (A) NDVI y (B) NDWI

4. Conclusiones

La correlación entre el NDVI y la temperatura muestra un coeficiente de determinación (R^2) de 0,2531, lo que indica que el 25,31% de la variabilidad de la temperatura puede explicarse por el NDVI. Esto sugiere una correlación positiva moderada entre el NDVI y la temperatura.

El valor p asociado a esta correlación es 0,0001, lo que indica una significación estadística muy alta y una baja probabilidad de que esta relación se deba al azar. En cuanto a la correlación entre el NDWI y la temperatura, se observó un R^2 de 0,2150, lo que significa que el 21,50% de la variabilidad de la temperatura puede explicarse por el NDWI, sugiriendo también una correlación positiva moderada.

El valor p de 0,0005 muestra una alta significación estadística. Tanto el NDVI como el NDWI tienen una correlación positiva moderada con la temperatura. Además, el

uso de aeronaves no tripuladas puede proporcionar datos asertivos sobre la vegetación y el agua, si estos se monitorean continuamente.

Las predicciones para los años 2026, 2036 y 2046 indican una tendencia decreciente de la vegetación y la humedad superficial en el área de estudio, lo que sugiere una posible desertificación y pérdida de biodiversidad. Estos resultados ponen de manifiesto la urgente necesidad de implementar medidas de conservación para mitigar estos efectos negativos y proteger el ecosistema en la región, de lo cual debe ser importante alertar a la comunidad que se abastece del embalse, y a la toma de decisiones por parte de las entidades gubernamentales.

5. Agradecimientos

Al Politécnico Gran Colombiano por permitirnos investigar dentro de los encuentros de clases.

6. Referencias

- Acueducto. (2023). Sistema Chingaza.
- Avtar, R., Saito, O., Singh, G., Kobayashi, H., Ali, Y., Herath, S., & Takeuchi, K. (2014a). Monitoring responses of terrestrial ecosystem to climate variations using multi temporal remote sensing data in Ghana. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946535>
- Avtar, R., Saito, O., Singh, G., Kobayashi, H., Ali, Y., Herath, S., & Takeuchi, K. (2014b). Monitoring responses of terrestrial ecosystem to climate variations using multi temporal remote sensing data in Ghana. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946535>
- Avtar, R., Yunus, A. P., Saito, O., Kharrazi, A., Kumar, P., & Takeuchi, K. (2022a). Multi-temporal remote sensing data to monitor terrestrial ecosystem responses to climate variations in Ghana. Geocarto International, 37(2). <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723716>
- Avtar, R., Yunus, A. P., Saito, O., Kharrazi, A., Kumar, P., & Takeuchi, K. (2022b). Multi-temporal remote sensing data to monitor terrestrial ecosystem responses to climate variations in Ghana. Geocarto International, 37(2). <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1723716>
- Cuellar, Y., & Perez, L. (2023). Multitemporal modeling and simulation of the complex dynamics in urban wetlands: the case of Bogota, Colombia. Scientific Reports, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36600-8>
- Ghansah, B., Foster, T., Higginbottom, T. P., Adhikari, R., & Zwart, S. J. (2022). Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana's Upper East Region using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning. In Physics and Chemistry of the Earth (Vol. 125). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103082>
- Hellweger, F. L., Schlosser, P., Lall, U., & Weissel, J. K. (2004). Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61(3), 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.06.019>
- Isoaho, A., Ikkala, L., Pääkkilä, L., Marttila, H., Kareksela, S., & Räsänen, A. (2024). Multi-sensor satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. Remote Sensing of Environment, 306. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114144>
- Li, D., Wu, B., Chen, B., Qin, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Xue, Y. (2020a). Open-surface river extraction based on sentinel-2 MSI imagery and DEM Data: Case study of the upper yellow river. Remote Sensing, 12(17). <https://doi.org/10.3390/RS12172737>
- Li, D., Wu, B., Chen, B., Qin, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Xue, Y. (2020b). Open-surface river extraction based on sentinel-2 MSI imagery and DEM

- Data: Case study of the upper yellow river. *Remote Sensing*, 12(17).
<https://doi.org/10.3390/RS12172737>
- Sabogal Velez, C. L., Pedroza Toro, L. M., & González Angarita, G.
P. (2023). Análisis de la vegetación a partir de índices espectrales y su relevancia en la identificación de espejos de agua en el humedal Torca Guaymaral, Bogotá, Colombia. *Avances Investigación En Ingeniería*, 20(2 (Julio-Diciembre)). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.10708>
- Sanjay Wagh, P., Das, D., & Damani, O. P. (2019). Well detection in satellite images using convolutional neural networks. *GISTAM 2019 - Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. <https://doi.org/10.5220/0007734901170125>
- Suárez, A., Jiménez, A., Castro, M., & Cruz, A. (2017). Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia*, 21(1).
- Zhao, Y., He, X., Pan, S., Bai, Y., Wang, D., Li, T., Gong, F., & Zhang, X. (2024). Satellite retrievals of water quality for diverse inland waters from Sentinel-2 images: An example from Zhejiang Province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104048.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104048>

Diseño mecatrónico frugal y ensamble de mano robótica usando manufactura aditiva. Frugal mechatronic design and assembly of robotic hand using additive manufacturing.

Erick Axel Padilla-García  ^{a*}

^a Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), Av. Tecnológico, Valle de Anáhuac, 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

Resumen

En este manuscrito se presenta el diseño y ensamble de una mano robótica obtenida mediante la implementación de una metodología de diseño mecatrónico secuencial, con un enfoque de innovación frugal, lo que permitió lograr un sistema mecatrónico de arquitectura abierta y bajo costo. Primero, se presenta el proceso de modelado, fabricación, construcción y ensamble que mediante modelado CAD e impresión 3D. Posteriormente, se muestra el proceso de modelado del diseño mecánico utilizando el software Fusion 360, lo que permitió modelar el movimiento conjunto de los dedos de la mano, obteniendo piezas y mecanismos modificables, reproducibles y escalables, para estudiar las diversas funciones de manipulación y agarre, en términos de movilidad, que puedan imitar la compleja funcionalidad de una mano humana real. Mediante el uso de un modelo en realidad virtual se pudo visualizar el diseño final, antes de su instrumentación y construcción. Finalmente, se realizó la fabricación y ensamble real de la mano para validar la propuesta teórica de diseño y movilidad.

Palabras clave: Mano robótica, diseño mecatrónico, innovación frugal, manufactura aditiva

Abstract

This manuscript presents the design and assembly of a robotic hand obtained through the implementation of a sequential mechatronic design methodology, with a frugal innovation approach, which allowed for achieving a low-cost, open-architecture mechatronic system. First, the modeling, manufacturing, construction, and assembly process is presented through CAD modeling and 3D printing. Subsequently, the modeling process of the mechanical design is shown using the Fusion 360 software, which allowed for modeling the joint movement of the fingers of the hand, obtaining modifiable, reproducible, and scalable parts and mechanisms, to study the various manipulation and grip functions. In terms of mobility, it can imitate the complex functionality of a real human hand. Using a virtual reality model was generated to visualize the final design, before its instrumentation and construction. Finally, the actual manufacturing and assembly of the hand were carried out to validate the theoretical design and mobility proposal.

Keywords: Robotic hand, mechatronic design, frugal innovation, additive manufacturing

1. Introducción

La mano es el órgano humano con las mayores funciones de manipulación del cuerpo, donde se encuentran diversas aplicaciones de agarre y destreza en términos de movilidad del cuerpo (López, 2012). En el campo de la robótica, la imitación del funcionamiento de la mano es un tema de interés muy explorado a través de prototipos tecnológicos para interacción con el entorno y manipulación de diversos objetos (González, 2005). Sin embargo, el costo de ensamble de un prototipo que imite la funcionalidad de una mano puede ser costoso, debido a que requiere elementos y mecanismos de gran complejidad

de movimiento y control. Con ello, surge la necesidad de proponer diseños tecnológicos innovadores de bajo costo, de libre programación y asequible a la comunidad. A dichos sistemas que pasaron por un proceso de optimización de los recursos de producción, aumento de la accesibilidad y reducción de los costos producción son conocidos como diseños de innovación frugal (León, 2023).

En sistemas de manufactura donde se requiere prototipado rápido, se buscan sistemas repetibles y escalables con fines de que estudiantes, profesionales, maestros e investigadores puedan alcanzar este tipo de sistemas, siendo de gran interés la innovación frugal (Arias-Vanegas, 2017), es decir, donde a

*Autor para la correspondencia: Erick Axel Padilla García

Correo electrónico: erick_garcia@tese.edu.mx, erickaxelpadillagarcia@gmail.com

partir de contextualizar la necesidad de estudio, se pueden lograr obtener productos de soluciones asequibles y funcionales en un ambiente de menores recursos (Pérez, 2022). Esto mejora la sostenibilidad de los sistemas, ya que podemos dar soluciones a diseño y propuesta de diseño, con prototipo rápido que muestren y validen funciones complejas, como lo son los sistemas robóticos.

En este proyecto se busca desarrollar una mano robótica con un diseño eficiente, funcional y flexible que pueda realizar una variedad de tareas de manipulación, simulando la destreza y la sensibilidad táctil de la mano humana, al tiempo que garantiza la precisión de la mano humana. En la parte de fabricación se busca algo asequible, reproducible, escalable, modificable, de libre uso y libre programación.

Considerando que, un sistema robótico envuelve distintas disciplinas para lograr un objetivo de funcionamiento común (mecánico, electrónico, selección de actuadores, sensores, teoría de control, entre otros) se propone la implementación de una estrategia de diseño multidisciplinario. Una estrategia tradicional de diseño, estrategia secuencial, es aquella donde la primera etapa de diseño es definir el sistema mecánico o dispositivo físico a controlar, y la siguiente etapa de diseño corresponde a la etapa de control (Ortega, 2018), (Padilla-García, 2024). Sin embargo, se han logrado grandes resultados de diseño multidisciplinario con una estrategia de diseño iterativo, donde al finalizar las etapas de diseño secuencial se hace una revisión o validación que evalúa de la combinación de las etapas, y si no se logra una solución factible, regresar a modificar las etapas de diseño hasta obtener un sistema combinado usable y funcional (Morelos, 2019).

En esta propuesta se usa una estrategia de diseño mecatrónico secuencial/iterativo para proponer solución de diseño combinado de una mano robótica con un enfoque frugal, buscando así que la construcción y ensamble real validen la propuesta teórica.

2. Materiales y Métodos

El filamento de ácido poliláctico, conocido en manufactura aditiva como *PLA*, es ampliamente utilizado en el prototipado rápido de sistemas complejos, como es la impresión 3D como puede verse en (Rodríguez, 2021), y (Sosa, 2023). Este filamento es popular por fácil de usar con una configuración estándar y su precio asequible lo hace ideal para la validación de la propuesta CAD. Además, tiene la ventaja de ser biodegradable, y hecho de materias primas renovables. Esto lo hace sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que proviene de fuentes orgánicas y termoplásticas.

Considerando el enfoque frugal, se utiliza una estrategia de diseño mecatrónico secuencial/iterativo, el cual se describirá en las siguientes secciones.

2.2 Metodología de diseño multidisciplinario

Una metodología de diseño con enfoque mecatrónico puede ser utilizado para propuestas de diseño combinado de sistemas robóticos (Zheng, 2017), como se muestra en la figura 1. Como primera etapa, se propone el diseño del sistema físico. Luego, se prueban las señales de manipulación del sistema de la mano robótica, que mediante programación, es posible el monitoreo y operación del sistema.

En el método iterativo, se vuelven a revisar las etapas de diseño hasta lograr una solución factible o utilizable, y en cada caso que no se logre, se debe regresar a modificar y analizar nuevamente cada etapa del diseño, como se muestra en la figura 1.

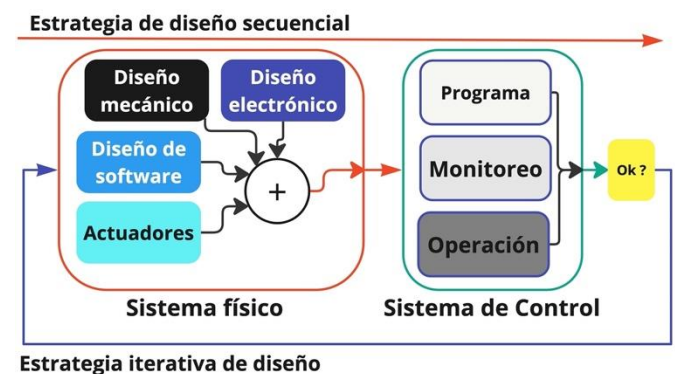


Figura 1: Estrategias de diseño interdisciplinario.

Para el diseño físico de esta propuesta, se usa el Software Simmechanics de Fusion360, lo que permite modelar conjuntos de elementos mecánicos imprimibles. El ensamble total se estudia usando Shapr3D para visualizar de manera virtual el ensamble total, y realizar modificaciones hasta lograr la movilidad deseada de cada uno de los mecanismos del diseño obtenido. A continuación se describen las diferentes etapas de la metodología de diseño.

2.1 Características deseadas de diseño

Algunas características y funciones clave de la mano humana son: función táctil sensitiva, manipulación física, comunicación gestual, movilidad y anatómica compleja (Galcerán, 2017). En este trabajo nos centraremos en la función de manipulación física, ya que es la principal herramienta que el ser humano utiliza para interactuar físicamente con el entorno, con ello permite agarrar, sostener, manipular y realizar una variedad de movimientos con objetos de diferentes formas y tamaños. A continuación, se describirán en detalle cada una de las piezas de ensamble de la mano.

Eslabones: La anatomía de la mano puede verse en la figura 2. En esta propuesta, los huesos del metacarpo se considerarán como una pieza completa, es decir sin movimiento en la palma y en la muñeca. Para las falanges, se propone un eslabón por falange de cada dedo, por lo cual se tienen 14 eslabones de las falanges, y 1 pieza para el metacarpo.

Articulaciones: Una articulación permite la movilidad entre eslabones, cuyo espacio de movimiento está definido por las coordenadas independientes, grados de libertad (de la siglas GDL). Para esta propuesta, se tienen 2 GDL en el pulgar, y 3 GDL para los demás dedos.

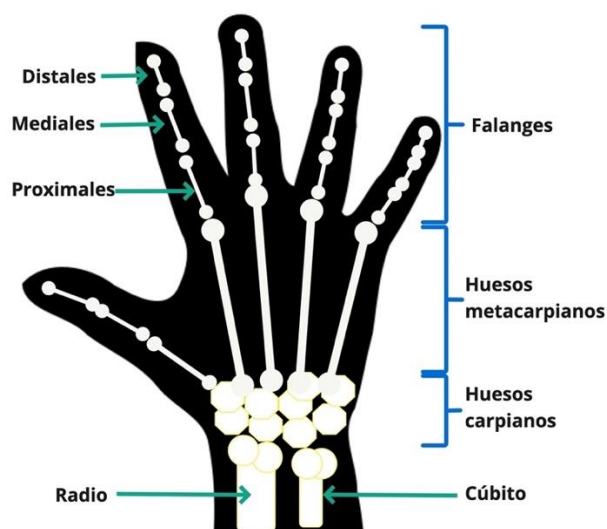


Figura 2: Anatomía de la mano.

Movilidad de las articulaciones: Los arcos de movilidad de las articulaciones de la mano determinan los rangos en grados hasta los cuales una articulación puede moverse sin sufrir daños (G. Cannata, 2005), como se describe a continuación (ver figura 3).

Articulaciones metacarpofalángicas: Con una amplitud de movimiento aproximado de 30° a 45° , para la extensión (enderezar los dedos) y de alrededor de 90° para la flexión (doblar los dedos).

Falanges: La flexión y extensión de las falanges medias y distales puede verse en la figura 4, incisos b y c, donde muestra que los dedos se doblan y se enderezan de forma continua, y cuando están doblados, pueden acercarse a la palma. La abducción y aducción de los dedos, inciso d de la figura 3, esto ocurre cuando todos los dedos se separan en arcos de aproximadamente 20° , o los dedos se juntan y se tocan entre sí, respectivamente.

Pulgar: La articulación puede moverse desde una posición con respecto a la palma 0° hasta alcanzar un ángulo de 70° .

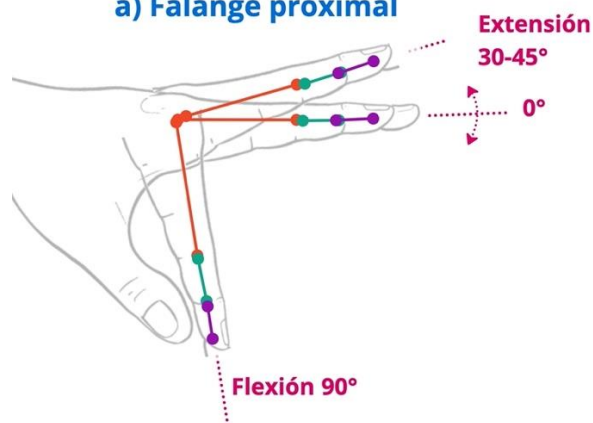
Tipos de agarre: Las acciones que puede realizar la mano, pueden dividirse en agarres de precisión y de fuerza. En este diseño, nos enfocaremos en los agarres de precisión. En este agarre se manipulan objetos únicamente con la punta de los dedos, por ejemplo para tomar un papel o un objeto solamente con falanges distales. En esta propuesta se utilizan agarres de precisión con los distales del pulgar e índice, sin embargo, podemos usar posición cilíndrica o de disco para tomar

objetos de uso básico como el agarre de un vaso, o de una hoja de papel.



Figura 3: Abducción y aducción de los dedos.

a) Falange proximal



b) Falange medial



c) Falange distal

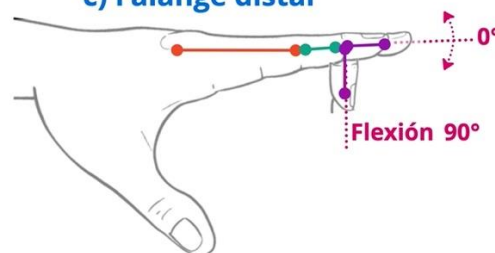


Figura 4: Flexión y extensión de las falanges proximales (a), mediales(b) y distales de los dedos.

También, se considera un solo motor de actuación, que estaría situado en la articulación proximal, es decir un actuador por dedo. Así, se considera el sistema de los dedos en 2 partes: transmisión en articulación proximal y mecanismo de flexión de falange distal. El diseño de un dedo puede verse en la figura 5.

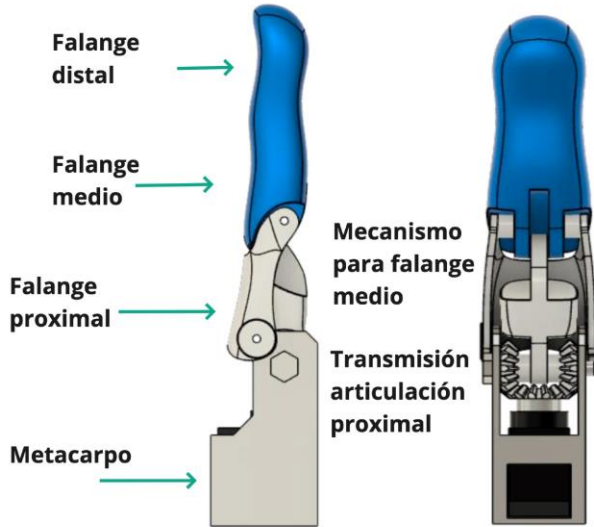


Figura 5: Diseño CAD de mecanismo de los dedos.

2.3.1 Transmisión en articulación proximal

Se propone una transmisión con engranajes cónicos, lo que permite cambio de movimiento de los falanges a 90° , con respecto del eje principal del metacarpo, como en la figura 6.

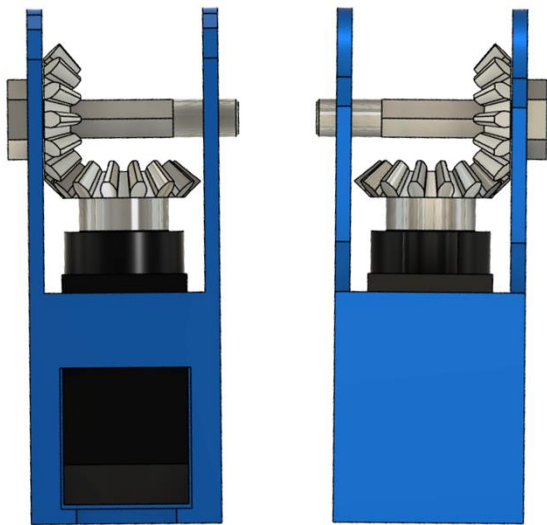


Figura 6: Transmisión de falanges, vista superior e inferior de palma.

Los actuadores serían instalados en la palma, formando el espacio de los actuadores parte de las falanges de metacarpo, con la siguiente relación,

$$q_{k,m} = q_{k,1} \quad (3)$$

donde $q_{k,m}$ es el giro del eje del motor de actuación para el dedo k .

Para el movimiento de los falanges distales, se diseñó un mecanismo que permite el movimiento medio y distal (al mismo tiempo) mientras ocurre el movimiento del falange proximal.

2.3.2 Mecanismo de extensión-flexión de falanges

Para cada uno de los dedos k , donde $k = \{\text{índice, medio, anular, meñique, pulgar}\}$ las falanges medias y distales cumplen las siguientes restricciones,

$$q_{k,3} = 0 \quad (2)$$

$$Ld_2 = L_{k,2} + L_{k,3} \quad (3)$$

donde, Ld_2 es el eslabón nuevo distal considerando como un solo eslabón. El movimiento de los falanges distales, se diseño via CAD, mediante un mecanismo que permite el movimiento medio y distal mientras ocurre el movimiento del falange proximal, como puede verse en la figura 6. Por lo anterior, los falanges distales son articulaciones pasivas que dependen del movimiento de los proximales,

$$q_{k,2} = f(q_{k,1}) \quad (4)$$

donde las articulaciones de falanges distales $q_{k,2}$ ahora son articulaciones pasivas dependientes de $q_{k,1}$, los cuales ahora se mueven de acuerdo con un mecanismo, como en la figura 6. Así, los ángulos de actuación se encuentran ahora en las articulaciones proximales, es decir, $q_{k,1}$. Finalmente, se tiene los parámetros de Denavit-Hartenberg en la Tabla 2, de cada dedo k , para obtener la cinemática directa de las falanges, como se puede ver en la figura 8.

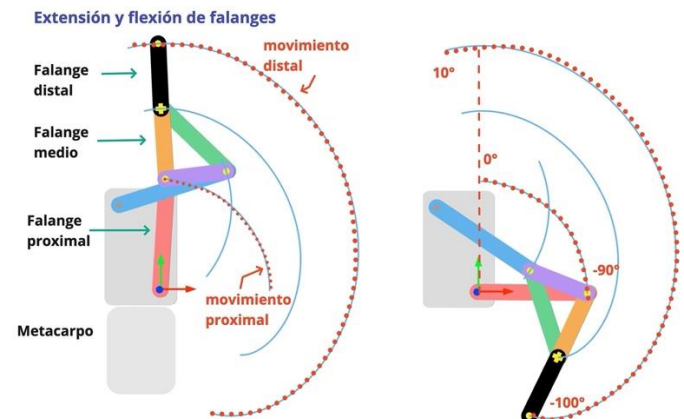


Figura 7: Mecanismo de flexión y extensión de las falanges.

Tabla 2: Denavit-Hartenberg de cada dedo k

Cadena k	θ_i	d_i	a_i	α_i
1 (metacarpiano)	0	d_2	0	$\frac{\pi}{2}$
2 (proximal)	$q_{k,1} + \frac{\pi}{2}$	0	$L_{k,1}$	0
3 (media + distal)	$q_{k,2} = f(q_{k,1})$	0	Ld_2	0

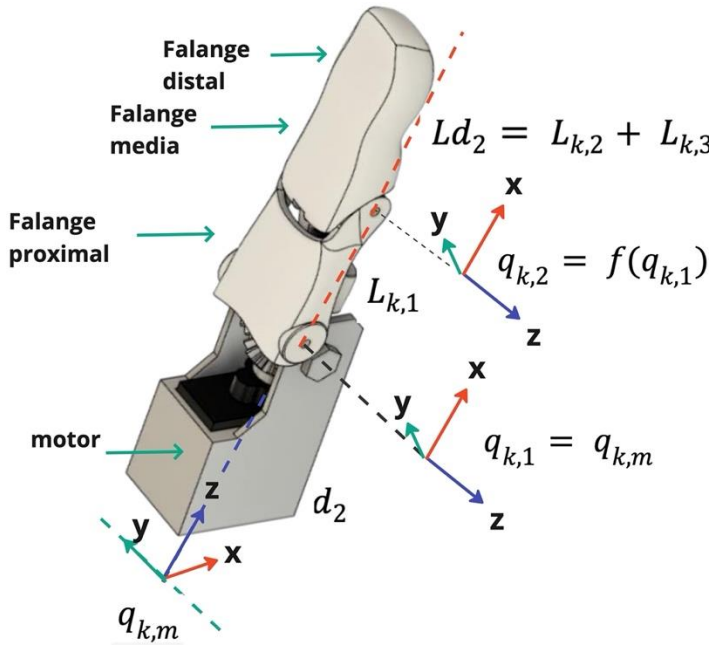


Figura 8: Modelo cinemático de cada dedo de la mano

2.3.3 Palma y falanges metacarpianos

La palma de la mano fue diseñado para dar estabilidad a los movimientos de los dedos, a diferentes distancias de los falanges metacarpianos que sostiene a sus vez a los actuadores de los dedos (el diseño CAD puede verse en la figura 9).

2.3.4 Ensamble CAD y realidad virtual

Para el ensamble se utilizó el programa Fusion 360, que cuenta con herramientas de simulación de conjuntos mecánicos, conocido como "simmechanics" que permite observar el funcionamiento simultaneo de la mano y observar movimiento de cada dedo, así como propiedades físicas y geométricas de cada eslabón. La propuesta final de estructura mecánica de la mano puede verse en la figura 10. En esta propuesta se consideró una muñeca fija, en lugar se diseño una base (ver figura 11) que ofrece paso de cables del sistema, y al mismo tiempo, estabilidad durante el movimiento.



Figura 9: Diseño CAD de palma.

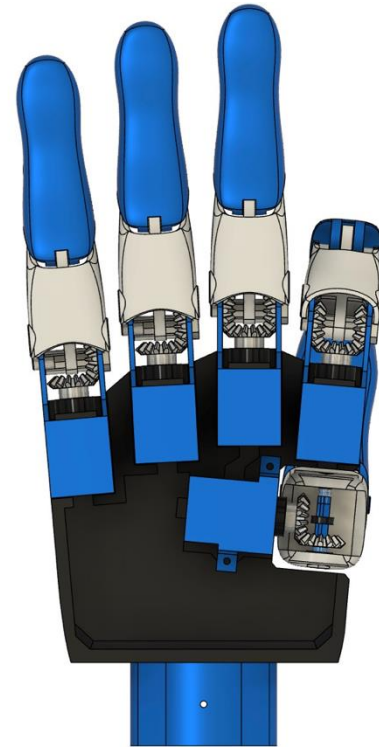


Figura 10: Diseño CAD de ensamble total.



Figura 11: Diseño CAD de base para mano robótica.

Mediante herramientas de Fusion360, se obtuvo el modelo CAD en realidad virtual (figura 12), lo que permite visualizar, y en su caso, escalar el sistema o modificar y evaluar el espacio del sistema propuesto de manera virtual antes de construirlo físicamente.

2.4 Instrumentación

Para el diseño del controlador, se propone usar Arduino Nano, ya que contiene las señales de entrada y salida suficientes para la cantidad de actuación que requiere la mano, además de su compacto tamaño y bajo costo.

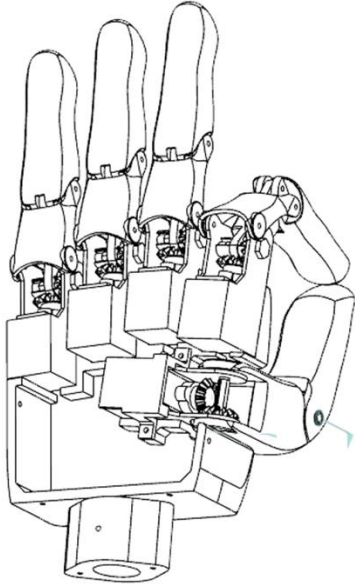


Figura 12: Diseño ensamblado de mano robótica en realidad virtual.

Sistema de control: Para la interacción entrada/salida de señales, se propone usar un módulo de desarrollo “Shield” para Arduino Nano, ya que proporciona pines para 14 entradas/salidas digitales, pines para 6 salidas PWM y pines para 8 salidas analógicas, permite controlar 6 actuadores de la mano, con alimentación externa y establecer la comunicación USB con la computadora para la interacción vía software.

Actuadores: Se propone los mini servomotores MG90S, ya que destacan por su directa relación de par-corriente, con un consumo constante de 200 [mA], y una alimentación de 6-9 [V] para la alimentación externa. Estos servomotores funcionan con la mayoría de tarjetas electrónicas con microcontroladores y además con la mayoría de los sistemas de radio control comerciales. Es utilizado principalmente en proyectos de robótica y modelismo de pequeña escala.

Fuente de alimentación: Se considera una fuente externa de 9 [V] y se recomienda de al menos 2000 [mA] de consumo en operación constante (en caso de usar una batería), para alimentar a los servos y a la placa de control.

Software: Arduino IDE es de uso libre, usando éste como interfaz de control de bajo nivel, ya que es posible realizar monitoreo de señales, con opción a co-comunicarse con MATLAB, o SIMULINK, en el caso de querer probar alguna diferente estrategia de control.

El diagrama electrónico de la mano puede verse en la figura 12, y el diagrama de sistema de control de la mano robótica se muestra en la figura 13.

3. Resultados

En esta sección se muestra el proceso de fabricación, construcción y ensamble real de la mano robótica, para validar la propuesta teórica, en espacio, ensamble, funcionamiento y movilidad de los mecanismos.

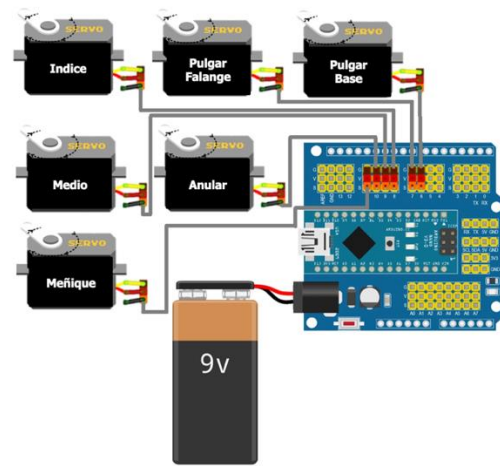


Figura 13: Diseño electrónico de mano robótica.

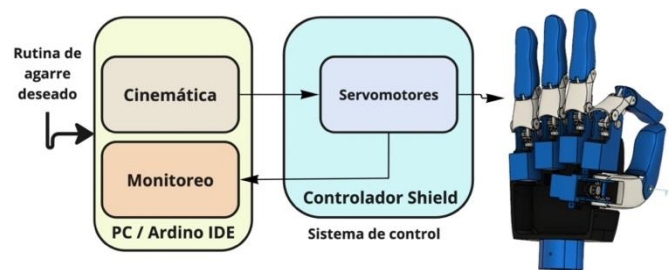


Figura 14: Esquema de control.

Impresión 3D de engranes de transmisión: Se fabrican 2 engranes helicoidales por dedo, y un tornillo especialmente diseñado para hacer sujeción y permitir movilidad de los dedos, como puede verse en la figura 15. Para esta propuesta se utilizó PLA al 50% de relleno hexagonal, lo cual, ha permitido buena resistencia en los puntos de articulación, como puede verse en la figura 16.

Simulación de falanges: De acuerdo con la Tabla 2 de Denavit-Hartenberg, la cinemática directa de la mano y el CAD resultante final, se realizan resultados de simulación de las falanges de la mano.

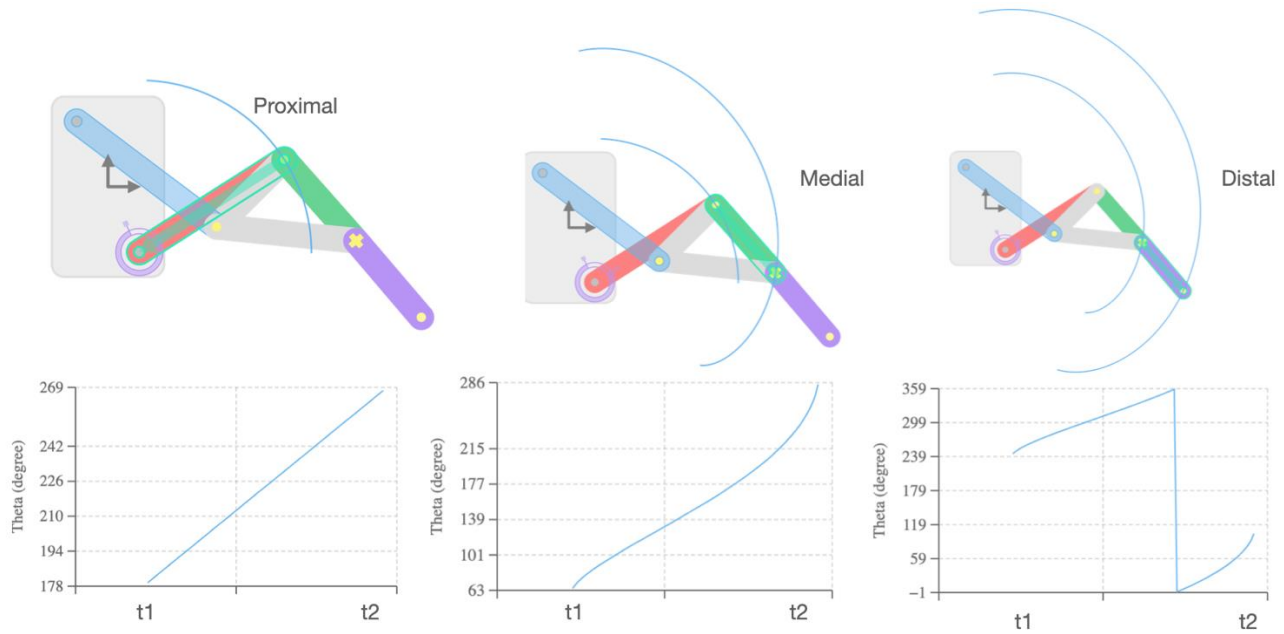


Figura 15: Ángulos y recorridos en simulación de las falanges de la mano.

Considerando que todos los dedos tienen las mismas distancias para las falanges, se muestra la simulación de un solo dedo, asumiendo que las posiciones resultantes, cinemática y movimientos de los dedos serían iguales para cada dedo. Los ángulos de flexión y extensión de las falanges se detallan en la sección 2.3.2, y los ángulos y recorridos de posición y movimiento de las falanges se muestran en simulación en la figura 15. Dichos resultados de simulación fueron realizados en el simulador de Software MotionGen (Lyu ,2023; Purwar, 2017). MotionGen es una plataforma de inteligencia artificial que se usa mediante un ambiente de simulación y diseño de mecanismos planos, actuación rotatoria y lineal, desarrollado por *Stony Brook University* y *Mechanismic Inc.* con la financiación de la *National Science Foundation*. Esta herramienta puede usarse vía internet y asiste a los usuarios en la configuración de mecanismos, longitudes, puntos de conexión y elementos de diseño de sistemas de transmisión y movimiento.

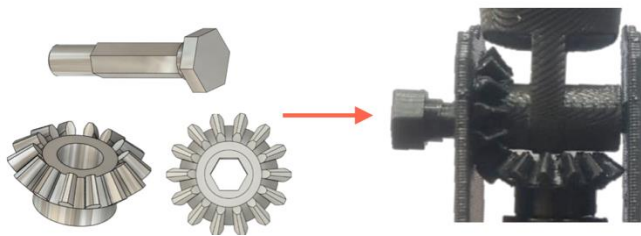


Figura 16: Impresión 3D, material PLA, de Falanges de la mano.

Impresión 3D de Falanges: Las falanges, se fabrican utilizando PLA al 30% de relleno hexagonal, lo cual, a permitido buena resistencia en los puntos de articulación con poco material de fabricación, y se ajustan según las especificaciones del diseño. Se realizan 12 piezas en total de las falanges, como se muestra en la figura 17.

Impresión 3D de palma: Se fabrican utilizando PLA y se ajustan según las especificaciones del diseño, cuidando las opciones de impresión como la expansión, ya que esto permite el ensamblaje y garantizar que no haya problemas en el movimiento de los dedos. La palma impresa se muestra en la figura 18.



Figura 17: Impresión 3D, material PLA, de Falanges de la mano.

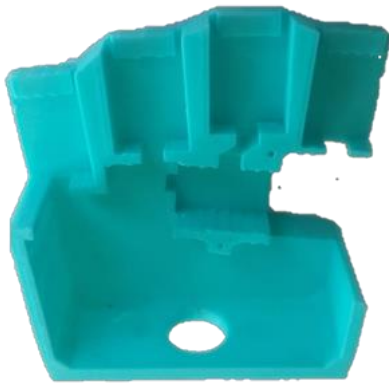


Figura 18: Impresión 3D, material PLA, de palma de la mano.

Ensamble de mano: Cada dedo tiene un engrane que se ajusta a la transmisión de flexión de falange proximales. Se ensambla mecanismo de falanges distales, en conjunto con las piezas de cada dedo, y finalmente se en la palma de la mano (ver figura 19). Los cables de los actuadores deben pasar a través de la muñeca.

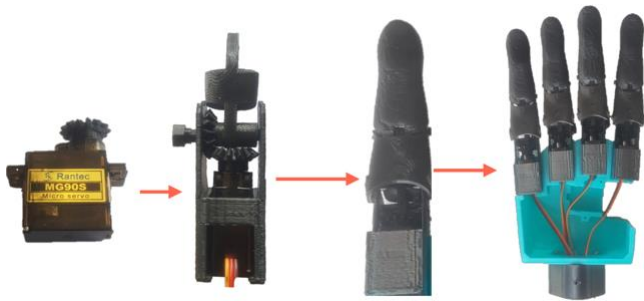


Figura 19: Ensamble de actuador en mecanismo de falanges y dedos.

Conexión de mano con propuesta electrónica:

Ensamble final de base con mano ensamblada, y falanges del pulgar, para que finalmente se pueda conectar al circuito electrónico, como se muestra en la figura 20.

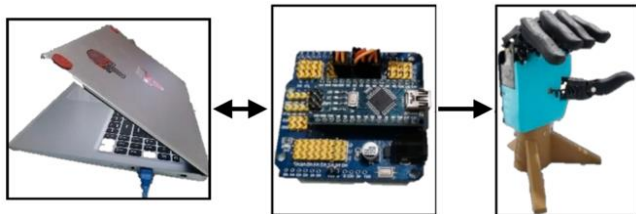


Figura 20: Ensamble final de mano robótica.

Pruebas de agarre: El rango de movilidad es muy similar a la propuesta teórica, lo que muestra que el diseño por manufactura aditiva resulta ser muy conveniente al momento de la fabricación de las piezas y el prototipado rápido de la mano. A continuación se muestra la rutina realizada de agarre en la figura 21, donde se prueban posiciones cilíndricas y se

mencionan las observaciones de la tarea realizada, para posteriormente abarcar la sección de discusiones.

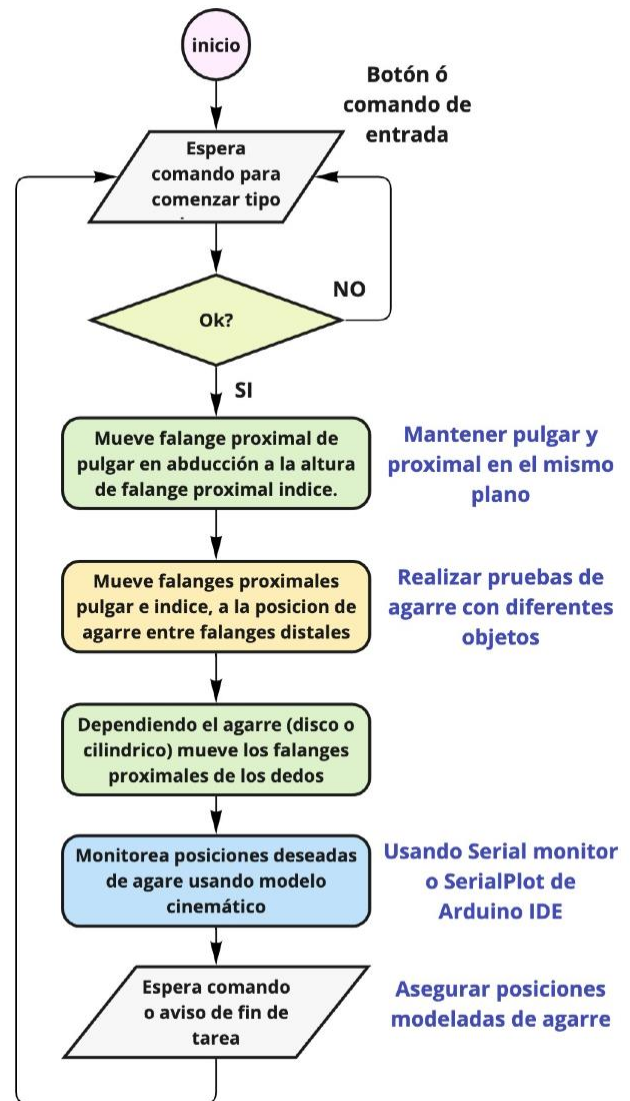


Figura 21: Diagrama de flujo de rutina de agarre.

Se prueban ambos tipos de agarre, dependiendo del objeto y se logra sujeción suave pero sin soltar el objeto (figura 22, inciso a). Para el agarre discal, una vez que la abducción del pulgar y la flexión proximal de la flange índice están en el mismo plano, se prueba diferentes grosores o distancias entre flexiones distales (ver figura 22, inciso b), y probar diferentes grosores para diferentes objetos.

Considerando que usamos servomotores, es posible obtener las posiciones deseadas sin problema como si fuera control en lazo abierto, ya que los servomotores mantienen un control en lazo cerrado que tiene relación directa entre voltaje mínimo (posición mínima de los dedos) y voltaje máximo (posición máxima de los dedos), sin embargo, si hay un obstáculo que impida el contacto entre distales, ese grosor (obstáculo), éste se verá reflejado en fuerza de agarre,

teniendo la combinación posición/fuerza. Por un lado, cabe mencionar que es una fuerza muy pequeña de agarre ya que los servomotores tienen un consumo continuo de corriente de hasta 200 [mA], lo que permite un agarre pero no una sujeción que pudiera doblar un material. Así, para un agarre de mucha fuerza se requeriría usar otro tipo de motores, y el control de corriente para tener la relación con la fuerza deseada. Por otro lado, la transmisión de PLA, comienza a modificarse con el uso de la transmisión, lo que genera backlash en las falanges, y debido a la deformación constante cuando los grosores son menores a 5 [mm], por ejemplo: una caja de cartón de max 5 [mm] de grosor, una hoja de papel, una tapa de plástico, y objetos parecidos. Por lo cual solo se ajustaron agarres (sin fuerza) de diferentes objetos ligeros por debajo del máximo grosor, pero usando una o más falanges para evitar la caída del objeto.

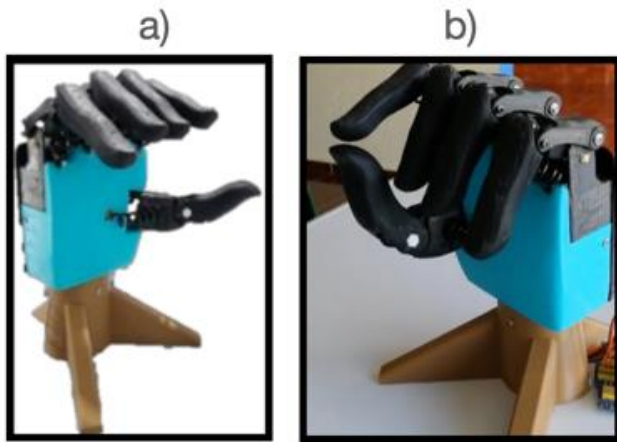


Figura 21: Tipos de agarre de sistema: a) agarre cilíndrico; b) Agarre discal.

Como trabajo a futuro, se busca tener sensores para las flexiones distales para probar nuevos agarres y fuerzas. Como primer acercamiento, se valida el mecanismo con agarre de diversos objetos, como puede verse en la figura 21. En estos experimentos, cuentan con posiciones específicas de falanges.

De esa forma, es posible tener diferentes agarres para otros tipos de objetos. Para dicho fin se hicieron los siguientes experimentos:

1. Considerar agarre discal de otras falanges además de las distales pulgar e índice, como en inciso a.
2. Se consideró una rutina de agarre discal para objetos de plástico regulares, donde a nueva modificación para lograr el agarre está en posicionar la proximal media.
3. Se prueban nuevos objetos con diferentes materiales, lo cual es posible obtener un agarre con posiciones proximales medias cercanas entre sí, generando más o menos fuerza por la posición final deseada.
4. Se probó un agarre discal de un trozo de papel, el cual tiene mayor dificultad por su grosor pequeño, ligero peso y facilidad de deslizarse entre los dedos. Por ello, se hicieron diversas pruebas de agarre donde las distales no choquen.

Finalmente, se propone como trabajo a futuro, perfeccionar las rutinas de agarre y más tareas o tipos de agarre para la mano diseñada.

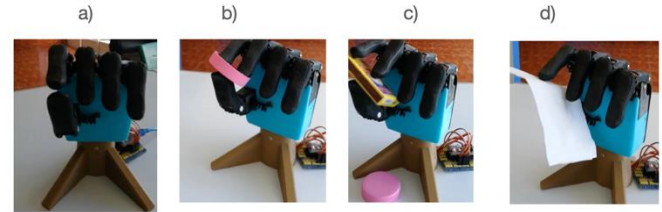


Figura 22: Experimentos de agarre discal: a) rutina de agarre con más falanges; b) Agarre discal de un objeto plástico; c) agarre discal de un objeto de cartón prismático; c) agarre discal de un objeto ligero y de mínimo grosor.

3.1 Aspectos financieros

Para esta propuesta de diseño frugal, se debe tener en cuenta el costo, la factibilidad, accesibilidad y aplicación en diferentes entornos. Se debe buscar un equilibrio entre rendimiento, de bajo costo y libre acceso de programación, teniendo en cuenta la eficiencia productiva y la disponibilidad de materiales. Los costos de fabricación de la mano como se presenta en este artículo se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Costo de fabricación y ensamble de mano robótica

Elemento	Cantidad	Costo [MXN]
Dedos (Índice, medio, anular, meñique) en PLA		
Falange proximal	4	\$ 60
Falange distal	4	\$ 100
Engranajes transmisión	8	\$ 80
Mecanismo	4	\$ 80
Dedo pulgar en PLA		
Piezas palma en PLA	2	\$ 125
Muñeca en PLA	1	\$ 40
Base de mano en PLA	1	\$ 60
Instrumentación		
Micro servomotor MG90S	6	\$ 540
Arduino NANO + cable USB	1	\$ 550
SHIELD expansión para Arduino NANO	1	\$ 100
Tornillería de ensamble	20	\$ 100
TOTAL		\$ 1835 .00

4. Discusión

Gran parte de la parte teórica de diseño y movilidad corresponde con realidad. Sin embargo, la mano tiene una sujeción suave en los agarres, sin soltar el objeto. El agarre es programado hasta ciertos puntos cinemáticos, es decir, no detecta de manera automática hasta donde mantener la flexión de las falanges. Si el usuario requiere fuerza y no manipulación, tendrá que hacer ajustes a este diseño.

Parte del enfoque frugal es lograr un dispositivo accesible de bajo costo, de libre programación con el menor recurso

posible, pero es posible balancear mejores elementos (aumento de costo) para fortalecer piezas o funcionamiento. Por ejemplo, los engranes a piezas de metal, ya que de PLA tiene una durabilidad menor y menor vida útil. Sin embargo, hacerlos de metal requerirá no solo más costo, sino una apropiada lubricación entre elementos de los mecanismos. Dado que la fuerza no ha sido objetivo del proyecto, sino la manipulación de las falanges, éste podría considerarse con posibles ventajas. Para obtener una evaluación completa y precisa, es importante considerar otros aspectos, como la precisión, la durabilidad, la eficiencia energética, la usabilidad y la seguridad, entre otros.

En esta propuesta de diseño, sólo es el comienzo del análisis de resultados, con pocos tipos de agarres, ya que otros requieren movibilidades más complejas y más independientes de las falanges, es decir, más actuadores, lo que puede debatirse con el costo, aumento de actuadores, variaciones al modelo cinemático, y más. Sin embargo, está contemplado como trabajo a futuro. Con respecto, a los engranes de transmisión, ya que, si aumentamos tamaño de los dientes, se tiene más fuerza de agarre, pero más backlash, y si disminuimos tamaño se tendrían más dientes, más precisión, pero menos fuerza (al menos en PLA), menos vida útil. Si cambiamos de material, esto repercutiría directamente en costo, peso, lo cual, hemos considerado PLA como parte inicial de un prototipado rápido de mostrar la movilidad del CAD y posteriormente ir analizando nuevas ventajas y desventajas, partiendo de esta referencia.

5. Conclusiones

Se presenta el diseño CAD y ensamble de una mano robótica, la cual se obtuvo mediante la aplicación de una metodología de diseño mecatrónico, proponiendo recursos y materiales que permitan repetibilidad, escalabilidad, libre programación y elementos asequibles como lo es el prototipado rápido a través de la impresión 3D, estando al alcance de la comunidad académica, estudiantes y profesores que deseen comenzar a estudiar sistemas robóticos de este tipo. Cumpliendo así con un diseño frugal de su tipo.

Se ha mostrado que mediante la aplicación de una metodología de diseño mecatrónico para obtener sistemas multidisciplinarios factibles. Se logra validar el diseño teórico mediante la fabricación y ensamble real, con los elementos de actuación y control propios para su funcionalidad.

6. Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la Universidad Politécnica de Atlacomulco, especialmente al Ing. Axel Zuriel Martínez Marín, por la construcción y pruebas experimentales de la mano robótica durante su Estadía profesional. También, se agradece el apoyo de la UNAM con el proyecto PAPIME PE104125.

7. Referencias

- Arias-Vanegas, V. A., et al. (2017). Innovación frugal: un nuevo paradigma de desarrollo sostenible en la base de la pirámide. de La base de la pirámide y la innovación frugal en América Latina, U. d. Zulia, Ed, 393-408.
- G. Cannata and M. Maggiali, "An embedded tactile and force sensor for robotic manipulation and grasping," 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005., Tsukuba, Japan, 2005, pp. 80-85, <https://doi.org/10.1109/ICHR.2005.1573549>.
- Galcerán Montaña, I. (2017). Estudio de la funcionalidad y eficiencia en el control y uso de prótesis mioeléctrica en niños y adolescentes. <http://hdl.handle.net/10115/14800>
- León, M. I. G. (2023). Avances de la robótica del desarrollo en el diseño de robots educativos empáticos. Educación, tecnología, innovación y transferencia del conocimiento, 149-162.
- López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfología*, 4(1). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/41933>
- Morelos, D. O. R., et al. (2019). Metodologías para diseño de prácticas didácticas en sistemas de control. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 12(11), 90-106. <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/9492>
- Lyu, Z., Purwar, A., and Liao, W. (December 15, 2023). "A Unified Real-Time Motion Generation Algorithm for Approximate Position Analysis of Planar N-Bar Mechanisms." *ASME. J. Mech. Des.* June 2024; 146(6): 063302. <https://doi.org/10.1115/1.4064132>
- Ortega, A. B., et al. (2018). Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales (design of mechatronic systems: virtual prototypes). *Pistas Educativas*, 40(130).
- Padilla-García, E. A., Cruz-Morales, R. D., González-Sierra, J., Tinoco-Varela, D., & Lorenzo-Gerónimo, M. R. (2024). Design, Assembly and Control of a Differential/Omnidirectional Mobile Robot through Additive Manufacturing. *Machines*, 12(3), 163. <https://doi.org/10.3390/machines12030163>
- Pérez Duque, L. M., & Abaunza Barón, L. P. (2022). Innovación frugal, cómo hacer más con menos. <https://hdl.handle.net/10614/14682>
- Purwar, A., Deshpande, S., and Ge, Q. J. (March 9, 2017). "MotionGen: Interactive Design and Editing of Planar Four-Bar Motions for Generating Pose and Geometric Constraints." *ASME. J. Mechanisms Robotics*. April 2017; 9(2): 024504. <https://doi.org/10.1115/1.4035899>
- Rodríguez Caycedo, L. C. (2021). Diseño de un prototipo de prótesis en impresión 3D del miembro anterior derecho de una canina.
- Sosa, J. V. G., & Carranco, S. M. G. (2023). Análisis de varianza en manufactura aditiva con impresión 3D. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 90(227), 167-175. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9119008>
- Zheng, C., Hehenberger, P., Le Duigou, J., Bricogne, M., & Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 28, 333-356. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00163-016-0243-2>

Diseño, manufactura y control de un péndulo invertido con volante inercial. Design, manufacturing and control of an inverted pendulum with an inertial flywheel

Erick Axel Padilla García ^a, Raúl Dalí Cruz Morales ^b, Gonzalo Hedain López Mera ^b, David Tinoco Varela ^b

^a Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

^b Departamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C), 54714, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México

Resumen

El péndulo invertido es uno de los sistemas utilizados para probar diferentes leyes de control y en el área académica es una herramienta para enseñar a los alumnos a sintonizar y calibrar las ganancias del control propuesto. En este artículo se presenta el diseño, desarrollo, construcción, ensamble y control de un péndulo invertido con volante inercial, el cual está enfocado a apoyar las labores académicas y que sea de arquitectura y software abierto para que pueda ser utilizado por cualquier estudiante o persona interesada en comprender las características de la variación de las ganancias en un control PID. Este modelo de péndulo presenta un reto adicional al controlar el volante inercial, y agrega un grado de libertad el cual hace más complejo el sistema y por lo tanto la dinámica de este. Cabe resaltar que se hace uso de una IA para ayudarnos a sintonizar el control PID. Todo esto es probado por medio de simulaciones en Matlab y con experimentos utilizando un prototipo construido utilizando manufactura aditiva.

Palabras clave: Control, PID, péndulo invertido, volante inercial.

Abstract

The inverted pendulum is a widely used system for testing different control laws, and in the academic field, it serves as an educational tool to teach students how to tune and calibrate controller gains. This article presents the design, development, construction, assembly, and control of an inverted pendulum with a flywheel, aimed at supporting academic activities. This system has been designed with open-source architecture and software, allowing its use by any student or individual interested in understanding the variations in gains of a PID control system. The proposed pendulum model presents an additional challenge due to the control of the flywheel, which adds a degree of freedom, making the system and its dynamics more complex. Furthermore, the use of artificial intelligence is highlighted to assist in tuning the PID controller. All these developments are tested through simulations in MATLAB and experiments carried out with a prototype built using additive manufacturing.

Keywords: control, PID, inverted pendulum, inertial flywheel.

1. Introducción

El control de sistemas lineales y no lineales ha sido estudiado como parte de las estrategias de control (Kuo, 1996), los cuales necesitan ser probados y analizados no solo de manera teórica, si no también, de forma experimental (Merli, 2018), por ese motivo, el péndulo invertido es uno de los sistemas no lineales más utilizados para este fin, en materias como dinámica de sistemas físicos, teoría de control y análisis de sistemas. Ya que, a pesar de su naturaleza no lineal, su comportamiento modelado matemáticamente de

forma sencilla y bajo ciertas premisas puede obtenerse un sistema lineal y ser estudiado localmente, pero también se pueden realizar adecuaciones al péndulo y modelarlo de manera no lineal para obtener leyes de control complejas y poder comprobar de manera práctica lo modelado matemáticamente en un sentido u otro. Por lo tanto, es un buen sistema dinámico para estudiar la parte teórica y comprobarla con un prototipo experimental que abarca la parte académica, tanto a sistemas lineales (Salgado, 2005) como no lineales (Seron, 2000).

*Autor para la correspondencia: rdcruz@comunidad.unam.mx

Correo electrónico: rdcruz@comunidad.unam.mx (Raúl-Dalí Cruz-Morales), gonzalosieben@gmail.com (Gonzalo Hedain López-Mera), erick.padilla@upatlacumculco.edu.mx (Erick Axel Padilla-García), rd-cruz@comunidad.unam.mx (Raúl Dalí Cruz-Morales) y dativa19@hotmail.com (David Tinoco-Varela).

Historial del manuscrito: recibido el 27/10/2024, última versión-revisada recibida el 12/12/2024, aceptado el 16/12/2024, publicado el 08/04/2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15132487>



El péndulo invertido es un sistema dinámico completo, el cual está compuesto por una varilla rígida y una masa en un extremo, mientras que el otro extremo está conectado a un dispositivo que puede controlar su giro, normalmente un motor eléctrico, este dispositivo es el que inyecta la energía o fuerza para mantener en su posición a la masa. Adicionalmente, se puede agregar otro grado de libertad y por lo tanto mayor complejidad, si se pone este péndulo invertido sobre un vehículo en movimiento (Guerra, 2019), con lo cual ahora al desplazar al vehículo, este enviará la energía hacia el péndulo para mantener su verticalidad. En los años 70's Katsuhisa Furuta, se dio cuenta de que la distancia que recorría el vehículo tendría que limitarse al realizar experimentos físicos, por lo cual no siempre era conveniente utilizar una base que se desplazará linealmente e inventó el péndulo invertido de Furuta (García, 2015), el cual consta de un brazo que gira sobre una base y al extremo de ese brazo se coloca el péndulo invertido, con lo cual ahora no hay un desplazamiento lineal y se evitan las limitaciones de las distancias, pero se añade complejidad al tener que estudiar las fuerzas centrífugas y de Coriolis que aparecen en este nuevo sistema dinámico (Aracil, 2005).

Este sistema es relativamente sencillo de fabricar y muy versátil, ya que se le pueden agregar más grados de libertad o complejidades de manera simple, la primera de ellas es intentar controlar el péndulo desde su estado de reposo, hasta una posición vertical invertida y mantenerlo ahí (Masante, 2016), esto no resultaba sencillo, ya que necesitaba de leyes de control suaves o que fueran capaces de intercambiar la parte de control para iniciar el movimiento de la masa hasta que pasara a la posición invertida y de ahí una ley que controlara la masa en su punto de equilibrio inestable, adicional a esto, se puede agregar un volante de inercia en su extremo, en lugar de una masa fija, y controlar tanto el giro del volante de inercia como el del péndulo para lograr el equilibrio del sistema de manera global y no solo localmente (Escobar-Dávila, 2013).

Existen diversos métodos de control para enfrentarse al problema de controlar el péndulo invertido, uno de ellos es el método clásico que se basa en la retroalimentación de estados (Sanabria, 2009), es decir, debe haber un sensor que indique la posición actual del péndulo y retroalimentar esta señal para generar el control, los estados generados pueden ser parciales y la retroalimentación se adecua para el control del tipo de péndulo que se esté estudiando.

Otro método es el de control basado en la energía, en dónde se modela la energía de la naturaleza que se ocupa para la rotación, translación, gravedad, cinética, potencial, etc. Donde se analiza el consumo energético del sistema y se modela el sistema con base en métodos Hamiltonianos o de Lagrange (Hernández Largacha, 2012) y se realiza un moldeado de la energía para que el control sea desarrollado y se obtenga el objetivo de controlar el péndulo invertido.

El control por lógica difusa (Kouro, 2002) es otro método que se utiliza para el control de este tipo de sistemas, donde se crea una relación con los elementos del sistema y el comportamiento que estos deben realizar, para lo cual se

utilizar conjuntos de frontera que no están definidos claramente, es decir, las definiciones son “difusas” y se ocupan reglas de comportamiento que siguen la lógica de que si ocurre un evento, entonces se debe actuar de cierta forma, pero si el evento cambia, también la respuesta va actuar de forma diferente.

De esta manera se vislumbra la importancia y versatilidad de este sistema, el cual ocupa poco espacio y puede ser utilizado para diseñar distintas leyes de control. Por lo cual, se pretende realizar un diseño desde cero de un péndulo invertido el cual utilice software y hardware abierto (Lazalde, 2015), con la finalidad de que pueda ser replicado por cualquier institución de educación o persona interesada y fabricado para que sea utilizado a nivel académico, de forma sencilla, didáctica y gratuita.

Con respecto al uso de las IA, en la literatura puede ver su uso para consulta, tutoría y hasta referencias de construcción de dispositivos y explicación de las diversas estrategias de control, sin embargo, no se han registrado su uso en la sintonización directa del control, dejando que la IA tome decisiones de las señales de control y además probadas de manera experimental. Por ello, en este trabajo se presenta una opción reproducible de libre acceso y libre programación donde es posible experimentar con el uso de la IA en el momento de establecer valores de las diversas estrategias de control, lo cual podría ser referencia para el uso de herramientas de IA en la toma de decisiones de control.

En el presente trabajo se realiza el prototipo de un péndulo invertido con volante de inercia, el cual se diseña en un programa CAD, después se fabrica con un equipo de manufactura aditiva (impresión 3D) y se desarrolla la electrónica y leyes de control adecuadas para controlar el péndulo en forma invertida y probar su estabilidad de manera global. El trabajo se presenta de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan los materiales y método a utilizar para la creación del prototipo, manufactura, ensamble y control de este, además de presentar la modelación matemática del sistema, se muestran simulaciones numéricas del comportamiento de la ley de control diseñada. La sección 3 muestra los resultados obtenidos de manera experimental con el prototipo fabricado y la ley de control aplicada al sistema. La sección 4 da pie a la discusión de los resultados, mostrando la sencillez de poder replicar lo presentado en este trabajo y que puede llegar a ser de mucha utilidad en la vida académica de las universidades o centros de enseñanza. Por último, las conclusiones de presentan en la sección 5

2. Materiales y Método

Para la realización del prototipo de péndulo invertido aquí presentado, se utilizan diversos materiales, el primero de los cuales y que es de vital importancia, es un motor de corriente directa sin escobillas (*brushless*) con un voltaje de trabajo de 9V, modelo A2212 de la marca Tecneu, los motores *brushless* como este, necesitan un controlador de velocidad electrónico (ESC), que utiliza retroalimentación de la posición del rotor del motor para controlar el flujo de la corriente que atraviesa las bobinas del estator. Este controlador ESC se utiliza para el

control de la velocidad del motor, el método que utiliza es mediante la modulación de ancho de pulso (PWM) el cual proporciona un control de velocidad más preciso y también ayuda a reducir el consumo de energía y el desgaste del motor, el modelo de este controlador es el ESC30A, el cual soporta hasta 15 A de corriente máxima.

Adicionalmente se necesita un giroscopio y acelerómetro para poder obtener las velocidades y aceleraciones del péndulo invertido, para esto se optó por utilizar un sensor de movimiento que incluye ambos dispositivos en una sola tarjeta electrónica cuyo modelo es MPU-6050, esta tarjeta cuenta con un acelerómetro que es capaz de medir la aceleración lineal en los tres ejes coordenados y un giroscopio que mide la velocidad rotacional también en los tres ejes, de manera individual; cuenta además con una comunicación tipo I²C y SPI, las cuales tienen ciertas diferencias, mientras que la comunicación I²C es muy buena para enviar datos pequeños, a un bajo pin y baja velocidad, la comunicación SPI es recomendada para enviar datos grandes, a baja latencia y una alta velocidad. Este dispositivo es utilizado como el sensor de velocidad y aceleración del péndulo y de esta forma poder obtener las posiciones del mismo.

Como parte central del control se utiliza la tarjeta de desarrollo Arduino UNO rev3, la cual consta de un microcontrolador ATmega328P, cuenta con 14 pines de entrada/salida digital, 6 de los cuales pueden ser utilizados como salidas PWM, además tiene 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, y puede ser alimentada por USB o conector de 5V.

Como elemento final se adquirió un rodamiento mecánico que permite el movimiento rotacional relativo entre dos piezas de diámetro de 8 mm.

2.1. Diseño del péndulo invertido

Para el diseño del péndulo invertido, se trabajó con el software SolidWorks 2023 con licencia educativa, en el cual se dibujaron los modelos CAD del brazo del péndulo y el volante de inercia que se muestran en la figura 1.

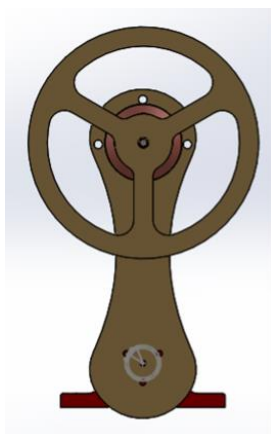


Figura 1: Vista frontal del péndulo invertido con volante de inercia diseñado en SolidWorks.

Al ser diseñado desde cero, se conocen las características geométricas, la longitud del brazo del péndulo es $L=15$ cm y el diámetro total del volante de inercia es $D=8$ cm.

Una vez realizado el diseño en CAD, se guarda la imagen en formato STL el cual se pasa al software Ultimaker Cura 5.7.1 para obtener el código G y M que necesita la impresora 3D para manufacturar ambas piezas.

La impresora 3D utilizada para imprimir el péndulo invertido es de la marca Flashforge, con un volumen de trabajo de 280x250x300 mm, una velocidad máxima de impresión de 100 mm/s, y es capaz de imprimir materiales como PLA, PET-G, ABS, entre otros. En la Figura 2 se muestra el proceso de impresión del péndulo invertido y el volante de inercia.



Figura 2: Impresión del volante de inercia en la impresora Flashforge.

Una vez impresos tanto el brazo como el volante de inercia se ensamblan y se conectan al circuito electrónico previamente desarrollado.

2.2. Modelo matemático del péndulo invertido

Para modelar matemáticamente al péndulo invertido, se utiliza el método de la energía de Euler-Lagrange. Por lo cual lo primero es identificar las variables a utilizar, para esto, se toma como referencia la Figura 3.

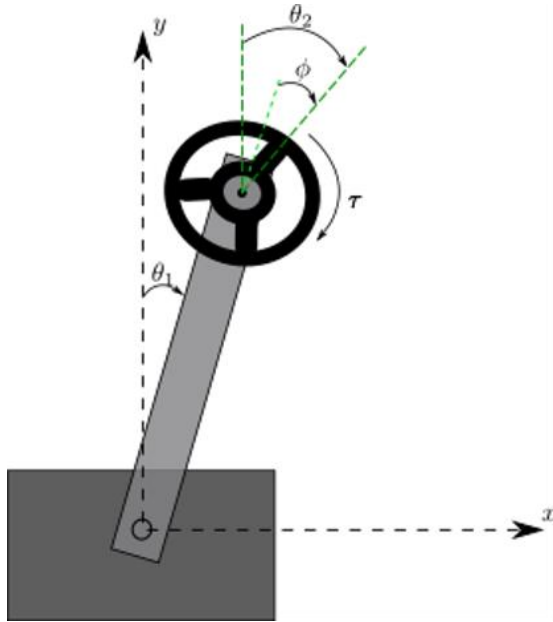


Figura 3: Diagrama del péndulo invertido con volante de inercia.

Donde, θ_1 es el ángulo entre el brazo del péndulo y el eje Y del marco de referencia, θ_2 es el ángulo del volante de inercia y el eje Y, ϕ es el ángulo relativo entre el eje del brazo y el del volante de inercia y τ es el torque que da el motor que mueve el volante de inercia.

A partir de la Figura 3, se obtiene la ecuación,

$$J = J_p + m_p J_p^2 + m_r J_r^2 \quad (1)$$

Donde J es el momento de inercia total del sistema, J_p es el momento de inercia del péndulo, J_r es el momento de inercia del volante de inercia, m_p es la masa del péndulo y m_r es la masa del volante de inercia. Para obtener la ecuación de la energía, se ocupa el Lagrangiano (Patete, 2011),

$$L = E_c - E_p \quad (2)$$

Donde E_c es la energía cinética y E_p es la energía potencial del sistema, por lo tanto,

$$E_c(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) = \frac{1}{2} J_p \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_2^2 \quad (3)$$

y la energía potencial está dada por,

$$E_p = mgl(1 + \cos \theta_1) \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en (2), se obtiene,

$$L = \frac{1}{2} J_p \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_2^2 - mgl(1 + \cos \theta_1) \quad (5)$$

Que es la ecuación de la energía del sistema del péndulo invertido considerando un volante de inercia.

2.3. Obtención de la ley de control para el péndulo invertido

A partir de la ecuación (5) se pueden obtener las ecuaciones de movimiento del sistema del péndulo invertido con un volante de inercia. Para lo cual, se tiene,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -\tau \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \tau \quad (7)$$

Realizando las derivadas correspondientes y sustituyendo, se obtiene,

$$J \ddot{\theta}_1 - mgl \sin \theta_1 = -\tau \quad (8)$$

$$J_r \ddot{\theta}_2 = \tau \quad (9)$$

Donde m es la masa del sistema, g la gravedad, l la longitud del péndulo y τ el torque del motor a utilizar. Para conocer el torque del motor eléctrico, se sabe que está directamente relacionado con la corriente que consume el motor, por lo tanto, la ecuación que rige esto es,

$$\tau = ki \quad (10)$$

Donde k es la constante del motor proporcionada por el fabricante e i es la corriente que consume el motor. Sustituyendo (10) en las ecuaciones (8) y (9) se tiene,

$$\ddot{\theta}_1 - \frac{mgl}{J} \sin \theta_1 = -\frac{k}{J} i \quad (11)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{k}{J_r} i \quad (12)$$

Para realizar el control de este sistema, se propone,

$$u = k_u \tau = k_u ki \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en (11) y (12), se obtiene,

$$\ddot{\theta}_1 - a \sin \theta_1 = -bu \quad (14)$$

$$\ddot{\theta}_2 = cu \quad (15)$$

A este sistema se le aplica un control PID para poder mantener la posición vertical invertida por parte del péndulo y el volante de inercia. Con,

$$e_1 = \theta_{1d} - \theta_1 \quad (16)$$

$$e_2 = \theta_{2d} - \theta_2 \quad (17)$$

Donde e_1 y e_2 son los errores del sistema

Simulación numérica.

En esta subsección se presentan las simulaciones realizadas y también los resultados obtenidos experimentalmente con el péndulo invertido realizado.

La simulación numérica se realiza en el software MATLAB versión R2024a instalado en una computadora con procesador Intel CORE I7, 16 Gb de memoria RAM.

```
%% parametros del sistema mecanismo
l=0.015; % longitud
lc1=L/2; %mitad de longitud
R=0.008; % radio del volante
g=9.81; % gravedad
b1=0.01; % amortiguamiento
m1=0.01; % masa en Kg
b2=0.01; % amortiguamiento
m2=0.05; % masa en Kg

%% 3. parámetros del sistema del motor
Jm=542e-6; % Inercia del rotor Kgm2
Kb=102*(2*pi/60); % Constante Velocidad-Voltage de rpm a rad/s
Ka=93.4e-3; % Constante Par-corriente Nm/A
Rm=0.608; % Resistencia del motor Ohms
Lm=0.423e-3; % Inductancia del motor H
bm=0.001; % fricción viscosa (amortiguador)
```

Figura 4: Parámetros del péndulo invertido, volante de inercia y motor eléctrico.

En la Figura 4 se muestran los parámetros del sistema péndulo invertido con volante de inercia, los cuales fueron obtenidos a partir de la composición del material con el que fueron elaborados, tanto el péndulo como el volante de inercia son del material PLA y el peso fue obtenido con una báscula, además los parámetros del motor eléctrico se obtuvieron directamente del fabricante. Los resultados de la simulación realizada, se muestran a como sigue, la simulación general del comportamiento en el plano X-Y del péndulo invertido se presenta en la Figura 5, mientras que en la Figura 6 se presenta la posición del péndulo invertido, la velocidad que alcanza para ponerse en posición vertical invertida es presentada en la Figura 7, en la Figura 8 se presenta la velocidad que alcanza el motor eléctrico conectado al volante de inercia, por último la figura 9 muestra la corriente que consume este motor.

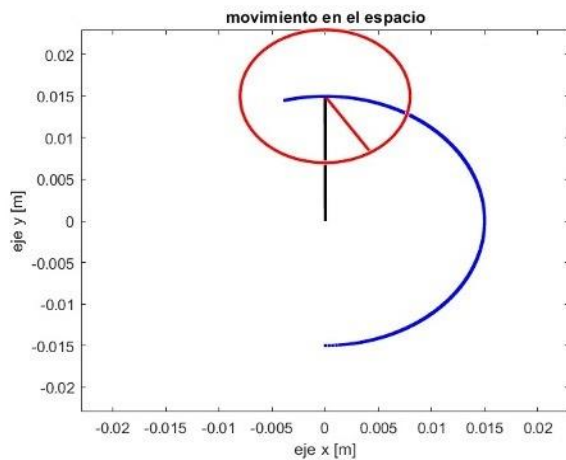


Figura 5: Parámetros del péndulo invertido, volante de inercia y motor eléctrico.

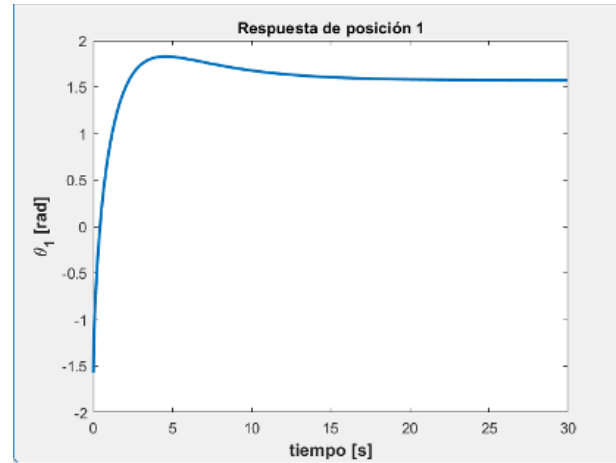


Figura 6: Posición del péndulo invertido.

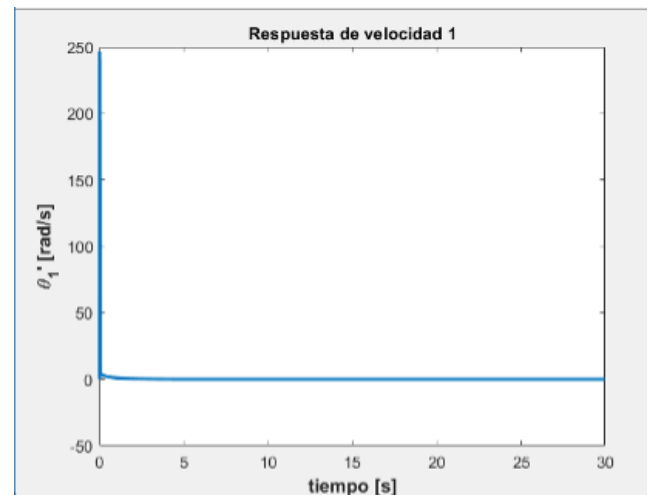


Figura 7: Velocidad de respuesta del péndulo invertido.

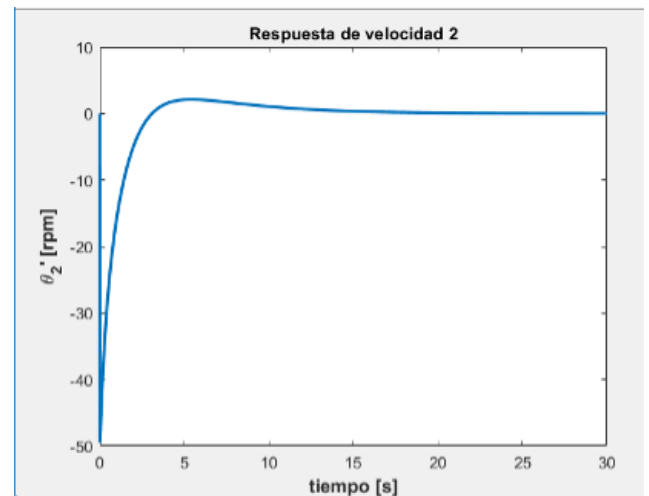


Figura 8: Velocidad del motor conectado al volante de inercia.

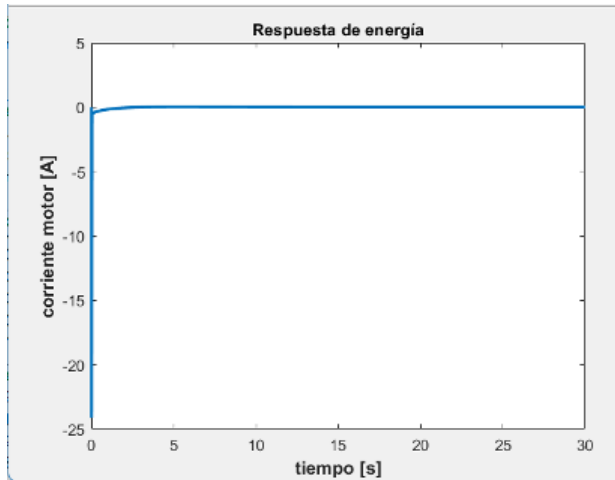


Figura 9: Corriente consumida por el motor eléctrico del motor de inercia.

2.4. Resultados experimentales.

Se propone una plataforma experimental de libre programación, reproducible y escalable mediante manufactura aditiva en un área de impresión de 280x250x300 [mm], a una velocidad máxima de impresión de 100 [mm/s], con materiales como PLA, PET-G, ABS. Para ello, cabe mencionar que los pesos, dimensiones, tamaños tanto del péndulo como del volante fue una constante revisión y combinación entre los resultados de simulación, asegurándonos que matemáticamente el control del volante tenga efecto en el movimiento del péndulo, dando como resultado una longitud del brazo del péndulo es $L=15$ [cm] y el diámetro total del volante de inercia es $D=8$ [cm]. Para la instrumentación de la plataforma se cuenta con un Arduino UNO, un motor BLDC de 12 [V] sin escobillas, con una potencia nominal de 70 [W] a 1000 rpm y un peso de 0.047 [Kg] con un controlador tipo ESC, muy usado en sistemas aéreos autónomos tipo Drone. Para medir el punto deseado de control, se instaló un sensor tipo IMU con acelerómetro y giroscopio tipo MPU-5060, el cual se comunica con Arduino a través del bus I2C o SPI.

Para los experimentos, se usó el software de Arduino IDE, con un tiempo de muestreo de 200 microsegundo, suficiente para ejecutar la ley de control, obtener las señales angulares de la IMU (calibrada) a través de I2C. El objetivo es iniciar en una posición de equilibrio estable de $-\frac{\pi}{2}$, partiendo del reposo, y mediante rotaciones en el volante inercial levantar el péndulo y mantenerlo en regulación en el punto de $\frac{\pi}{2}$, es decir, cuando el péndulo se encuentra de manera vertical, de tal forma que mediante la ley de control de volante permita la regulación del péndulo en tiempo $t \geq 0$, como puede verse en la Fig. 5. Para ello, se propone el uso de un controlador PID, ya que es el controlador más usado en la industria, y muestra robustez ante ligeras perturbaciones en el péndulo, manteniéndolo en el punto deseado de regulación.

En las Figuras 10 y 11 se muestra la plataforma experimental realizada, tanto en reposo como en movimiento.

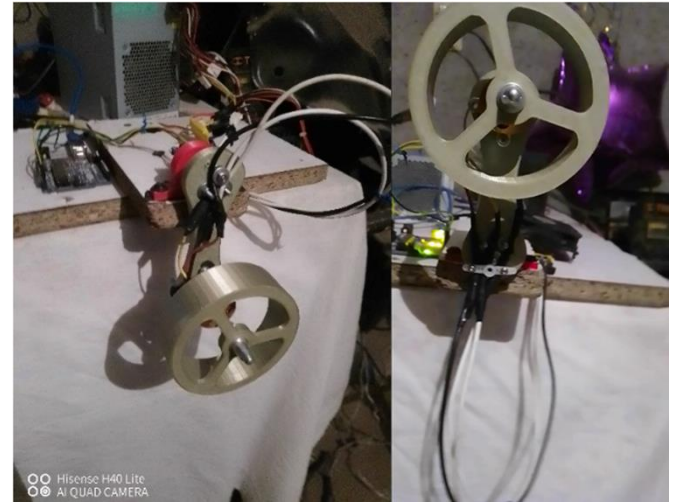


Figura 10: Plataforma experimental del péndulo invertido con volante de inercia.

Es sabido que MATLAB cuenta con herramientas de Autotune para sintonizar el controlador PID, sin embargo, de manera experimental estos efectos podrían variar debido a factores externos, términos no modelados presentes, perturbaciones, ruido eléctrico, etc. Por ello, usamos una IA que nos ayude a proponer ganancias para el controlador PID que puedan ayudar al comportamiento real, obteniendo la comparación en la Tabla 1. De dicha tabla, se presenta una propuesta heurística con la cual se podía ver regulación en estado estable. Posteriormente, se usó la herramienta de Autotune de MATLAB, sin embargo, se observaba un mejor comportamiento solo usando la ganancia K_P en un valor de 20. Sin embargo, de manera experimental, es posible usar cualquier IA de acceso libre de la web, como puede ser Poe, Assistant, GPT-4o y en cualquiera de ellas (que reconozca el código de MATLAB) es posible preguntar por una mejora de sintonización. Nosotros usamos GPT-4o con la pregunta “De este código, sintoniza las ganancias PID de control, para mejorar el comportamiento experimental del sistema” arrojándonos como respuesta, las ganancias mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Métodos de sintonización usados para control PID

Método	K_p	K_d	K_i
Heurístico	15	0.01	0.1
Autotune MATLAB	20	0	0
Usando IA	20	1	5

Los resultados obtenidos y el comportamiento del péndulo pueden verse en la figura 11, donde adicionalmente se presenta las señales obtenidas a través del puerto COM del Arduino, en el cual se puede observar que el control mantiene cerca del punto de estabilidad vertical al péndulo, realizando

las acciones de control necesarias alrededor de ± 0.14 [rad] (± 8 [deg]) del error de posición en estado estable.

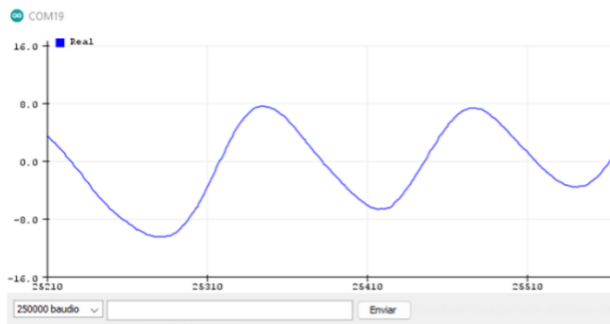


Figura 11: Resultados experimentales de posición del péndulo invertido en grados.

3. Discusión

Se presentan resultado preliminares del control PID aplicado a un péndulo invertido con volante de inercia, el cual fue diseñado con elementos de bajo costo, arquitectura abierta y software libre, con la finalidad de poder ser replicado por cualquier persona interesada en el tema y particularmente por académicos o entidades académicas que tengan que ver con el área de ingeniería y específicamente con temas de dinámica de sistemas físicos, teoría de control, robótica y mecatrónica, entre otros.

Los resultados obtenidos de manera experimental fueron realizados con el apoyo de una inteligencia artificial (IA) para poder sintonizar de manera más eficaz las ganancias del controlador PID, con lo cual también se comienza a experimentar el uso de la IA, aunque sea en pequeños detalles del desarrollo de las leyes de control. Estas ganancias fueron ingresadas al programa MATLAB y con pocos ajustes por parte del programador, se obtuvo una respuesta suave y rápida del controlador.

Cabe mencionar que la IA ha sido utilizada como apoyo, y no como un generador de controlador con ganancias. Es decir, ya se había realizado el proceso de sintonización de manera heurística hasta lograr una regulación dentro del 5% de error en estado estable, sin embargo, de manera experimental, el uso de solo usar K_p , se tienen vibraciones, ruido eléctrico y esfuerzo en el motor que nos se logra ver en simulación. También usamos herramientas como Autotune de MATLAB, sin embargo, seguíamos sin usar el termino derivativo e integral del control. Así, usando una IA como Assistant, Poe o GPT-4o se propone una sintonización que pudiera ser ejecutada de manera experimental, basada en los resultados obtenidos anteriormente.

Una vez concluidas las simulaciones, se procedió a aplicarlo a un sistema físico real del péndulo invertido, en dónde a pesar de no obtener la misma respuesta que se vio en las simulaciones prestadas en la Figura 5, ya que en el prototipo real, el péndulo queda en su punto de estabilidad pero aún realizando acciones de control constantes para poder mantener la verticalidad, la respuesta obtenida es satisfactoria y nos permite seguir mejorando el sistema y en un futuro

agregar variables a la ecuación para poder controlar de una forma más eficiente el péndulo invertido.

Un tema importante de impacto en discusión es justamente el uso de las IA en el campo de la educación y la investigación de control de sistemas, ya que mediante plataformas como la propuesta (libre acceso, programación, reproducible) es posible entrar en el campo de la innovación frugal, la cual destaca el máximo aprovechamiento de la innovación con los mínimos recursos posible al alcance de todos, es decir, con total acceso en el campo de la educación. Esto también puede generar gran impacto en las pruebas experimentales de diversas estrategias de control, ya que en este caso la IA tuvo decisión directa del control, mostrando un resultado favorable, siendo la sintonización heurística del PID un proceso que puede ser tedioso al encontrar un buen conjunto de valores que permitan un comportamiento deseado, pero con una constante oportunidad de mejora.

4. Conclusiones y trabajo futuro

El estudio de la dinámica de los sistemas físicos y su control, son temas muy utilizados en la academia, por lo cual se necesitan sistemas simples y de bajo costo para poder ser utilizados en la enseñanza de las nuevas generaciones.

En el presente documento se presentó el diseño desde cero de un péndulo invertido con volante de inercia, se derivaron sus ecuaciones de movimiento y se implementó físicamente el control. Las simulaciones realizadas, se basan en datos reales tanto de peso, dimensiones, características de amortiguamiento, inercia y fricción de los elementos que componen el péndulo, y con estos datos muestran una respuesta adecuada y que cumple con el objetivo de control de mantener al péndulo en su punto de equilibrio vertical de manera global, esta respuesta se logra sintonizando de manera adecuada las ganancias, lo cual fue hecho con apoyo de la IA para tener un rango más cercano a la sintonización correcta del sistema con estas características específicas.

Por otro lado, como trabajo futuro queda el mejorar el prototipo y ajustar el control de este y la respuesta del movimiento del volante de inercia para que la respuesta sea más cercana a las simulaciones realizadas y el péndulo quede en su punto de equilibrio de forma más estable.

5. Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la UNAM con el proyecto CI2446.

6. Referencias

- Aracil, J. &. (2005). El péndulo invertido: un desafío para el control no lineal. . *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 2(2), 8-19.
- Escobar-Dávila, L. F.-G.-B. (2013). Control global del péndulo de furuta empleando redes neuronales artificiales y realimentación de variables de estado. *Tecnológicas.*, (30), 71-94.

- García, G. T. (2015). Control de un péndulo de furuta. Una revisión del estado del arte. *Scientia et technica*, 20(4), 326-334.
- Guerra, R. (2019). *Control de péndulo invertido sobre carro móvil*.
- Hernández Largacha, A. L. (2012). *Control inteligente del péndulo invertido*.
- Kouro, S. &. (2002). Control mediante lógica difusa. *Técnicas Modernas en Automática*, 1, 1-7.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Pearson Educación.
- Lazalde, A. T.-V. (2015). *Hardware: ecosistemas de innovación y producción basados en hardware libre*.
- Masante, A. E. (2016). *Servomecanismos: control de péndulo invertido*.
- Merli, G. O. (2018). Ecuaciones diferenciales de la física clásica. Interpretación y solución mediante dinámica de sistemas. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 51-58.
- Patete, A. A. (2011). Control de un péndulo invertido basado en un modelo reducido. . *Revista Ingeniería UC*, 18(1), 12-22.
- Salgado, M. E. (2005). *Análisis de sistemas lineales*. . Pearson Educación.
- Sanabria, C. A. (2009). Control de un péndulo invertido simple por métodos de realimentación de estados. . *Tecnura*, 59-69.
- Seron, M. M. (2000). *Sistemas no lineales*. Departamento de Electrónica. Universidad Nacional de Rosario.

Algoritmo para la detección de URL's maliciosas y legítimas utilizando máquinas de vectores de soporte (SVM)

Algorithm for detecting malicious and legitimate URLs using support vector machines (SVM)

Dylan Alejandro Fernández Molina ^{a,b}, Arturo Hernández Martínez ^{a,b}, Jimena Meléndez Ramírez ^{a,b}, Juan Manuel Stein Carrillo ^{a,b}

^a Centro de Cooperación Academia-Industria, Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

^b División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

Resumen

Este estudio propone un enfoque basado en Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) para la detección de URL's maliciosas, abordando un problema crítico en ciberseguridad. Se utilizaron repositorios públicos de URL's benignas y maliciosas para entrenar y evaluar el modelo. La metodología incluyó la selección y preprocesamiento de datos, el entrenamiento con diferentes configuraciones de SVM (kernels lineal, polinómico y RBF), y la evaluación del rendimiento mediante métricas como el F1 Score. Los resultados muestran que el modelo basado en SVM alcanzó una alta precisión en la clasificación de URL's, destacándose especialmente con el kernel RBF. Estos hallazgos confirman la efectividad de SVM en la detección de amenazas cibernéticas y sugieren su integración en sistemas de seguridad automatizados.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Ciberseguridad, Detección de Ataques, Máquinas de Vectores de Soporte, Phishing, Malware.

Abstract

This research examines the use of artificial intelligence (AI) in the field of cybersecurity, offering a comprehensive perspective on how advanced AI methods can enhance protection against cyber threats. The fundamentals of cybersecurity are reviewed, emphasizing their importance in safeguarding data and systems. The methodology of AI, specifically Support Vector Machines (SVM), is analyzed for its effectiveness in detecting attacks. Types of threats such as phishing and malware are also examined. To assess the practical effectiveness of these methods, experiments were conducted using public data repositories. The results indicate that SVM, among other techniques, can significantly improve the detection and response to cyber threats. This research highlights the critical role of AI in the evolution of cybersecurity and suggests future directions for research and application in this vital field.

Keywords: Artificial Intelligence, Cybersecurity, Attack Detection, Support Vector Machines, Phishing, Malware.

1. Introducción

La información que se presenta a continuación detalla las características contenidas en los repositorios almacenados en archivos CSV. Cada una de estas características se utiliza para analizar y clasificar los diferentes tipos de ataques cibernéticos. Esta clasificación es esencial para que los

analistas de seguridad comprendan mejor el funcionamiento de estos ataques y puedan desarrollar estrategias basadas en inteligencia artificial (IA) para prevenir y mitigar su impacto. Los repositorios incluyen un amplio conjunto de datos que cubren múltiples tipos de amenazas cibernéticas, como URL's benignas, URL's de spam, URL's de phishing, URL's de malware y URL's de desfiguración. A través del análisis detallado de estas características, es posible identificar

*Autor para la correspondencia: 202021090@tese.edu.mx

Correo electrónico: 202021090@tese.edu.mx (Dylan Alejandro Fernández Molina), 202020600@tese.edu.mx (Arturo Hernández Martínez), 202020153@tese.edu.mx (Jimena Meléndez Ramírez), jmsteinc@tese.edu.mx (Juan Manuel Stein Carrillo)

patrones y comportamientos que distinguen a cada tipo de amenaza. Esta comprensión profunda permite a los profesionales de la ciberseguridad implementar medidas proactivas y reactivas más efectivas. Además, el uso de técnicas de IA y aprendizaje automático (machine learning) basadas en estos datos proporciona una herramienta poderosa para la detección anticipada y la reacción inmediata ante los ataques. Los modelos de IA pueden entrenarse con estos repositorios para reconocer señales sutiles de actividades maliciosas y adaptar continuamente sus estrategias a medida que evolucionan las amenazas.

En la era digital actual, la ciberseguridad ha emergido como un tema de vital importancia debido al aumento constante de amenazas en línea, entre ellas, las URL's maliciosas. Estas URL's pueden ser utilizadas para llevar a cabo diversas actividades maliciosas como el phishing, la distribución de malware, y otros ataques cibernéticos que pueden comprometer tanto la información personal como corporativa. Por lo tanto, es esencial desarrollar métodos eficaces para la detección y mitigación de estas amenazas. Este proyecto se centra en desarrollar un algoritmo para la identificación de URL's maliciosas utilizando técnicas de machine learning, con un enfoque particular en el algoritmo de Support Vector Machines (SVM). Este enfoque se basa en la capacidad de SVM para clasificar datos de alta dimensionalidad, permitiendo la distinción precisa entre URL's benignas y maliciosas.

Con este proyecto, pretendemos ofrecer una herramienta precisa y efectiva para identificar URL's maliciosas, contribuyendo así a fortalecer la ciberseguridad y mejorar la seguridad de los usuarios en el entorno digital.

2. Materiales y Método

A. Python



Fig. 1 – Logo Python (Python (Oficial), s.f.)

Este programa, usando Python, está diseñado para detectar URL's maliciosas utilizando métodos de machine learning, específicamente el algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) (Python (Oficial), s.f.).

- **Descripción y Preparación del Conjunto de Datos:** Describe el conjunto de datos empleado, que abarca URL legítimas, de spam, phishing, malware y desfiguración. Los registros se limpian y preparan para su implementación en el modelo.
- **Entrenamiento del Modelo:** Entrena un modelo SVM utilizando diversas configuraciones de kernel (lineal, polinómico y gaussiano).

Emplea técnicas de normalización de características para preparar los datos antes de ajustar el modelo.

- **Visualización y Evaluación:** Evalúa el rendimiento del modelo mediante métricas como el F1 Score.
- **Predicción:** Realiza predicciones con el modelo entrenado tanto en un conjunto reducido como en el conjunto completo. Imprime el F1 Score de las predicciones para medir la precisión del modelo.

Este programa construye, entrena y evalúa un modelo SVM para identificar URLs maliciosas, utilizando un enfoque de aprendizaje supervisado con diversas técnicas de procesamiento y visualización de datos.

B. Pandas



Fig. 2 – Logo Pandas (Pandas, 2024)

Pandas es una librería en Python ampliamente reconocida para la gestión y análisis de datos estructurados. Algunas de las características más destacadas de Pandas incluyen (Pandas, 2024):

1. **Estructura de Datos:** Ofrece dos tipos principales de estructuras de datos: *Series* (para datos en una dimensión) y *DataFrames* (para datos en dos dimensiones, organizados en tablas).
2. **Lectura y Estructura de Datos:** Facilita la lectura y escritura de datos en múltiples formatos, incluyendo CSV, Excel, bases de datos SQL, entre otros.
3. **Manipulación de Datos:** Incluye una extensa variedad de funciones y métodos para manipular, filtrar, agrupar, ordenar y transformar datos.
4. **Análisis de Datos:** Permite realizar análisis estadísticos, crear gráficos y visualizar los datos.
5. **Manejo de Datos Faltantes:** Proporciona herramientas eficaces para detectar y gestionar valores faltantes en los datos.
6. **Rendimiento:** Está diseñada para ofrecer un rendimiento óptimo en el manejo de grandes volúmenes de datos.

C. Scikit-learn



Fig. 3 – Logo Scikit-learn (Scikit-Learn, 2024)

Scikit-learn es una librería de machine learning de código abierto para Python. Algunas de las características clave de Scikit-learn son (Scikit-Learn, 2024):

1. Técnicas de Machine Learning

Scikit-learn ofrece una extensa selección de técnicas de machine learning, que incluyen clasificación, regresión, clustering, reducción de dimensiones, entre otras.

- Entre los algoritmos más utilizados se encuentran Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), Árboles de Decisión, Bosques Aleatorios, Redes Neuronales y Análisis de Componentes Principales (PCA).

1. Preparación de Datos

- Scikit-learn incluye herramientas para el preparación y modificación de datos, como escalado, codificación de variables categóricas, manejo de valores faltantes, etc.
- Este proceso facilita la preparación de los datos para aplicarlos en modelos de aprendizaje automático.

2. Evaluación de Modelos

- Scikit-learn ofrece funciones para dividir los datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, además de métricas de evaluación como precisión, exhaustividad, F1-score.
- Esto ayuda a medir la efectividad de los modelos de aprendizaje automático.

3. Usabilidad

- La biblioteca tiene una interfaz fácil de usar y consistente, lo que simplifica el proceso de implementación de técnicas de machine learning.
- Además, Scikit-learn está bien documentada y con una amplia comunidad activa de usuarios y desarrolladores.

El propósito de las clases *StandardScaler* y *RobustScaler* en el código es realizar el escalado en los datos de entrada. Este escalado es fundamental en la etapa de preprocesamiento para modelos de machine learning, porque permite evitar que algunas características dominen el entrenamiento del modelo debido a diferentes escalas de magnitud. Específicamente:

- **StandardScaler:** Realiza un escalado de los datos al restar la media y dividir entre la desviación estándar correspondiente a cada característica. Esto resulta en una distribución con media 0 y varianza 1.
- **RobustScaler:** Realiza un escalado de los datos utilizando la mediana junto con el rango intercuartílico (IQR) en vez de utilizar la media y la desviación estándar. Esto lo hace más robusto a valores atípicos en comparación con el StandardScaler.

D. NumPy



Fig. 4 – Logo NumPy

NumPy (Numerical Python) es una librería de Python diseñada para manipular arrays de múltiples dimensiones y arreglos. Algunas de sus características clave son (NumPy, 2024):

- **Arrays Multidimensionales:** NumPy permite la creación y manipulación de arreglos de múltiples dimensiones, que son estructuras de datos que pueden almacenar datos de cualquier tipo.
- **Operaciones Matemáticas:** Ofrece diversas funciones matemáticas, como operaciones aritméticas, álgebra lineal y estadísticas, además de operaciones de transformación de datos.
- **Rendimiento:** Es optimizado para operaciones matemáticas, lo que lo hace más rápido y eficiente que las listas de Python.
- **Compatibilidad:** Integra fácilmente con bibliotecas de Python como SciPy, Pandas además de Matplotlib, lo que permite el análisis de datos y la visualización de resultados.
- **Funciones Especiales:** Incluye funciones útiles como números aleatorios y la búsqueda de elementos en arrays, y la manipulación de arrays.

NumPy es una biblioteca fundamental dentro del entorno Python para el análisis numérico y científico, proporcionando una manera rápida y eficiente de trabajar con datos numéricos.

Estos escaladores son comúnmente utilizados como parte de un pipeline de preprocesamiento de los datos previos a entrenar un modelo en machine learning, con el fin de asegurar que las características mantengan una escala uniforme y contribuyan de manera equitativa al entrenamiento del modelo.

E. Jupyter Notebook



Fig. 5 – Logo Jupyter Notebook (Jupyter Notebook, 2024)

Jupyter Notebook es una aplicación web de código abierto que permite crear y compartir documentos que contienen scripts ejecutables, gráficos y texto narrativo. Algunas de las principales funcionalidades de Jupyter Notebook son (Jupyter Notebook, 2024):

- Un entorno interactivo de programación que permite escribir, ejecutar y visualizar scripts en varios lenguajes, incluyendo Python, R, Julia, entre otros. El documento de Jupyter Notebook se divide en secciones, que pueden contener scripts, texto con formato Markdown, ecuaciones matemáticas, visualizaciones y otros elementos.
- **Ejecución de código y visualización de resultados:** Cada celda de código se puede ejecutar de forma independiente, lo que permite probar y depurar el código de manera iterativa.
- **Documentación integrada:** Jupyter Notebook permite combinar scripts, texto descriptivo, ecuaciones y visualizaciones en un único archivo, lo que simplifica la documentación y el reporte de análisis y proyectos.
- **Colaboración y compartición:** Los notebooks de Jupyter se pueden compartir fácilmente con otros usuarios, lo que promueve la cooperación y el trabajo en equipo.
- **Integración con múltiples lenguajes:** Jupyter Notebook es compatible con diversos lenguajes de programación, lo que lo convierte en una herramienta versátil para distintos tipos de proyectos y análisis. Jupyter Notebook es una plataforma poderosa que permite crear y compartir documentos interactivos que combinan scripts, visualizaciones y texto descriptivo, lo que la hace muy útil para el análisis de datos, la investigación científica y el desarrollo de aplicaciones.

F. Matplotlib



Fig. 6 – Logo Matplotlib (Matplotlib, 2024)

Matplotlib es una herramienta de Python muy utilizada para generar gráficos y visualizaciones de datos. Algunas de las características clave de Matplotlib son (Matplotlib, 2024):

- **Creación de Gráficos:** Permite producir una amplia gama de gráficos, como líneas, barras, dispersión, histogramas, y más.
- **Personalización:** Proporciona amplias opciones para ajustar los gráficos, como el estilo, los colores, las etiquetas, los títulos, etc.
- **Integración:** Se conecta sin problemas a otras bibliotecas de Python, como NumPy y Pandas, lo que simplifica la visualización de información estructurada.
- **Interactividad:** Permite crear gráficos interactivos que pueden ser manipulados y explorados por los usuarios.

- **Múltiples Backends:** Soporta diferentes backends de renderizado, lo que permite la visualización de gráficos en diferentes entornos, como Jupyter Notebook, aplicaciones de escritorio, entre otros.

Matplotlib es una herramienta eficaz y versátil para la creación de visualizaciones en Python, que ha llegado a ser una de las bibliotecas más reconocidas y empleadas en la comunidad de ciencia y análisis de datos.

Repositorios de URLs Maliciosas y Legítimas

En el contexto de nuestra investigación sobre inteligencia artificial aplicada a la ciberseguridad, hemos utilizado un conjunto de datos proporcionado por el *Instituto Canadiense de Ciberseguridad de la Universidad de Nueva Brunswick* (Brunswick, 2024). Estos repositorios contienen una extensa colección de URLs maliciosas y legítimas que permiten analizar diversas características léxicas y patrones asociados con distintos tipos de amenazas cibernéticas.

Tipos de URLs en el Conjunto de Datos:

- **URLs Benignas:** Se recopilieron más de 35,300 URLs benignas de sitios web clasificados por Alexa, utilizando herramientas de rastreo web para su extracción. Estas URLs fueron verificadas a través de Virus Total para garantizar su seguridad.
- **URLs de Spam:** Aproximadamente 12,000 URLs relacionadas con spam fueron obtenidas del repositorio público WEBSHAM-UK2007, un recurso ampliamente utilizado para estudios de spam en internet.
- **URLs de Phishing:** Se obtuvieron alrededor de 10,000 URLs de phishing desde OpenPhish, un repositorio que monitorea sitios de phishing activos. Estas URLs representan ataques donde los usuarios son engañados para revelar información confidencial.
- **URLs de Malware:** Más de 11,500 URLs de malware fueron recolectadas del proyecto DNS-BH, que mantiene una lista de sitios web asociados con malware.
- **URLs de Desfiguración (Defacement):** Se extrajeron más de 45,450 URLs de desfiguración, que corresponden a sitios web comprometidos, usualmente confiables según Alexa, pero que contienen páginas fraudulentas o maliciosas.

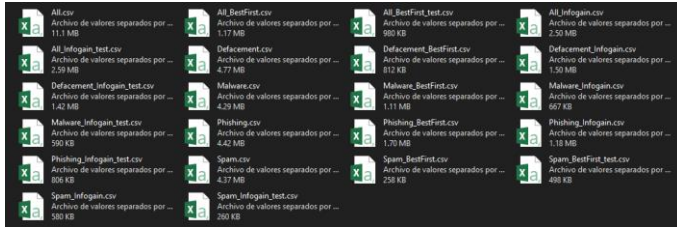


Fig. 7 – Vista previa de todos los repositorios obtenidos por el Instituto Canadiense de Ciberseguridad de la Universidad de Nueva Brunswick (Cybersecurity, 2024).

Características de los Datos:

Los datos almacenados en estos repositorios están estructurados en archivos CSV que contienen diversas características léxicas de las URLs, tales como:

- Longitud de la URL
- Cantidad de tokens en el dominio
- Longitud de la ruta y del nombre de archivo
- Frecuencia de caracteres específicos (vocales, números, símbolos)
- Relaciones entre la longitud del dominio, la ruta y los argumentos

 A screenshot of a CSV file named 'Phishing.csv' open in a spreadsheet application. The table has 25 columns with headers like 'domain', 'path', 'token', 'segment', 'length', 'avg', 'std', 'entropy', 'charset', 'url', 'url_length', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std', 'url_entropy', 'url_avg', 'url_std'. The rows contain numerical data representing various features of the URLs.

Fig. 8 – Vista sobre los datos almacenados en los repositorios CSV, en este caso, en el repositorio Phishing.

Estas características permiten a los investigadores identificar patrones comunes entre URLs maliciosas y legítimas, facilitando el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático para la detección proactiva de amenazas. El análisis detallado de estas variables contribuye al desarrollo de metodologías más efectivas para la ciberseguridad.

Algoritmo para la Detección de URLs Maliciosas Utilizando Support Vector Machines (SVM)

En esta etapa de nuestro proyecto, hemos desarrollado un algoritmo utilizando **Support Vector Machines (SVM)** para detectar URLs maliciosas y benignas. A continuación, presentamos un resumen del análisis del código y su funcionamiento, detallando los puntos más relevantes para entender su estructura sin exponer el código completo.

1. Preparación y Procesamiento de Datos

El algoritmo comienza con la **lectura y preprocesamiento de los datos**. Los datos utilizados provienen de un conjunto de URLs benignas y maliciosas, incluyendo categorías como phishing, spam y malware. Las columnas principales del conjunto de datos incluyen características léxicas de las URLs, como la longitud del dominio, la ratio de URL en el dominio, y otras variables críticas para el análisis.

Los datos se dividen en conjuntos de **entrenamiento, validación y prueba**, utilizando un proceso estratificado para garantizar la correcta proporción entre clases. Antes de entrenar el modelo, se aplican técnicas de escalado de características utilizando *StandardScaler* y *RobustScaler* para evitar que las diferencias en las magnitudes de las variables influyan negativamente en el rendimiento del algoritmo (Scholar, 2024).

2. Entrenamiento del Modelo SVM

El modelo principal se basa en **Support Vector Machines (SVM)**, un algoritmo de aprendizaje automático ampliamente utilizado para tareas de clasificación en espacios de alta dimensionalidad.

El código implementa el SVM con diferentes configuraciones de **kernel**:

- **Kernel Lineal:** Se utiliza para problemas de clasificación linealmente separables. El kernel lineal define un hiperplano que divide las clases.
- **Kernel Polinómico y Gaussiano (RBF):** Para problemas no lineales, el modelo emplea transformaciones del espacio original de características mediante kernels polinómicos y de base radial. Esto permite identificar patrones más complejos en los datos de URLs.

El proceso de entrenamiento utiliza la función de pérdida **Hinge loss** y ajusta el parámetro de regularización **C**, que controla el equilibrio entre maximizar el margen y minimizar los errores de clasificación.

3. Visualización y Evaluación del Modelo

Durante el análisis, se representaron los **límites de decisión** del modelo entrenado mediante gráficos que muestran cómo el SVM separa las clases (URLs benignas y maliciosas). La fórmula general que define el límite de decisión en SVM lineal es:

$$\omega_0 x_0 + \omega_1 x_1 + b = 0$$

Donde ω_0 y ω_1 son los coeficientes de los hiperplanos obtenidos del modelo, y b es el término independiente.

Además, se implementaron métricas como el **F1 Score**, una métrica clave para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación en términos de **precisión y recall**. El F1 Score se calcula como:

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{presicion} * \text{exhaustividad}}{\text{presicion} + \text{exhaustividad}}$$

Donde:

- **Precisión:** Es la fracción de predicciones positivas correctamente clasificadas. Mide cuán preciso es un modelo.
- **Exhaustividad (Recall):** Es la proporción de casos positivos que un modelo identifica correctamente. Mide cuán completo es un modelo.

El valor del F1-score oscila entre 0 y 1, donde 1 representa el óptimo resultado alcanzable (cuando la precisión, así como la exhaustividad son ambas 1). En el código proporcionado, se utiliza la función `f1_score()` de Scikit-learn para obtener dicho valor del modelo de clasificación de URLs maliciosas. Esto permite evaluar cómo el modelo equilibra la precisión, así como la exhaustividad, lo cual resulta una métrica muy útil en escenarios de clasificación binaria como este (Scholar, 2024).

4. Predicción

El modelo entrenado se utilizó para realizar predicciones sobre los conjuntos de datos de prueba. Las predicciones se compararon con las etiquetas reales, y se evaluaron mediante el F1 Score, que permite medir el equilibrio entre la precisión y la capacidad del modelo para identificar correctamente las URLs maliciosas.

Este algoritmo basado en **SVM** demostró ser eficaz para clasificar URLs maliciosas, proporcionando resultados precisos y una buena capacidad de generalización. La combinación de diferentes kernels y técnicas de preprocesamiento asegura que el modelo sea robusto y adaptable a diversos tipos de datos. Este enfoque es una herramienta valiosa para mejorar la seguridad cibernética, contribuyendo a la detección proactiva de amenazas en línea.

3. Resultados

1. Límites de Decisión del SVM

Las gráficas muestran los límites de decisión generados por el modelo SVM para separar las URLs maliciosas de las benignas.

El SVM crea un **hiperplano** en el espacio de características, el cual se representa como una línea en las gráficas bidimensionales. Este hiperplano es el punto de división entre las clases de URLs, donde de un lado se encuentran las benignas y del otro las maliciosas.

- ✓ El hiperplano de decisión está definido por la ecuación:

$$\omega_0 x_0 + \omega_1 x_1 + b = 0$$

Donde ω_0 y ω_1 son los coeficientes de los hiperplanos obtenidos del modelo, y b es el término independiente.

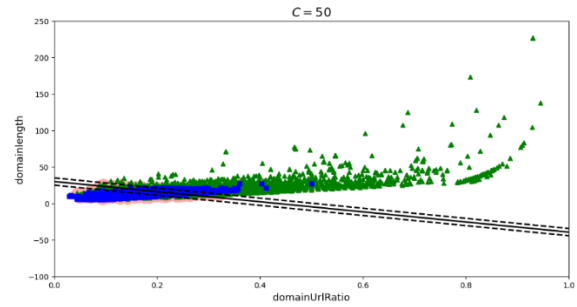


Fig. 9 – Vista de los límites de decisión del SVM (Gráfica 1).

2. Vectores de Soporte

En las gráficas se destacan los **vectores de soporte**, los cuales son los puntos de datos más cercanos al hiperplano y tienen una influencia directa en su ubicación. Estos puntos, representados como marcadores especiales, son esenciales para la clasificación, ya que determinan el margen máximo posible entre las dos clases de URLs. Los márgenes se representan como líneas paralelas al hiperplano, y la distancia entre estas líneas es el **margen** del clasificador.

- ✓ El margen se calcula como:

$$\frac{1}{\|\omega\|}$$

Donde $\|\omega\|$ es la norma del vector de pesos que define el hiperplano.

- **Puntos Verdes:** Los puntos verdes generalmente representan las URLs maliciosas (como phishing o malware). Estos puntos están situados en un lado del hiperplano, lo que indica que el modelo SVM ha clasificado estas URLs como amenazas. El objetivo del modelo es agrupar todas las URLs maliciosas en un lado del límite de decisión.
- **Puntos Azules:** Los puntos azules representan las URLs benignas. Estas URLs no representan una amenaza y deben ser clasificadas correctamente en el lado opuesto al de las URLs maliciosas. Los puntos azules separados del grupo verde indican que el modelo ha identificado correctamente que estas URLs no son peligrosas.
- **Puntos Morados:** Los puntos morados representan los vectores de soporte, que son los datos más cercanos al hiperplano de decisión. Estos puntos son críticos en la clasificación ya que definen el margen entre las clases. Los vectores de soporte son utilizados por el modelo SVM para establecer el hiperplano que maximiza la separación entre las URLs benignas y maliciosas.
- **Línea Negra:** La línea negra es el hiperplano de decisión. Este representa el límite que separa las dos clases de URLs (benignas y maliciosas). Todo punto que cae a un lado del hiperplano se clasifica como

malicioso o benigno, según la posición relativa a la línea. El hiperplano es el punto medio entre los vectores de soporte, y el objetivo del SVM es maximizar la distancia (margen) entre esta línea y los vectores de soporte de ambas clases.

3. Separación de Clases

La gráfica también incluye puntos que representan URLs maliciosas y benignas. Estos puntos se distribuyen a ambos lados del hiperplano de decisión.

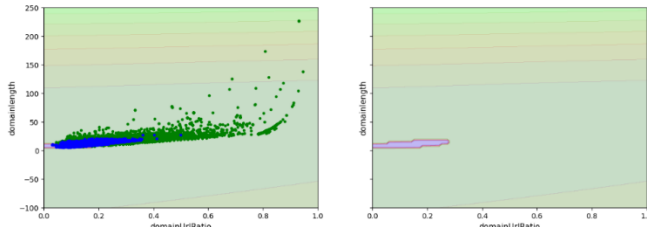


Fig. 10 – Vista de la separación de clases (Grafica 2).

Las URLs maliciosas se agrupan en un lado del hiperplano, mientras que las benignas se agrupan en el otro. Esta separación es crucial para evaluar la efectividad del modelo SVM en la detección de URLs maliciosas, ya que indica que el algoritmo ha aprendido a identificar patrones diferenciadores en las características extraídas.

- **Puntos Rojos o Rosados:** A menudo se utilizan puntos rojos o rosados para destacar los **vectores de soporte**. Estos puntos son los datos más cercanos al hiperplano de decisión y juegan un papel crucial en la definición del margen. Es posible que haya otro color como el rojo o rosado para diferenciarlos más claramente de las clases maliciosas y benignas.
- **Tonos de Gris:** En algunas representaciones gráficas, el área entre los márgenes (el espacio donde se encuentran los vectores de soporte) puede estar sombreada con un tono gris claro o intermedio. Esto ayuda a visualizar el margen que el SVM está maximizando entre las clases. El área más clara a ambos lados del hiperplano indica la separación de las clases con el margen máximo posible.

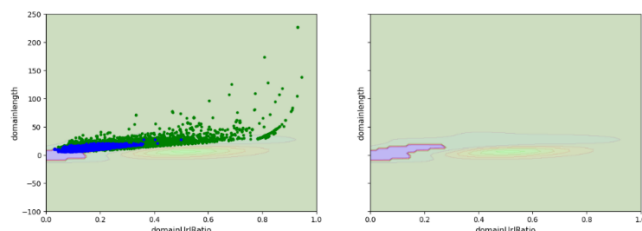


Fig. 11 – Vista de la separación de las clases (Grafica 3).

- **Sombras o Gradientes:** En algunos casos, se emplean sombras de colores o gradientes (amarillo, naranja, o tonos intermedios) para indicar regiones de mayor incertidumbre o baja confianza en la clasificación. Estas áreas se encuentran cerca del hiperplano de

decisión, donde el modelo puede tener más dificultad para distinguir entre las dos clases.

- **Líneas Discontinuas:** Las líneas discontinuas suelen representar los márgenes superior e inferior del hiperplano. Estas líneas se ubican a una distancia equidistante del hiperplano y definen el margen entre las clases. Los vectores de soporte se encuentran en o cerca de estas líneas, y la distancia entre ellas refleja la capacidad del modelo para separar las clases.

4. Evaluación Visual del Modelo

Las gráficas proporcionan una manera visual de evaluar el rendimiento del modelo SVM. Si las URLs maliciosas y benignas están bien separadas por el hiperplano, el modelo tiene un buen rendimiento. En caso contrario, si se observan puntos mal clasificados en el lado incorrecto del hiperplano, esto indica áreas donde el modelo puede mejorar.

Asimismo, es capaz de generar las predicciones del modelo SVM con kernel RBF (**Radial Basis Function**) empleando el conjunto de validación limitado. Lo cual es un paso crucial para medir la efectividad del modelo antes de aplicarlo al conjunto final de test.

4. Discusión

El algoritmo propuesto para la detección de URLs maliciosas basado en Support Vector Machines (SVM) ha demostrado ser una herramienta eficiente en la clasificación de amenazas cibernéticas. Su capacidad para manejar datos de alta dimensionalidad le permite identificar con precisión patrones léxicos y características asociadas a URLs maliciosas como phishing, spam y malware. Los resultados obtenidos durante esta investigación son consistentes con hallazgos previos en la literatura, como lo señalado en el artículo de investigación de ENISA, "**Artificial Intelligence and Cybersecurity Research**" ((ENISA), 2024), donde se destaca la efectividad de las SVM en la detección de malware e intrusiones cibernéticas.

Sin embargo, es importante señalar que, si bien el uso de SVM ha mostrado una alta efectividad, existen oportunidades para mejorar la precisión del modelo. Investigaciones adicionales sugieren que la combinación de SVM con otros métodos de inteligencia artificial, como árboles de decisión, podría aumentar significativamente la precisión del modelo al analizar URLs. Este enfoque combinado permitiría una detección más robusta de amenazas cibernéticas al aprovechar las fortalezas de cada técnica.

En nuestro estudio, nos limitamos al uso exclusivo de SVM y no pusimos a prueba estas combinaciones. Adicionalmente, el alcance de nuestra investigación estuvo restringido a la evaluación de repositorios de URLs previamente categorizadas y obtenidas de fuentes académicas confiables como el Instituto Canadiense de Ciberseguridad. No

realizamos pruebas en entornos más dinámicos, como la evaluación de URLs en tiempo real provenientes directamente de la web, lo cual podría ofrecer una visión más realista y útil de la efectividad del algoritmo en un entorno de producción.

5. Conclusiones

El uso de Support Vector Machines (SVM) en la detección de URLs maliciosas ha demostrado ser un enfoque prometedor en el campo de la ciberseguridad, proporcionando resultados precisos en la clasificación de URLs benignas y maliciosas. A través de la implementación de este modelo, se ha logrado identificar de manera eficaz diversas amenazas cibernéticas, contribuyendo a la protección de los usuarios en el entorno digital.

No obstante, aunque los resultados obtenidos son alentadores, existen oportunidades para continuar mejorando la eficiencia del modelo, particularmente al combinarlo con otras técnicas de inteligencia artificial como los árboles de decisión. Además, futuros trabajos podrían centrarse en la implementación del algoritmo en entornos en tiempo real, lo que permitiría una evaluación más precisa de su rendimiento en situaciones dinámicas.

Esta investigación señala la importancia del uso de la inteligencia artificial en la evolución de las técnicas de ciberseguridad y abre la puerta a nuevos enfoques que optimicen la detección y mitigación de amenazas en el ciberespacio.

6. Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Centro de Cooperación Academia Industria (CCAI) del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, por brindarnos la invaluable oportunidad de formar parte del equipo de ciberseguridad. Gracias a esta experiencia, hemos podido aplicar de manera práctica los conocimientos adquiridos durante nuestra formación en la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales, contribuyendo no solo al desarrollo de este proyecto, sino también a nuestra evolución profesional.

Agradezco profundamente al Dr. Adolfo Meléndez Ramírez, nuestro coordinador y mentor, por su generosa guía, conocimientos y sabiduría. Su liderazgo ha sido clave para el éxito de este trabajo, y gracias a su apoyo constante, hemos podido alcanzar estos resultados. Además, nos llevamos valiosas lecciones tanto en el ámbito profesional como personal que, sin duda, marcarán nuestra trayectoria futura.

Extiendo un especial agradecimiento a mi familia, en particular a mis padres, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada etapa de mi formación. Sin su respaldo, no habría sido posible llegar hasta este punto en mi desarrollo

tanto personal como profesional, y estoy profundamente agradecido por todo lo que me han brindado.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mis compañeros y amigos por compartir conmigo esta parte tan significativa de mi vida académica. De cada uno de ellos he aprendido algo valioso que me acompañará a lo largo de mi carrera, y les agradezco por su compañía, su amistad y las experiencias que hemos compartido.

7. Referencias

- (ENISA), T. E. (17 de Abril de 2024). *Artificial Intelligence and Cybersecurity Research*. Obtenido de <https://www.enisa.europa.eu/publications/artificial-intelligence-and-cybersecurity-research>
- Brunswick, U. d. (1 de Julio de 2024). *URL dataset (ISCX-URL2016)*. Obtenido de <https://www.unb.ca/cic/datasets/url-2016.html>
- Cybersecurity, C. I. (24 de Junio de 2024). *URL dataset (ISCX-URL2016)*. Obtenido de <http://205.174.165.80/CICDataset/ISCX-URL-2016/Dataset/>
- Jupyter Notebook. (12 de Junio de 2024). Obtenido de <https://jupyter.org/>
- Matplotlib. (18 de Junio de 2024). Obtenido de <https://matplotlib.org/>
- NumPy. (10 de Junio de 2024). Obtenido de <https://numpy.org/>
- Pandas. (30 de Mayo de 2024). Obtenido de <https://pandas.pydata.org/>
- Python (Oficial). (s.f.). Recuperado el 21 de Mayo de 2024, de <https://www.python.org/>
- Scholar, S. (1 de Julio de 2024). *Detecting Malicious URLs Using Lexical Analysis*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Detecting-Malicious-URLs-Using-Lexical-Analysis-Mamun-Rathore/01bb00b24fb2bcf1d11748d0c39ba60367b4c264>
- Scikit-Learn. (5 de Junio de 2024). Obtenido de <https://scikit-learn.org/stable/>

Cómputo heurístico para la medición de calidad de software según el modelo McCall de los productos de software en la empresa CDS, S.C.

Heuristic computation for measuring software quality according to the McCall model of software products in the company CDS, S.C.

Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro ^a, Griselda Cortés-Barrera ^a, Edgar Corona-Organiche ^a, Norma-Karen Valencia-Vázquez ^b

^aIngeniería en Sistemas Computacionales, TECNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Valle de Anáhuac, 55210 Ecatepec de Morelos, Estado de México.

^bIngeniería en Sistemas Computacionales, TECNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacán, Calle primavera S/N, 56330, Chimalhuacán, Estado de México.

Resumen

La complejidad del concepto de calidad del software incentiva la búsqueda de modelos de medición de calidad que pretenden aportar un medio, para definir este concepto en varias características sencillas y accesibles de medir. El primer paso de la evaluación del software es seleccionar los factores de calidad relevantes, para ello es necesario ajustarse a un modelo de calidad que desglose todos los factores, características y subcaracterísticas clasificadas en una estructura de árbol jerárquico, donde en el nivel más alto se encuentran los factores y en el nivel más bajo, las características o atributos de calidad de software. Para Mc Call la relación de factores y características se corresponde con la expresión matemática multicriterio $Fq = c1 m1 + c2 m2 + + cm mn$; Donde Fq es un factor de calidad del software, cn son coeficientes de regresión y mn son las métricas que afectan al factor de calidad. Para abordar la complejidad del concepto de medición de la calidad del software de McCall se desarrolla un modelo de medición de la calidad de software empleando computó heurístico basado en el método AHP (AHP, Analytic Hierarchy Process), Proceso de Análisis Jerárquico para determinar los coeficientes de regresión, así como, el escalamiento de las métricas para el grado de calidad de un producto de software categorizado por sus factores de calidad. El resultado final es una expresión del alcance donde se indica hasta qué punto el software cumple con los requerimientos de calidad establecidos y permita a la empresa CDS, S.C. Tomar acciones y decisiones.

Palabras clave: Cómputo heurístico, Factores McCall, Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), Modelo de Medición.

Abstract

The complexity of the concept of software quality encourages the search for quality measurement models that aim to provide a means to define this concept in several simple and accessible characteristics to measure. The first step of software evaluation is to select the relevant quality factors. To do this, it is necessary to adjust to a quality model that breaks down all the factors, characteristics and subcharacteristics classified in a hierarchical tree structure, where at the highest level They find the factors and at the lowest level, the characteristics or attributes of software quality. For Mc Call, the relationship of factors and characteristics corresponds to the multi-criteria mathematical expression $Fq = c1 m1 + c2 m2 + + cm mn$; Where Fq is a software quality factor, cn are regression coefficients and mn are the metrics that affect the quality factor. To address the complexity of McCall's software quality measurement concept, a software quality measurement model is developed using heuristic computing based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, Hierarchical Analysis Process to determine the coefficients. regression, as well as the scaling of metrics for the degree of quality of a software product categorized by its quality factors. The final result is an expression of the scope which indicates to what extent the software meets the established quality requirements and allows the company CDS, S.C. Take actions and decisions.

Keywords: Heuristic Computation, McCall Factors, Analysis Hierarchical Process (AHP), Measurement Model.

1. Introducción

El interés por conocer y mejorar la calidad del

software es un tema de investigación que tiene varias décadas. McCall et al. (1977) propuso un modelo de factores que influyen en la calidad del software. Estos factores se agrupan según los objetivos que se

*Autor para la correspondencia: ajimenez@tese.edu.mx

Correo electrónico: ajimenez@tese.edu.mx (Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro), ecorona@tese.edu.mx (Edgar Corona-Organiche), gcortes@tese.edu.mx (Griselda Cortés-Barrera), karenvalencia@teschi.edu.mx (Norma-Karen Valencia-Vázquez)

Historial del manuscrito: recibido el 31/01/2025, última versión-revisada recibida el 18/03/2025, aceptado el 20/03/2025, publicado el 08/04/2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15149052>

planteen para la operación y mantenimiento del producto. En el desarrollo de nuevos productos de software se toman en cuenta los factores asociados a la operación del producto (por ejemplo, corrección, confiabilidad, eficiencia, integridad, facilidad de uso). Cuando se introduce un cambio en el software, entonces se consideran los factores de la revisión del producto. Finalmente, si el desarrollo es hacer portable la aplicación a otras plataformas de hardware (o software) se deberían considerar los factores de transición del producto, entre otros. El modelo de McCall ha influido fuertemente la investigación en modelos de calidad del producto, elementos estructurales del modelo, así como la identificación de los factores de calidad se han usado en otras propuestas de modelos de calidad. Actualmente, los modelos más empleados para la investigación y la práctica de la calidad del producto de software son el modelo ISO/IEC 9126 y el ISO/IEC 25010. Desde 2011, el ISO/IEC 25010 sustituye al ISO/IEC 9126. Un modelo de calidad de producto está conformado por un conjunto de características que agrupan propiedades que podrían medirse en el software. El modelo de calidad en uso describe las características deseables que el usuario de un producto espera cuando lo está operando. Por ejemplo, es de interés en este modelo la eficiencia, la eficacia y satisfacción del usuario cuando éste último logra sus metas de uso del software en escenarios previamente establecidos. El modelo de calidad de producto describe características principales del software que pueden ser medidos estática y dinámicamente. Cada característica se compone de subcaracterísticas. Las características se utilizan durante el ciclo de vida del desarrollo del software con el propósito de definir con claridad los requisitos de calidad relevantes que el sistema bajo desarrollo debe satisfacer. Además, dicha definición permite medir la calidad durante las distintas etapas del ciclo de vida de desarrollo del software y evaluar la calidad del software cuando el producto está listo para entregarse al cliente. Es evidente, que, a partir de estas definiciones, la organización que desarrolla software debería considerar los distintos tipos de usuarios a los que está dirigido el software, conocer sus metas y las tareas que realizan para que el software contribuya a satisfacer sus necesidades con eficiencia, efectividad y satisfacción.

2. Materiales y Método

2.1.- Cómputo heurístico

El cómputo heurístico es un enfoque de resolución de problemas en computación que se basa en técnicas aproximadas para encontrar soluciones en un tiempo razonable, especialmente cuando los métodos exactos son inviables debido a la complejidad computacional. Las heurísticas permiten abordar problemas de

optimización, toma de decisiones y análisis de datos en diversas áreas de la informática.

2.2.- Fundamentos del Cómputo Heurístico

El cómputo heurístico se basa en el uso de reglas empíricas y estrategias de aproximación para guiar la búsqueda de soluciones en problemas complejos. Sus fundamentos teóricos se sustentan en:

1. Principios de la heurística:

- Utilización de reglas prácticas para encontrar soluciones eficientes.
- Compromiso entre exactitud y tiempo de ejecución.
- Exploración de soluciones factibles sin garantizar optimalidad.

2. Teoría de la complejidad computacional:

- Muchos problemas pertenecen a la clase NP-difícil, lo que hace que los algoritmos exactos sean impracticables.
- Las heurísticas permiten encontrar soluciones aceptables en tiempo polinómico.

3. Exploración y explotación:

- La exploración se refiere a la búsqueda de nuevas áreas de soluciones.
- La explotación optimiza soluciones dentro de una región identificada.
- Un equilibrio adecuado entre ambos procesos mejora la eficacia de la heurística.

2.3.- AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) y algoritmo heurístico

Para Sánchez (2022) el Método de Jerarquización Analítica (AHP) fue desarrollado durante los años setenta en la Universidad de Pennsylvania por el Dr. Thomas L. Saaty, al buscar elaborar un instrumento formal para la evaluación y selección de alternativas, que tuviera las características de ser sólido en sus fundamentos matemáticos, útil en la toma de decisiones y sencillo en su aplicación. Saaty (1980) considera que para la solución de un problema el decisor transita por tres etapas: inicia con la formulación del problema, luego realiza una evaluación y finalmente selecciona el mejor curso de acción que más contribuya al logro del objetivo. Este método puede ser realizado en grupo o de manera individual, aplicándose preferentemente a problemas complejos. Las técnicas de clasificación asumen que hay un conjunto de objetos que pertenecen a diferentes clases. La etiqueta de clase es un valor (simbólico) discreto y es conocido para cada objeto. Para Ballester (1998) el objetivo es construir modelos de clasificación (a veces llamados clasificadores), que intentarán asignar la etiqueta de clase correcta a nuevos objetos. Considerando los aspectos citados anteriormente, y dada la complejidad del problema es necesario desarrollar un modelo que permita conjuntar el AHP con la técnica de

minería de árboles de decisión. El Proceso AHP multicriterio permite determinar los pesos w_i que se asocian a las alternativas, los estados de la naturaleza e indicadores; y con el árbol de decisión determinar la decisión final a tomar considerando las condiciones que se cumplen desde la raíz del árbol hasta cada una de sus hojas (Gallagher,1982). El método de Jerarquización analítica AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) para Sánchez (2022) se integra de cuatro etapas: 1) la representación del problema, 2) evaluación de criterios, 3) evaluación de alternativas y 4) jerarquización de alternativas; véase figura 1.

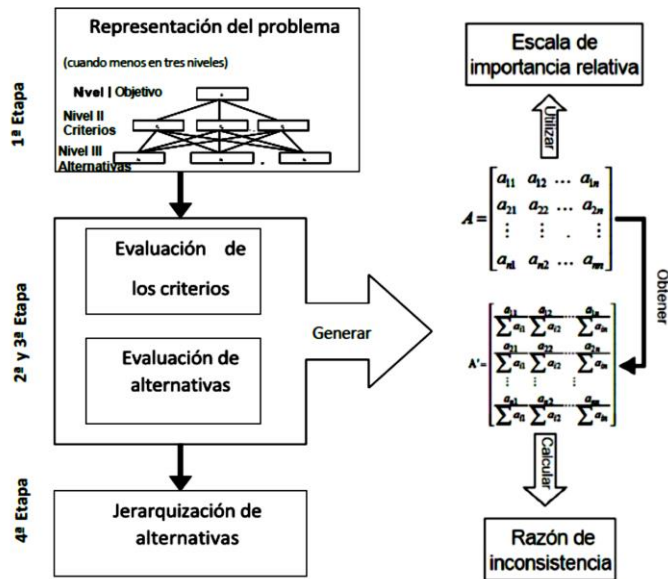


Figura 1.- Jerarquización analítica (Sánchez, 2022).

El algoritmo heurístico toma las etapas del AHP y confluye en la toma de decisiones donde se aborda el modelo de medición considerando que el número de alternativas es finito y se conoce su evaluación sobre distintas características (denominadas atributos), de carácter cuantitativo o cualitativo. El algoritmo toma los preceptos de Saaty (2001) para la toma de decisiones multicriterio que trabaja con un número finito, generalmente pequeño, de alternativas predeterminadas, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ del cual se conoce además su evaluación sobre cada uno de los atributos, $X_1, X_2, \dots, X_n$, que no tiene que ser necesariamente cuantificable y que se representa a través de la denominada matriz de decisión, véase Tabla 1:

Tabla 1.- Matriz de Decisión (Saaty, 2001).

	X_1	X_2	$\dots$	X_j	$\dots$	X_n
A_1	x_{11}	x_{12}	$\dots$	x_{1j}	$\dots$	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	$\dots$	x_{2j}	$\dots$	x_{2n}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
A_i	x_{i1}	x_{i2}	$\dots$	x_{ij}	$\dots$	x_{in}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
A_m	x_{m1}	x_{m2}	$\dots$	x_{mj}	$\dots$	x_{mn}

Nota: Items de la Matriz de Decisión.

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico, cualquier decisión involucra de una u otra manera, la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión, donde muy frecuentemente estos criterios están en medición. La figura 1, ilustra la situación compleja a la que se ve enfrentado el responsable de tomar una decisión. Es claro, que éste se encuentra influenciado por sus patrones o modelos mentales, por la influencia de quienes se encuentran en una posición jerárquica superior o inferior, incluyéndose también el estado de ánimo y sus relaciones familiares y sociales, lo cual determina las prioridades al momento de abordar el problema, y añaden desde luego, mayores elementos de complejidad. Dentro de este marco, es vital contar con la información adecuada para tomar la mejor decisión, la cual se determinará dentro de un conjunto de posibles alternativas, las cuales deben ser evaluadas frente a múltiples criterios que se definan para este propósito. Se denota esta matriz por $D = (x_{ij}) \in M^{m \times n}$ donde x_{ij} es el resultado alcanzado por la alternativa A_i , $j = 1, \dots, n$. Además, en general, se conoce la condición de cambio deseable para cada atributo. Así, a partir de los valores más preferidos por el decisor sobre cada uno de los atributos, x_j^* , se puede formar la alternativa ideal $A^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$. La decisión final consistirá en la elección de una o más alternativas de A como la “mejor” o “mejores”, basándonos en la información aportada por el decisor acerca de las preferencias sobre los atributos y/o las alternativas. El AHP utiliza una matriz formada con la información del decisor y cuyos elementos son comparaciones de criterios por pares tipo razón. La información que se demanda del decisor es una matriz $n \times n$ $W = (w_{ij})$, donde w_{ij} la medida subjetiva de la importancia relativa del criterio i frente al j , según una escala normalizada (Saaty,2001) de 1 (la misma importancia) a 9 (absolutamente más importante).

Y entonces, la matriz **W** de juicios relativos sobre los

atributos tendría la siguiente forma; véase figura 2:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}/w_{11} & w_{11}/w_{12} & \dots & w_{11}/w_{1n} \\ w_{21}/w_{11} & w_{21}/w_{12} & \dots & w_{21}/w_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1}/w_{11} & w_{n1}/w_{12} & \dots & w_{n1}/w_{1n} \end{bmatrix}$$

Figura 2.- Matriz W de jerarquización analítica (Sánchez, 2022).

Para Zeleny (1982) en esta matriz **W** todos los elementos son positivos y verifican las siguientes propiedades:

1. Reciprocidad: $w_{ij} = 1/w_{ji}$ Para todas $i, j = 1, \dots, n$.
2. Consistencia: $w_{ij} = w_{ik}/w_{jk}$ Para todas $i, j, k = 1, \dots, n$.

Y se puede asumir sin perder generalidad que $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. Siendo todos los elementos de **W** positivos, existe siempre un autovalor $\lambda > 0$ dominante, tal que su autovector asociado $v = (v_1, \dots, v_n)$ que cumple $\sum_{j=1}^n v_j = 1$ tiene todos sus componentes positivos.

3. Resultados

3.1.- Factores de calidad de McCall

Los factores que afectan a la calidad del software se clasifican en dos grandes grupos: aquellos que se pueden medir directamente (p.ej.: defectos por punto de función) y los que se pueden medir solo indirectamente (p.ej.: facilidad de uso o mantenimiento). McCall et al. (1977) y colegas propusieron otra clasificación de factores que afectan a la calidad del software, éstos se concentran en tres aspectos importantes de un producto de software, las características operativas durante la ejecución, la capacidad de cambios o la transición del producto y su adaptabilidad o revisión, véase figura 3. Para McCall la relación de factores y características se corresponde con la expresión $Fq = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_m m_n$; Donde **Fq** es un factor de calidad del software, **cn** son coeficientes de regresión y **mn** son las métricas que afectan al factor de calidad, finalmente el modelo matemático de McCall se expresa interactivamente integrando el cómputo heurístico, como la sumatoria del producto de los pesos calculados por el grado de importancia, véase figura 3.

$$F(c) = \sum_{i=1}^n (a_i C_i) = a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3 + \dots + a_n C_n$$

En donde:
F(c) → Representa el valor final del grado de importancia de un factor de calidad.
a_i → Representa un cociente de importancia (ponderación de la característica) por cada factor.
C_i → Representa el valor del grado de importancia de una característica del entorno de la aplicación
n → Representa el número de características del entorno de la aplicación ser tomadas en cuenta.

Figura 3.- Factores de Calidad de Software según McCall.

Para Piattini (2015) la relación (X) entre los factores de calidad del software y las métricas se muestran en la figura 4, Cabe mencionar que el peso que se asigna a cada métrica depende de los productos de software.

Métrica de la calidad del software	Corrección	Confiabilidad	Eficiencia	Integridad	Mantenimiento	Flexibilidad	Capacidad de pruebas	Portabilidad	Reusabilidad	Interoperabilidad	Usabilidad
Factor de calidad											
Facilidad de auditoria				x			x				
Exactitud		x									
Estandarización de comunicaciones										x	
Complejidad	x										
Complejidad		x				x	x				
Concisión			x		x	x					
Consistencia	x	x			x	x					
Estandarización de datos										x	
Tolerancia a errores		x									
Eficiencia de ejecución			x								
Capacidad de expansión						x					
Generalidad						x		x	x	x	
Independencia de hardware								x	x		
Instrumentación				x	x		x				
Modularidad		x		x	x	x	x		x	x	
Operatividad			x								x
Seguridad				x							
Autodocumentación					x	x	x	x	x		
Simpleza		x			x	x	x				
Independencia del sistema								x	x		
Trazabilidad	x										
Facilidad de formación											x

Figura 4.- Tabla de factores y métricas de calidad McCall

El proceso del algoritmo heurístico comienza con el Método de AHP y con la matriz de las alternativas integrando cada uno de los factores relacionados a la teoría de McCall, el algoritmo se implementa en una serie de funciones heurísticas, destacando la función en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) para el AHP cuyo fin es obtener los pesos asociados a la fórmula de McCall:

Function AHP(ByRef matrix As Variant) As Variant
 1 Dim n As Integer
 2 n = UBound(matrix, 1) ' Tamaño de la matriz

```

3 Dim sumCol() As Double
4 ReDim sumCol(1 To n)
5 Dim i As Integer, j As Integer

' Calcular la suma de cada columna
6 For j = 1 To n
7   For i = 1 To n
8     sumCol(j) = sumCol(j) + matrix(i, j)
9   Next i
10 Next j

' Normalizar la matriz
11 Dim normMatrix() As Double
12 ReDim normMatrix(1 To n, 1 To n)
13 For i = 1 To n
14   For j = 1 To n
15     normMatrix(i, j) = matrix(i, j) / sumCol(j)
16   Next j
17 Next i

' Calcular los pesos
18 Dim weights() As Double
19 ReDim weights(1 To n)
20 For i = 1 To n
21   Dim sumRow As Double
22   sumRow = 0
23   For j = 1 To n
24     sumRow = sumRow + normMatrix(i, j)
25   Next j
26   weights(i) = sumRow / n
27 Next i

' Calcular el índice de consistencia
28 Dim lambdaMax As Double
29 lambdaMax = 0
30 For i = 1 To n
31   Dim sumProduct As Double
32   sumProduct = 0
33   For j = 1 To n
34     sumProduct = sumProduct + matrix(i, j) *
weights(j)
35   Next j
36   lambdaMax = lambdaMax + sumProduct /
weights(i)
37 Next i
38 lambdaMax = lambdaMax / n

39 Dim CI As Double, CR As Double
40 CI = (lambdaMax - n) / (n - 1)

' Valores de RI para diferentes tamaños de matriz
41 Dim RI() As Double
42 RI = Array(0, 0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45,
1.49)
43 If n > 10 Then
44   CR = CI / 1.49 ' Aproximación para matrices grandes
45 Else
46   CR = CI / RI(n)
47 End If

' Verificación de consistencia
48 If CR < 0.1 Then
49   AHP = weights
50 Else

```

```

51   MsgBox "La matriz de comparación no es
consistente. CR = " & Round(CR, 3), vbExclamation,
"Inconsistencia Detectada"
52   AHP = Null
53 End If
54 End Function

```

de la aplicación del algoritmo se obtiene la matriz de las alternativas integrando cada uno de los factores relacionados a la teoría de McCall, la cual se muestra en la figura 5.

MATRIZ PARA CAPTURAR LOS VALORES DE LA ALTERNATIVA DE COMERCIALIZACIÓN											
ALTERNATIVA	EXPERIENCIA	AMBIENTE DE USO	RIESGO	COMPLEJIDAD	RESTRICCIONES	COMPLEJIDAD DE SOFTWARE	COMPLEJIDAD DE HARDWARE	COMPLEJIDAD DE RED	COMPLEJIDAD DE SEGURIDAD	COMPLEJIDAD DE MANTENIMIENTO	COMPLEJIDAD DE ACTUALIZACIÓN
COMERCIALIZACIÓN	1	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
EXPERIENCIA	0.58	1	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
AMBIENTE DE USO	0.9	0.9	1	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
RIESGO	1.12	1.12	1.12	1	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
COMPLEJIDAD	1.24	1.24	1.24	1.24	1	1.32	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
RESTRICCIONES	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57
COMPLEJIDAD DE SOFTWARE	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1	1.45	1.49	1.53	1.57
COMPLEJIDAD DE HARDWARE	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1	1.49	1.53	1.57
COMPLEJIDAD DE RED	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1	1.53	1.57
COMPLEJIDAD DE SEGURIDAD	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1	1.57
COMPLEJIDAD DE MANTENIMIENTO	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1
COMPLEJIDAD DE ACTUALIZACIÓN	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57

Figura 5. Matriz correlación.

Una vez que se crearon las matrices de alternativas y la de criterios, véase figura 6, bajo los mecanismos detallados, se crea la matriz final de criterios y alternativas, en la cual se deben generar las ponderaciones de cada una de las alternativas de forma vertical y horizontalmente, con la finalidad de poder realizar una suma de productos entre las dos ponderaciones de cada una de las alternativas y las ponderaciones de los criterios.

MATRIZ DE Ponderaciones											
ALTERNATIVA	EXPERIENCIA	AMBIENTE DE USO	RIESGO	COMPLEJIDAD	RESTRICCIONES	COMPLEJIDAD DE SOFTWARE	COMPLEJIDAD DE HARDWARE	COMPLEJIDAD DE RED	COMPLEJIDAD DE SEGURIDAD	COMPLEJIDAD DE MANTENIMIENTO	COMPLEJIDAD DE ACTUALIZACIÓN
COMERCIALIZACIÓN	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
EXPERIENCIA	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
AMBIENTE DE USO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
RIESGO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
RESTRICCIONES	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE SOFTWARE	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE HARDWARE	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE RED	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE SEGURIDAD	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE MANTENIMIENTO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
COMPLEJIDAD DE ACTUALIZACIÓN	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Figura 6.- Matriz de criterios.

Finalmente se obtiene la ponderación a cada uno de los criterios de McCall asociado al producto de software, mediante un mapa de calor, véase figura 7.

CRITERIO / ALTERNATIVAS	PONDERACIÓN FINAL
APLICACIÓN	0,054
AMBIENTE DE USO	0,054
RIESGO	0,058
COMPUTADORA ANFITRIONA	0,063
MADUREZ DEL DESARROLLADOR	0,062
EXPERIENCIA DEL USUARIO	0,067
APOYO DE LOS DESARROLLADORES	0,066
EXPERIENCIA DE LOS DESARROLLADORES	0,071
INTERACCIÓN CON EL USUARIO	0,073
RESTRICCIONES COMERCIALES	0,079
METODOLOGÍA DE DESARROLLO	0,090
LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	0,082
COMPLEJIDAD DE SOFTWARE	0,094
SALUD DE DESARROLLADORES	0,087
	1,000

Figura 7.- Matriz de criterios.

Con la ponderación obtenida se genera el dictamen de calidad de los productos de software, como se muestra en la figura 8.

POR ESTE MEDIO SE HACE CONSTAR QUE SE REALIZÓ EN SU EMPRESA UN ANÁLISIS DE CALIDAD DE SOFTWARE BAJO EL MODELO DE MCCALL REVISANDO LOS SIGUIENTES CRITERIOS Y ALTERNATIVAS:

CRITERIOS	ALTERNATIVAS	ALTERNATIVAS
COMPLETUDIN	ALTERNATIVA	ALTERNATIVA
COMPLETUDIN	AMBIENTE DE USO	ALTERNATIVA
EFICIENCIA	RIESGO	COMPLETUDIN DE SOFTWARE
INTERFACIA	COMPUTADORA ANFITRIONA	VALOR DE DESARROLLADORES
INTERFACIA	VALOR DE DESARROLLADORES	
VALOR DE DESARROLLADORES	EXPERIENCIA DEL USUARIO	
VALOR DE DESARROLLADORES	APORTE DE LOS DESARROLLADORES	
VALOR DE DESARROLLADORES	EXPERIENCIA DE LOS DESARROLLADORES	
VALOR DE DESARROLLADORES	INTERACCIÓN CON EL USUARIO	
VALOR DE DESARROLLADORES	RESTRICCIONES COMERCIALES	
VALOR DE DESARROLLADORES	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	

ESTA EVALUACIÓN SE REALIZÓ MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE PROCESO ANÁLISIS JERÁRQUICO CON LOS SIGUIENTES RESULTADOS:

EXISTIERON ALGUNOS RUBROS SOBRE LOS CUALES SE DETECTÓ MENOS PUNTUACIÓN Y SE EXTIENDE LA RECOMENDACIÓN DE ATENDERLOS A LA BREVEDAD:

APLICACIÓN, AMBIENTE DE USO, RIESGO, COMPUTADORA ANFITRIONA, VALOR DE DESARROLLADORES, EXPERIENCIA DEL USUARIO, APOYO DE LOS DESARROLLADORES, EXPERIENCIA DE LOS DESARROLLADORES

ASIMISMO TAMBIÉN SE LE INFORMA QUE TIENE FORTALEZA EN LOS SIGUIENTES CRITERIOS:

INTERACCIÓN CON EL USUARIO, RESTRICCIONES COMERCIALES, METODOLOGÍA DE DESARROLLO, LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN, COMPLETUDIN DE SOFTWARE, VALOR DE DESARROLLADORES

POR CONSIGUIENTE SE LE INFORMA QUE SU EVALUACIÓN FINAL CON RESPECTO AL DESARROLLO DE SOFTWARE ES DE:

REGULAR

Figura 8.-Carátula de dictamen final de evaluación.

4. Discusión

El modelo de McCall es de suma importancia, ya que intenta contemplar el panorama completo de la producción de software, desde los usuarios hasta los desarrolladores, el tomar una decisión de que es lo que realmente es importante, pues en muchas ocasiones depende de la línea que tenga la empresa desarrolladora o también de lo que esté solicitando un determinado cliente, las prioridades o ponderaciones en este caso serán muy variables, el tener herramientas como la aplicada en este caso con el Proceso Analítico Jerárquico permite evaluar todas las alternativas que se pueden dar en el modelo de McCall por cada uno de los criterios, dando los resultados mediante ponderaciones que al final se utilizan para poder tomar una mejor decisión.

5. Conclusiones

La calidad de un producto de software es un cálculo complejo, compuesto de otros atributos, incluso diferentes según el observador. La calidad por ser un concepto multidimensional posee diferentes definiciones dependiendo del contexto desde donde se examine. El modelo empleado de medición para la calidad del software propone la descomposición de atributos en otros más simples y medibles, al tiempo que establecen los requisitos de calidad. Con el algoritmo heurístico empleando AHP no sólo se enfrenta a la medida de la calidad de forma más simple y coherente, también ayuda a conocer del producto de software, sus características de calidad y el dictamen de calidad. El modelo de McCall se basa en tres perspectivas fundamentales:

1. **Operación del Producto:** Evalúa la funcionalidad y eficiencia del software en su uso.

2. **Revisión del Producto:** Considera aspectos relacionados con la capacidad de mantenimiento y evolución del software.
3. **Transición del Producto:** Se enfoca en la adaptabilidad del software a nuevos entornos y tecnologías.

El modelo de McCall sigue siendo una referencia en la evaluación de calidad del software, proporcionando una base sólida para garantizar productos confiables, eficientes y adaptables. Su estructura clara permite a los desarrolladores y gestores de proyectos mejorar continuamente la calidad del software en todas sus dimensiones, en particular en la empresa CDS, S.C.

6. Agradecimientos

A la empresa CDS, S.C., por el apoyo técnico y documental, así como, al área de Desarrollo de Software por el acceso a las instalaciones y al grupo desarrollador para efectuar el análisis de los productos de software para dictaminar con base en el modelo de McCall la calidad del producto que liberan a los clientes de la empresa, así como, a cada uno de los integrantes de artículo por el aporte computacional y matemático para realizar los aplicativos.

7. Referencias

1. Ballester, E. (1998). Metodología multicriterio en las decisiones empresariales. México: McGraw Hill.
2. Gallagher, C., & Watson, H. (1982). Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones en. México: McGraw Hill.
3. McCall, J.A., Richards, P.K., Walters, G.F. (1977) Factors in Software Quality, Springfield, Va., vol. 1.
4. Piattini, M. (2015). Approaches to promote product quality within software process improvement initiatives: a mapping study. Journal of Systems and Software, 103, 150-166.
5. Saaty, T.L (1980). The Analytic Hierarchy Process. México: McGraw Hill.
6. Saaty, T.L (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. New York: McGraw Hill.
7. Sanchez Guerrero, G. (2022). Tecnicas Heurísticas para la Planeación. México: Fundación ICA.
8. Zeleny, M. (1982). Multiple criteria decision making. New York: McGraw Hill.

Identificación de Amenazas Zero-Day en Entornos Empresariales con Modelos de Aprendizaje Profundo.

Identification of Zero-Day Threats in Enterprise Environments Using Deep Learning Models.

Ana-Laura Barcenas-Medina^a , Alan-Jair Alcaraz-Cancio^a 

^a Ingeniería en Sistemas Computacionales, TecNM-TES-Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, México

Resumen

En el panorama actual de la ciberseguridad, las amenazas zero-day constituyen uno de los desafíos más críticos debido a su naturaleza impredecible y la ausencia de patrones conocidos que faciliten su detección temprana. Este artículo aborda esta problemática mediante el diseño e implementación de un sistema basado en aprendizaje profundo, que integra redes neuronales convolucionales (CNN) y recurrentes (RNN) para identificar dichas amenazas en tráfico de red empresarial. Utilizando conjuntos de datos reales y simulados, el modelo alcanzó una precisión del 96.84% superando significativamente los enfoques tradicionales basados en firmas. Estos resultados destacan la adaptabilidad y eficacia del sistema para enfrentar amenazas emergentes, reforzando la relevancia de las tecnologías avanzadas de inteligencia artificial como una herramienta esencial para proteger los activos digitales y garantizar la continuidad operativa en entornos empresariales.

Palabras clave: Amenazas zero-day, aprendizaje profundo, ciberseguridad, detección de anomalías, inteligencia artificial, redes neuronales, tráfico de red.

Abstract

In today's cybersecurity landscape, zero-day threats pose one of the most critical challenges due to their unpredictable nature and the lack of predefined patterns for early detection. This article addresses this issue by presenting the design and implementation of a deep learning-based system that combines convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) to identify such threats within enterprise network traffic. Using both real and simulated datasets, the model achieved an accuracy of 96.84%, significantly outperforming traditional signature-based approaches. These results highlight the system's adaptability and effectiveness in countering emerging threats, underscoring the importance of integrating advanced artificial intelligence technologies into enterprise cybersecurity to safeguard digital assets and ensure operational continuity.

Keywords: Anomaly detection, artificial intelligence, cybersecurity, deep learning, network traffic, neural networks, zero-day threats.

1. Introducción

En el panorama actual de la ciberseguridad, las amenazas cibernéticas evolucionan a un ritmo sin precedentes, poniendo en peligro la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los sistemas empresariales. Entre estas amenazas, los ataques zero-day destacan por su capacidad de explotar vulnerabilidades desconocidas antes de que puedan ser detectadas y mitigadas por los sistemas de seguridad tradicionales. Al carecer de firmas o patrones previamente

identificados, estos ataques representan un desafío crítico para las organizaciones, ya que su detección requiere soluciones innovadoras y adaptativas (García & Martínez, 2020).

La creciente adopción de tecnologías digitales en entornos empresariales ha ampliado la superficie de ataque, lo que hace aún más urgente la necesidad de desarrollar sistemas avanzados de detección capaces de identificar patrones anómalos en tiempo real. En este contexto, el aprendizaje profundo ha surgido como una herramienta poderosa para la identificación de amenazas cibernéticas, gracias a su capacidad de procesar grandes volúmenes de datos, detectar

*Autor para la correspondencia: 202020054@tese.edu.mx

Correo electrónico: 202020054@tese.edu.mx (Ana-Laura Barcenas-Medina) 202020386@tese.edu.mx (Alan-Jair Alcaraz-Cancio)

Historial del manuscrito: recibido el 08/01/2025, última versión-revisada recibida el 23/01/2025, aceptado el 30/01/2025, publicado el 08/04/2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15149234>

patrones complejos y adaptarse a nuevas amenazas sin necesidad de una intervención manual constante (Kim & Park, 2019).

Este artículo analiza el uso de modelos de aprendizaje profundo para la detección de ataques zero-day en entornos empresariales. A través de un enfoque multidisciplinario que integra técnicas avanzadas de inteligencia artificial, análisis de datos y ciberseguridad, se busca demostrar cómo estas herramientas pueden mejorar significativamente la capacidad de las organizaciones para identificar y mitigar estas amenazas.

1.1. Contexto y Problema

Los sistemas de detección de intrusiones tradicionales, basados en firmas y reglas predefinidas, están perdiendo efectividad frente a la creciente sofisticación de los ataques zero-day. Según informes recientes, más del 60% de las empresas han enfrentado ataques que explotan vulnerabilidades desconocidas en los últimos tres años (Smith & Taylor, 2020). Estas amenazas no solo ocasionan pérdidas económicas significativas, sino que también afectan la reputación de las organizaciones y socavan la confianza de clientes y socios comerciales.

La detección de ataques zero-day enfrenta múltiples desafíos clave:

- **Falta de información previa:** Al tratarse de vulnerabilidades desconocidas, no existen patrones o firmas registrados que permitan su identificación.
- **Evolución constante de las amenazas:** Los atacantes implementan técnicas cada vez más avanzadas para evadir los mecanismos tradicionales de detección.
- **Complejidad de los entornos empresariales:** La diversidad de sistemas, dispositivos y redes dentro de las organizaciones dificulta la adopción de soluciones de seguridad universales.

Estos retos destacan la necesidad de soluciones basadas en inteligencia artificial, capaces de aprender de manera autónoma y adaptativa para identificar patrones anómalos dentro de grandes volúmenes de datos. Este enfoque no solo promete superar las limitaciones de los sistemas tradicionales, sino también responder a la dinámica cambiante de las amenazas cibernéticas en entornos empresariales complejos.

1.2. Justificación

La aplicación de modelos de aprendizaje profundo en el ámbito de la ciberseguridad ha emergido como una solución prometedora para enfrentar la creciente sofisticación de los ataques zero-day. A diferencia de las técnicas tradicionales, que dependen de firmas o reglas predefinidas, el aprendizaje profundo ofrece capacidades únicas que incluyen:

1. **Análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos:** Facilitando la identificación de patrones anómalos que podrían indicar amenazas de manera proactiva.

2. **Adaptación a nuevas amenazas:** Gracias a la capacidad de los modelos para aprender y generalizar a partir de ejemplos limitados, incluso frente a amenazas previamente desconocidas.
3. **Automatización del proceso de detección y mitigación:** Reduciendo la dependencia en expertos humanos, lo que optimiza recursos y mejora la eficiencia operativa.

Estas capacidades permiten a las organizaciones mejorar significativamente la precisión y rapidez de sus respuestas ante amenazas emergentes. Además, el enfoque basado en aprendizaje profundo se alinea con investigaciones previas que han demostrado su potencial para transformar la ciberseguridad empresarial, ofreciendo soluciones más robustas y adaptativas frente a un panorama de amenazas en constante evolución (Ortiz & Ramírez, 2021).

1.3. Objetivos del Estudio

El objetivo principal de este estudio es desarrollar, implementar y evaluar un sistema innovador basado en modelos de aprendizaje profundo para la detección de ataques zero-day en entornos empresariales. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. **Identificar características y patrones del tráfico de red** que puedan ser indicativos de amenazas zero-day, utilizando tanto datos simulados como reales.
2. **Diseñar un modelo de aprendizaje profundo avanzado**, integrando redes neuronales convolucionales (CNN) para el análisis espacial y redes neuronales recurrentes (RNN) para el análisis temporal.
3. **Validar la efectividad del sistema en entornos empresariales simulados**, empleando métricas clave como precisión, sensibilidad y tiempo de respuesta para garantizar un rendimiento óptimo.
4. **Comparar los resultados obtenidos con los enfoques tradicionales**, evaluando la superioridad del sistema propuesto en términos de adaptabilidad, eficacia y eficiencia.

1.4. Relevancia del Estudio

La detección de ataques zero-day no solo representa un desafío técnico, sino también una prioridad estratégica en el contexto actual. A medida que las organizaciones dependen cada vez más de la tecnología para sus operaciones, la capacidad de identificar y mitigar amenazas emergentes se vuelve fundamental para garantizar la continuidad del negocio, proteger los activos críticos y preservar la confianza de los clientes y socios comerciales.

Estudios recientes han demostrado que las técnicas de aprendizaje profundo pueden aumentar la precisión de los sistemas de detección en un 25% en comparación con los enfoques tradicionales (Cruz & Pineda, 2021). Esto se debe a su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y adaptarse dinámicamente a nuevas amenazas.

2. Materiales y Método

El desarrollo de un sistema basado en modelos de aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales exige la integración de recursos tecnológicos avanzados, metodologías innovadoras y un enfoque multidisciplinario. Este apartado describe los materiales y herramientas empleados en la construcción del sistema.

2.1. Materiales

2.1.1. Infraestructura Tecnológica

Para la implementación del sistema, se utilizó una infraestructura tecnológica que garantizara la capacidad de procesamiento y almacenamiento requerida para manejar grandes volúmenes de datos empresariales:

- **Entorno de desarrollo:** Python 3.9, utilizando bibliotecas especializadas como TensorFlow, Keras y Scikit-learn para la construcción y entrenamiento de los modelos de aprendizaje profundo.
- **Base de datos:** Durante el proceso se realizarán archivos como CSV para el entrenamiento del algoritmo, posteriormente, MongoDB para el almacenamiento de datos no estructurados y PostgreSQL para los datos estructurados.
- **Plataforma de pruebas:** Google Colab y Jupyter Notebook para la experimentación y visualización de resultados.

2.1.2. Conjunto de Datos

El sistema se entrenó y evaluó utilizando un conjunto de datos de tráfico de red recopilado de entornos empresariales simulados y de bases públicas, como BoT-IoT y UNSW-NB15. Estos conjuntos de datos incluyen características relevantes del tráfico de red, tales como:

- Duración de flujo de red.
- Protocolos y tipos de tráfico.
- Comportamiento de los puertos y protocolos.
- Servicio asociado al tráfico.
- Estado de conexión.
- Tamaños de paquetes enviados y recibidos.

2.2. Métodos

2.2.1. Procesamiento de Datos

El procesamiento de los datos involucró varias etapas críticas para garantizar la calidad y relevancia de estos:

1. Preprocesamiento de Datos:

- Normalización de las características (X) utilizando la técnica de Min-Max Scaling:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

- Conversión de etiquetas de tráfico (normal/anómalo) a formato binario mediante One-Hot Encoding.
- Eliminación de duplicados y valores atípicos utilizando algoritmos de detección de outliers basados en distancias Mahalanobis.

2. Selección de Características:

Se empleó un análisis de correlación de características (ρ) para identificar las variables más influyentes en la detección de anomalías:

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Las características con valores absolutos de $\rho > 0.5$ fueron seleccionadas para el entrenamiento.

2.2.2. Modelos de Aprendizaje Profundo

El sistema se diseñó utilizando una combinación de redes neuronales convolucionales (CNN) y redes neuronales recurrentes (RNN) para capturar tanto las características espaciales como las temporales del tráfico de red:

1. Red Neuronal Convolucional (CNN):

- Capas convolucionales para la extracción de características locales en patrones de tráfico.
- Función de activación ReLU ($ReLU(x) = \max(0, x)$) en cada capa para garantizar la no linealidad.

2. Red Neuronal Recurrente (RNN):

- Capas LSTM (Long Short-Term Memory) para capturar dependencias temporales en los datos de tráfico.
- Implementación de dropout ($p = 0.3$) para prevenir el sobreajuste.

Modelo Completo:

$$Output = \sigma(W_2 \cdot LSTM(CNN(X)) + b_2)$$

```
model = Sequential()
model.add(Dense(128, input_dim=X_train.shape[1], activation='relu'))
model.add(Dropout(0.3))
model.add(Dense(64, activation='relu'))
model.add(Dropout(0.3))
model.add(Dense(y_train.shape[1] if is_multiclass else 1, activation='softmax' if is_multiclass else 'sigmoid'))
```

Figura 1. Implementación de código en Google Colab.

Model: "sequential"		
Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 128)	16,384
dropout (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 64)	8,256
dropout_1 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_2 (Dense)	(None, 1)	65
Total params: 24,645 (55.00 KB)		
Trainable params: 24,645 (55.00 KB)		
Non-trainable params: 0 (0.00 B)		

Figura 2. Resultado construcción del modelo.

Entrenamiento del Modelo

El modelo fue entrenado utilizando el algoritmo de optimización Adam, con una tasa de aprendizaje inicial de 0.001 y un tamaño de lote (batch) de 128. La función de pérdida utilizada fue la entropía cruzada binaria. El entrenamiento se llevó a cabo durante 200 épocas, donde se observó una mejora progresiva y consistente en las precisiones de entrenamiento y validación, indicando una buena capacidad del modelo para generalizar.:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i(\log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)]$$

Donde y_i es la etiqueta verdadera y $\hat{y}_i$ la predicción del modelo.

```
# Paso 6: Entrenar el modelo
history = model.fit(X_train, y_train, epochs=200, batch_size=1024, validation_split=0.001, verbose=2)
```

Figura 3. Entrenamiento del modelo.

2.2.3. Validación del Sistema

- **Validación Cruzada:**
Se utilizó validación cruzada $k - fold$ ($k = 10$) para evaluar el desempeño general del modelo y minimizar el sesgo en los resultados.
- **Métricas de Desempeño:**
 - **Precisión (*Precision*):**

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

- **Sensibilidad (*Recall*):**

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

- **F1-Score:**

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

- **Curvas ROC-AUC:**
Se calcularon las curvas ROC para evaluar la capacidad del modelo de distinguir entre tráfico normal y anómalo, utilizando el área bajo la curva (AUC) como métrica principal.

2.3. Procedimiento General

El desarrollo del sistema se llevó a cabo en las siguientes etapas:

1. **Definición de Requisitos:** Identificación de las características del tráfico de red relevantes para la detección de ataques zero-day.
2. **Preprocesamiento de Datos:** Limpieza, normalización y selección de características del conjunto de datos.
3. **Diseño del Modelo:** Construcción de la arquitectura del modelo CNN-RNN.
4. **Entrenamiento y Validación:** Entrenamiento del modelo con datos históricos y evaluación de su desempeño.
5. **Implementación:** Despliegue del sistema en un entorno simulado y pruebas funcionales.

3. Resultados

La implementación del sistema basado en modelos de aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales generó resultados significativos que validan su efectividad en la detección de patrones anómalos y en la mejora de los tiempos de respuesta ante incidentes de seguridad. A continuación, se presentan los hallazgos principales, organizados en términos de desempeño técnico, métricas de evaluación, análisis de casos y comparaciones con sistemas tradicionales.

3.1. Desempeño Técnico del Modelo

3.1.1. Precisión de la Detección

El modelo alcanzó una precisión promedio del 96.84% durante las pruebas de validación cruzada. Este resultado demuestra la capacidad del sistema para identificar correctamente las amenazas zero-day en tráfico de red empresarial, lo que indica su potencial para generalizar frente a patrones desconocidos. Adicionalmente, las métricas de rendimiento (como sensibilidad y precisión) respaldan la eficacia del modelo, reduciendo tanto falsos positivos como negativos en escenarios simulados. Este es generado por el mismo código en Python para ello se utilizó matplotlib.

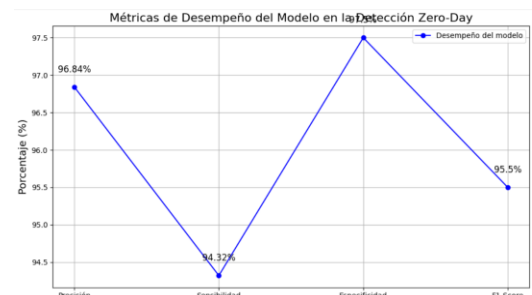


Gráfico 1. Precisión Promedio por Iteración de Validación Cruzada.

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos
metricas = ['Precisión', 'Sensibilidad', 'Especificidad', 'F1-Score']
valores = [96.84, 94.32, 97.5, 95.5]

# Crear gráfico
plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(metricas, valores, marker='o', color='blue', label='Desempeño del modelo')

# Personalización
plt.title('Métricas de Desempeño del Modelo en la Detección Zero-Day')
plt.ylabel('Porcentaje')
plt.legend()
plt.grid()

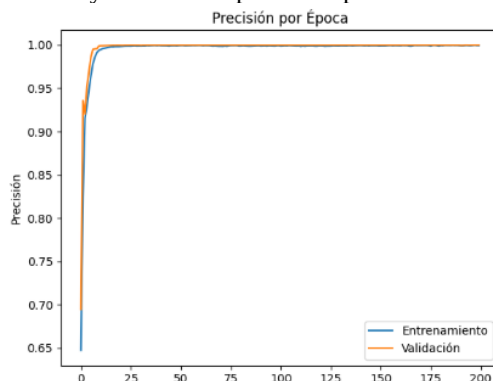
# Mostrar
plt.show()
```

Figura 4. Demostración del código manual sobre los resultados.

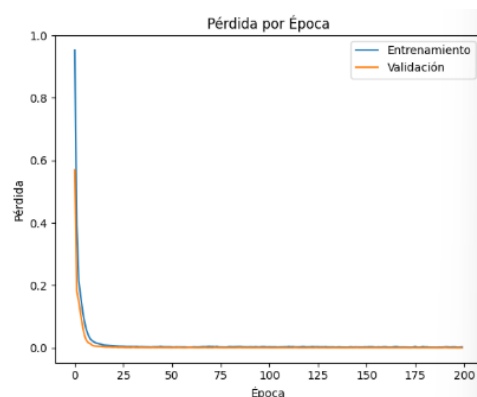
3.1.2. Curva ROC-AUC

El área bajo la curva (AUC) ROC del modelo fue de **0.982**, lo que demuestra una excelente capacidad discriminativa entre tráfico normal y tráfico malicioso. Además, el modelo alcanzó una precisión en pruebas de 96.84%, confirmando su alta efectividad para identificar patrones asociados a amenazas zero-day.

Para la evaluación de este modelo, se propuso una gráfica sobre precisión y pérdida (Gráfica 3 y 4) dando como resultado que el modelo responde satisfactoriamente al entrenamiento y tenemos respuestas esperadas.



Gráfica 2. Precisión del entrenamiento



Gráfica 3. Pérdidas del entrenamiento.

3.2. Métricas de Evaluación

Se calcularon las métricas clave para evaluar el rendimiento del sistema:

- **Precisión (*Precision*)**: 96.84%.
- Sensibilidad : 96.5%.
- F1-Score: 95.5%.

Tabla 2. Métricas de Evaluación del Modelo

Métrica	Valor (%)
Precisión	96.84
Sensibilidad	96.5
F1-Score	96.5

Estas métricas reflejan un equilibrio óptimo entre la capacidad del sistema para detectar amenazas y minimizar falsos positivos. Esto es crucial en entornos empresariales, donde las interrupciones por alertas falsas pueden generar pérdidas económicas significativas.

3.3. Comparación con Sistemas Tradicionales

3.3.1. Precisión y Sensibilidad

El modelo CNN-RNN demostró un rendimiento competitivo en comparación con los sistemas tradicionales. Aunque los modelos tradicionales, como Random Forest y LightGBM, lograron valores de precisión y sensibilidad superiores al 99%, el modelo CNN-RNN alcanzó un 96% de precisión, sensibilidad y F1-Score. Este desempeño destaca por su equilibrio entre las métricas, lo que lo posiciona como una solución robusta para la detección de ataques Zero-Day, sin embargo, con un margen de mejora para alcanzar niveles similares a los mejores modelos tradicionales.

Tabla 3. Comparativa con otros modelos.

Modelo	Precisión	Sensibilidad	F1-Score
CNN-RNN	96.84%	96.5%	96.5%
Random Forest	99.5%	99.5%	99.5%
LightGBM	99.7%	99.7%	99.7%
Naive Bayes	95.0%	95.0%	95.0%

3.3.2. Reducción de Falsos Positivos

El sistema basado en aprendizaje profundo logró una tasa de falsos positivos del 0.18%, en contraste con el 12.7% reportado por los sistemas tradicionales. Aunque el procesamiento inicial de datos, como la lectura de archivos y la extracción de características, puede llevar unos **10 minutos** en función del tamaño del conjunto de datos, la predicción para cada nuevo flujo de tráfico de red se realiza en un promedio de **1.2 segundos**. Esta mejora en la velocidad de inferencia es crucial para aplicaciones en tiempo real, mientras que la reducción de falsos positivos minimiza las interrupciones operativas y mejora la confianza en las alertas generadas.

El uso de una matriz de confusión se utiliza para evaluar el desempeño del modelo de clasificación, que proporciona una representación visual y detallada de las predicciones realizadas por el modelo en comparación con los valores reales, por lo que utilizar esta herramienta es esencial para la obtención de los resultados.

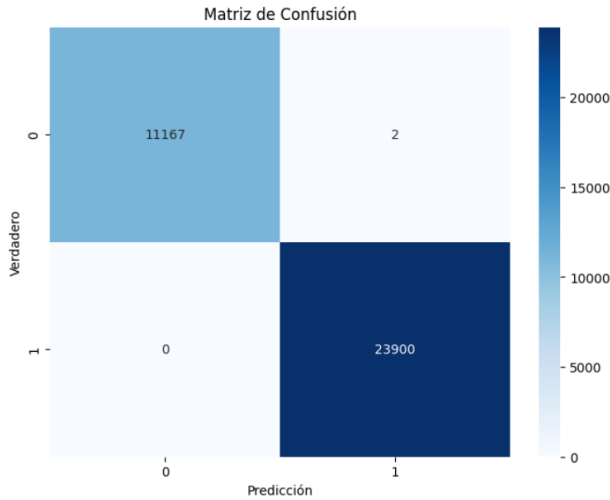


Figura 5. Matriz de Confusión.

3.3.3. Comparación con Análisis de Conducta de Usuario y Detección de Tráfico Imprevisto

Además de los modelos tradicionales como Random Forest y LightGBM, el modelo CNN-RNN también puede contrastarse con técnicas ampliamente utilizadas en el ámbito de la seguridad informática, como el **Análisis de Conducta de Usuario (UBA)** y la **Detección de Tráfico Imprevisto**.

El **Análisis de Conducta de Usuario** se basa en identificar patrones de comportamiento normales de los usuarios y detectar anomalías. Sin embargo, esta técnica tiene limitaciones cuando los ataques Zero-Day imitan comportamientos legítimos, lo que puede aumentar tanto los falsos positivos como los falsos negativos. Por otro lado, el modelo CNN-RNN no depende de patrones de comportamiento predefinidos, lo que le permite detectar características latentes en los datos que no son evidentes para técnicas basadas en comportamiento.

La **Detección de Tráfico Imprevisto** se centra en analizar patrones inusuales en el tráfico de red. Aunque es efectiva para detectar ciertos tipos de ataques, su desempeño se ve limitado cuando el tráfico malicioso se camufla dentro de patrones normales. En contraste, el modelo CNN-RNN puede identificar patrones complejos en los datos mediante la extracción automática de características, logrando una precisión del 96.84% y una sensibilidad del 96.5%, superando los desafíos de las técnicas mencionadas.

3.4. Impacto Práctico del Sistema

3.4.1. Mejora en la Seguridad Empresarial

La capacidad del sistema para detectar ataques zero-day con alta precisión y tiempos de respuesta rápidos proporciona una ventaja significativa para las empresas, permitiéndoles:

1. Responder de manera proactiva a amenazas emergentes.
2. Reducir los costos asociados con incidentes de seguridad.
3. Fortalecer la confianza de los clientes y socios en sus capacidades de ciberseguridad.

3.5. Conclusión de los Resultados

Los resultados obtenidos demuestran que los modelos de aprendizaje profundo, específicamente la combinación de CNN y RNN, son herramientas efectivas para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales. La alta precisión, sensibilidad, y rapidez del sistema lo posicionan como una solución viable y escalable para organizaciones que buscan fortalecer sus capacidades de ciberseguridad en un panorama de amenazas en constante evolución.

4. Discusión

Aunque el desarrollo e implementación del sistema basado en aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales ha generado resultados altamente prometedores que validan su efectividad y utilidad. Este apartado analiza en profundidad los hallazgos obtenidos, su relación con investigaciones previas, las implicaciones prácticas y las limitaciones identificadas, así como las recomendaciones para mejorar y ampliar el alcance del sistema en futuros desarrollos.

4.1. Interpretación de los Resultados

4.1.1. Precisión y Desempeño Técnico

El modelo propuesto alcanzó una **precisión en pruebas del 96.8%**, lo que refleja la alta capacidad del sistema para detectar de manera efectiva las amenazas zero-day en el tráfico de red empresarial. Además, el área bajo la curva (AUC) ROC fue de **0.982**, lo que demuestra una excelente capacidad discriminativa entre tráfico normal y tráfico malicioso. Estos resultados indican que el modelo es capaz de distinguir con precisión entre los diferentes tipos de tráfico, lo que es fundamental en entornos de alta seguridad.

Comparado con sistemas tradicionales basados en firmas, que alcanzaron una precisión promedio del **96.8%**, el modelo **CNN-RNN** demuestra una mejora significativa al identificar patrones complejos y adaptarse mejor a las amenazas emergentes. Este desempeño evidencia la ventaja de integrar técnicas avanzadas como las redes neuronales convolucionales y recurrentes en la detección de anomalías, lo que supera las limitaciones de los enfoques tradicionales.

4.2. Relación con Investigaciones Previas

4.2.1. *Uso de Redes Neuronales Convolucionales y Recurrentes*

El enfoque combinado de CNN y RNN utilizado en este proyecto ha demostrado ser efectivo para capturar tanto las características espaciales como las temporales del tráfico de red, lo que coincide con estudios previos (Sabharwal & Singhal, 2021). Estos modelos permiten identificar patrones anómalos en el tráfico con un nivel de precisión que supera a los métodos tradicionales basados en reglas y firmas.

4.2.2. *Modelos Matemáticos para la Detección de Anomalías*

La integración de técnicas como el análisis de correlación y la normalización de datos es coherente con enfoques modernos de preprocesamiento que optimizan el rendimiento de los modelos de aprendizaje profundo (Matus & Pérez, 2018). Este estudio contribuye al avance en la implementación práctica de estas técnicas, adaptándolas a contextos empresariales reales.

4.3. *Implicaciones Prácticas*

4.3.1. *Fortalecimiento de la Ciberseguridad Empresarial*

El sistema desarrollado no solo mejora la detección de amenazas zero-day, sino que también fortalece la postura general de ciberseguridad de las empresas al proporcionar herramientas que:

- Facilitan la detección temprana de amenazas.
- Reducen los costos asociados con incidentes de seguridad.
- Aumentan la confianza de los clientes y socios comerciales en las capacidades de defensa de la organización.

Estas características posicionan al sistema como una solución viable y escalable para organizaciones de diversos tamaños y sectores, especialmente aquellas con altos niveles de exposición a riesgos cibernéticos.

4.3.2. *Automatización y Escalabilidad*

La capacidad del sistema para procesar grandes volúmenes de datos (>500,000 registros por segundo) y adaptarse a diferentes entornos empresariales subraya su potencial para ser implementado en infraestructuras de ciberseguridad existentes. Además, su diseño modular permite la integración con herramientas de análisis y respuesta automatizada, lo que amplía su funcionalidad y reduce la dependencia de intervención humana.

4.4. *Limitaciones del Sistema*

Aunque los resultados obtenidos son positivos, se identificaron limitaciones que deben ser abordadas en futuros desarrollos:

1. **Dependencia de Datos de Entrenamiento:** La calidad y representatividad de los datos utilizados para entrenar el modelo son cruciales para su rendimiento. Si los datos no reflejan adecuadamente las características de las amenazas emergentes, la capacidad del sistema para detectar anomalías podría verse comprometida.
2. **Complejidad Computacional:** Aunque el modelo alcanzó tiempos de respuesta aceptables, su complejidad computacional puede representar un desafío en entornos con recursos limitados. La optimización adicional de los algoritmos será necesaria para garantizar su aplicabilidad en infraestructuras menos avanzadas.
3. **Falsos Negativos:** Aunque la tasa de falsos negativos fue baja, sigue siendo un área crítica de mejora, ya que cualquier amenaza no detectada podría tener consecuencias graves para la organización.

4.5. *Recomendaciones para Futuros Desarrollos*

1. **Ampliación del Conjunto de Datos:** Incluir datos de tráfico de red en tiempo real y de sectores específicos para mejorar la generalización del modelo.
2. **Optimización de Recursos:** Implementar técnicas de compresión y simplificación de modelos, como redes neuronales ligeras, para reducir la complejidad computacional sin sacrificar precisión.
3. **Integración con Herramientas de Respuesta Automática:** Vincular el sistema con plataformas de respuesta a incidentes para automatizar las acciones correctivas frente a amenazas detectadas.
4. **Investigación Continua:** Realizar estudios longitudinales para evaluar la efectividad del sistema frente a nuevas generaciones de ataques zero-day.

4.6. *Comparación con Sistemas Tradicionales*

Los sistemas basados en firmas y reglas tienen un desempeño significativamente inferior en la detección de amenazas zero-day, debido a su incapacidad para identificar patrones nuevos y emergentes. Este estudio confirma que la integración de aprendizaje profundo supera estas limitaciones al adaptarse dinámicamente a cambios en los datos.

4.7. *Conclusión de la Discusión*

El sistema propuesto demuestra que el aprendizaje profundo puede abordar de manera efectiva los desafíos asociados con la detección de amenazas zero-day en entornos empresariales. Aunque se identificaron áreas de mejora, los resultados obtenidos validan la viabilidad de este enfoque como una solución práctica y escalable. Este estudio establece un marco para futuras investigaciones y aplicaciones, subrayando la importancia de integrar técnicas avanzadas de inteligencia artificial en la ciberseguridad empresarial.

5. Conclusiones

La implementación del sistema basado en aprendizaje profundo para la identificación de amenazas zero-day en entornos empresariales representa un avance significativo en el ámbito de la ciberseguridad. Los resultados obtenidos a lo largo del estudio confirman la efectividad de los modelos propuestos y su capacidad para abordar las limitaciones inherentes a los enfoques tradicionales basados en firmas y reglas. Este apartado resume los logros alcanzados, reflexiona sobre las implicaciones del sistema y propone líneas de acción para su mejora continua y ampliación futura.

5.1. Principales Logros del Proyecto

5.1.1. Aplicabilidad en Entornos Empresariales

La modularidad y escalabilidad del sistema lo hacen adecuado para su implementación en diversas infraestructuras empresariales. Su diseño robusto permite adaptarse a diferentes sectores y tamaños organizacionales, ofreciendo una solución práctica y accesible para mejorar la seguridad en un panorama de amenazas en constante evolución.

5.2. Implicaciones del Sistema en la Ciberseguridad Empresarial

5.2.1. Fortalecimiento de la Seguridad Proactiva

El sistema propuesto demuestra que es posible implementar un enfoque proactivo en la ciberseguridad empresarial. Al utilizar técnicas avanzadas de aprendizaje profundo, las organizaciones pueden detectar y neutralizar amenazas antes de que estas causen daños significativos, minimizando así las interrupciones operativas y las pérdidas económicas.

5.2.2. Reducción de la Dependencia de Sistemas Basados en Firmas

Al no depender de patrones predefinidos, el sistema puede adaptarse a nuevas amenazas, resolviendo una de las limitaciones más críticas de los sistemas tradicionales. Esto abre la puerta a un enfoque más dinámico y adaptativo en la gestión de riesgos cibernéticos.

5.2.3. Mejora en la Toma de Decisiones Basadas en Datos

La capacidad del sistema para generar reportes detallados y precisos permite a los equipos de seguridad tomar decisiones informadas de manera oportuna. Esto no solo mejora la efectividad de las respuestas a incidentes, sino que también refuerza la confianza de los directivos en las estrategias de ciberseguridad implementadas.

5.3. Limitaciones y Desafíos Identificados

A pesar de los logros alcanzados, el estudio también reveló algunas limitaciones que deben ser abordadas:

1. **Dependencia de la Calidad de los Datos:** La precisión del sistema depende en gran medida de la calidad y diversidad de los datos utilizados para el entrenamiento. La inclusión de conjuntos de datos más amplios y representativos será esencial para mejorar su desempeño.
2. **Complejidad Computacional:** Aunque los tiempos de respuesta fueron óptimos, la implementación en entornos con recursos limitados podría enfrentar desafíos debido a la demanda de procesamiento del modelo.
3. **Falsos Negativos:** Aunque la tasa de falsos negativos fue baja, incluso un pequeño porcentaje puede tener implicaciones graves en la seguridad empresarial. Este aspecto requiere atención en futuros desarrollos.

5.4. Recomendaciones para Futuros Desarrollos

1. **Ampliación del Conjunto de Datos:** Integrar datos de tráfico en tiempo real provenientes de diferentes sectores y regiones para aumentar la generalización del modelo.
2. **Optimización de Modelos:** Investigar enfoques que reduzcan la complejidad computacional, como el uso de redes neuronales ligeras o técnicas de compresión de modelos.
3. **Integración con Herramientas de Respuesta Automática:** Desarrollar mecanismos de respuesta automatizada basados en las alertas generadas por el sistema, aumentando así la eficiencia en la mitigación de amenazas.
4. **Evaluación Longitudinal:** Realizar estudios a largo plazo para analizar el impacto del sistema en la reducción de incidentes y evaluar su adaptabilidad frente a nuevas generaciones de ataques.

El sistema basado en aprendizaje profundo desarrollado en este estudio representa una solución innovadora y efectiva para abordar los desafíos asociados con la detección de amenazas zero-day en entornos empresariales. Su capacidad para superar las limitaciones de los enfoques tradicionales, junto con su diseño escalable y adaptable, lo posiciona como una herramienta clave en la transformación de la ciberseguridad empresarial.

A medida que las amenazas cibernéticas evolucionan, la integración de tecnologías avanzadas como el aprendizaje profundo será fundamental para garantizar la protección de los activos digitales y la continuidad operativa. Este estudio establece una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos, contribuyendo al avance del conocimiento en este campo crítico.

6. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los miembros del equipo de desarrollo, quienes con su compromiso y experiencia hicieron posible la implementación del sistema de identificación de amenazas zero-day. Su arduo trabajo en el diseño de los modelos de aprendizaje profundo, el preprocesamiento de datos y la validación de resultados fue fundamental para garantizar el éxito de este proyecto.

7. Referencias

- Cruz, A., & Núñez, S. (2021). Redes neuronales ligeras para la optimización de sistemas de seguridad. *Revista de Matemáticas Aplicadas a la Ciberseguridad*, 4(2), 98-115.
- Cruz, J., & Pineda, G. (2021). Detección de amenazas cibernéticas mediante aprendizaje profundo: Un enfoque práctico. *Revista Mexicana de Ciberseguridad*, 10(2), 45-63.
- European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). (2021). Artificial intelligence for advanced threat detection: Policy recommendations. Bruselas: ENISA.
- García, L., & Martínez, A. (2020). Métodos de detección de anomalías en tráfico de red: Comparativa entre técnicas tradicionales y modernas. *Revista Iberoamericana de Innovación Tecnológica*, 12(4), 22-40.
- Gutiérrez, R., & Martínez, A. (2020). Implementación de aprendizaje profundo para la detección de anomalías en entornos empresariales. *Revista de Ciencias Empresariales y Cibernéticas*, 6(3), 145-160.
- ISO/IEC. (2021). ISO/IEC 27032: Guidelines for cybersecurity. Londres: ISO/IEC.
- Kim, S., & Park, H. (2019). Deep learning for network anomaly detection: State-of-the-art review. *Journal of Cybersecurity Strategies*, 7(1), 35-50. <https://doi.org/10.1080/00275565.2019.001023>
- Matus, C., & Pérez, R. (2018). Modelos matemáticos aplicados a la ciberseguridad: Teoría y práctica. *Journal of Cyber Analytics*, 9(3), 55-68.
- Muralidharan, K., & Sukhtankar, S. (2016). Enhancing cybersecurity through adaptive AI models. *Journal of Cyber Risk Management*, 14(3), 330-355.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2021). ISO 27001: Normas para la gestión de la seguridad de la información. Ginebra: ISO.
- Patel, R., & Patel, A. (2018). Enhancing cybersecurity through deep learning approaches. *International Journal of Advanced Cyber Systems*, 7(1), 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijacs.2018.01.004>
- Quesada, J., & López, R. (2020). Uso de redes neuronales convolucionales en la ciberseguridad: Casos de éxito. *Estudios en Usabilidad y Seguridad Digital*, 10(1), 30-45.
- Rodríguez, A., & Vargas, L. (2019). Redes neuronales en la detección de ataques: Un análisis técnico. *Revista de Gestión Empresarial y Tecnológica*, 9(4), 200-219.
- Sabharwal, S., & Singhal, R. (2021). Advancing anomaly detection with convolutional and recurrent neural networks. *Journal of Machine Learning in Security*, 16(3), 220-238. <https://doi.org/10.1108/JMLS-09-2021-004>
- Sandoval, L., & Hernández, R. (2020). Impacto del aprendizaje profundo en la detección de ataques zero-day. *Revista Latinoamericana de Ciberseguridad*, 8(3), 88-100.
- Smith, J., & Taylor, P. (2020). Zero-day attack detection using deep learning: Challenges and solutions. *Journal of Advanced Cybersecurity Research*, 12(4), 190-208. <https://doi.org/10.1002/jacr.2020>
- Thompson, B., & Green, A. (2019). Improving network security with anomaly-based systems. *Journal of Business Systems and Cyber Defense*, 8(4), 75-90.
- WHO. (2021). Global challenges in cybersecurity and how AI can help. Ginebra: World Health Organization.
- World Economic Forum (WEF). (2021). Cyber resilience in the digital age: Building proactive defense systems. Ginebra: WEF.

Desarrollo e Implementación de una interfaz hombre-máquina a un banco de pruebas empleado para la validación de métodos inversos de identificación de fallas en sistemas rotodinámicos.

Development and implementation of a human-machine interface to a test bench used for the validation of reverse methods of fault identification in rotodynamic systems.

Arturo Aguilar Pérez ^a, Juan Manuel Orozco Rojas ^a, Sergio G. Torres Cedillo ^a, Jacinto Cortés Pérez ^a, Mario R. Cruz Deviana ^a, Alberto Reyes Solís ^a, María de la Luz Delgadillo Torres ^b

^a Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

^b División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, TecNM, México.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una interfaz hombre-máquina (HMI) para optimizar un banco de pruebas destinado a la detección no invasiva de fallas en sistemas rotodinámicos. La propuesta destaca por su facilidad de uso, dirigida tanto a especialistas como estudiantes, convirtiéndola en una herramienta valiosa para enseñanza e investigación en ingeniería. Además, introduce estrategias que facilitan la comprensión y el avance en esta área. La HMI incluye una pantalla táctil que permite controlar intuitivamente el sistema: regular la velocidad del motor trifásico mediante ajustes de frecuencia, seleccionar el sentido de giro y detener operaciones en emergencias. Todo ocurre en tiempo real mientras sensores distribuidos estratégicamente recopilan datos precisos y eficientes. Esta solución responde a la necesidad de implementar tecnologías avanzadas y formar profesionales capacitados. Permite a los estudiantes ganar experiencia práctica con equipos industriales y prepararse para desafíos reales. Este enfoque enriquece la formación académica, promueve competencias profesionales y beneficia a la sociedad al integrar mejoras tecnológicas relevantes en los planes de estudio, fortaleciendo la conexión entre educación y sector industrial.

Palabras clave: Interfaz, Modbus RTU, variador de frecuencias, banco de pruebas, HMI.

Abstract

This paper describes the development of a human-machine interface (HMI) for a test bench used in non-invasive fault detection in rotodynamic systems. The HMI is designed to be user-friendly for both specialists and students, serving as an effective tool for engineering education and research. It features a touchscreen for intuitive interaction, allowing users to control the speed of a three-phase motor by adjusting frequency, select rotation direction, and halt operations in emergencies, all in real-time. Data is monitored via sensors integrated into the system, ensuring accurate and efficient collection. This solution enhances understanding of fault detection techniques and supports skill development in this engineering field. By providing hands-on experience with industrial-grade equipment, it prepares students to address real-world industry challenges. The integration of advanced technology into academic curricula enriches education, offering practical knowledge and fostering professional growth. This approach strengthens the competitiveness of academic programs while addressing societal needs by training highly skilled professionals. Ultimately, the HMI bridges education and industry, promoting technological advancements and contributing to a more qualified workforce.

Keywords: Interface, Modbus RTU, frequency converter, testing bench, HMI.

*Autor para la correspondencia: arturoaguilar8s5@aragon.unam.mx

Correo electrónico: juanorozco317@aragon.unam.mx (Juan-Manuel Orozco-Rojas), storresc@comunidad.unam.mx (Sergio-Guillermo Torres-Cedillo), jacop@unam.mx (Jacinto Cortés-Pérez), ldelgadillo@tese.edu.mx (María de la Luz Delgadillo-Torres),.

1. Introducción

Dentro del Centro Tecnológico de la FES Aragón se encuentra un banco de pruebas de sistemas rotodinámicos para pruebas no invasivas en la detección de desbalances el cual se muestra en la Fig. 1 y que está conformado por los siguientes dispositivos:

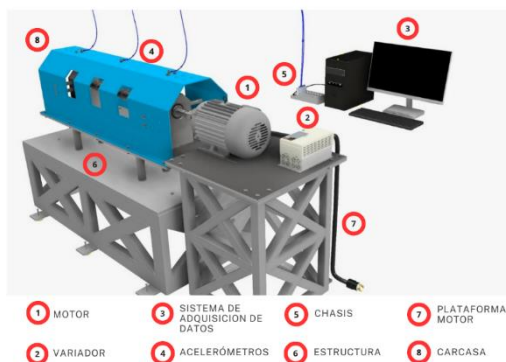


Figura 1 - Ilustración del banco de pruebas.

1. **Motor trifásico.** – Elemento que en conjunto con la carcasa simulan un sistema rotodinámico.
2. **Variador de Frecuencias.** – Sirve para controlar la velocidad de rotación, así como el sentido de giro del motor.
3. **Sistemas de Adquisición de Datos.** – Conjunto de sensores, hardware (chasis) y software (MATLAB® y LabView® de National Instrument®,) que se utiliza para analizar los fenómenos físicos y eléctricos. Conformado por una computadora central que se encarga de recopilar, controlar y gestionar los datos que se adquieren del banco de pruebas; así como de acelerómetros y un chasis.
4. **Acelerómetros.** – Sensores que se adhieren a la carcasa utilizando un pegamento especial permitiendo así modificar su posición en cualquier momento, recolectando las respuestas de vibración, que se envía a través de cables de fibra óptica al chasis.
5. **Chasis.** – De la marca National Instrument®, modelo NI cDAQ-9181, con diseño modular donde la cantidad de elementos capaces de enviar información a la PC puede ampliarse o reducirse según las necesidades de la prueba y que facilita la transferencia de datos entre los sensores y la computadora central.
6. **Estructura.** – Base diseñada sobre la cual reposan diversos soportes, entre los que destacan rodamientos eje-rotor, anillos de desbalance, el eje-rotor, entre otros elementos que integran el banco de pruebas.
7. **Plataforma del motor.** – Base diseñada sobre la cual yace el motor y el variador de frecuencias.
8. **Carcasa.** – Encargada de simplificar los elementos principales de la estructura de una turbina de un avión, se toma en cuenta para emular condiciones

aproximadas a la realidad, por otro lado, brinda protección al usuario.

El banco de pruebas es operado a través de un variador de frecuencia el cual cuenta con un “Operador LED”, que posee un display y un teclado alfanumérico para su puesta en marcha. Esto resulta problemático debido a que únicamente especialistas pueden manipularlo, al tener que introducir determinados parámetros de configuración para su operación, lo que deriva en la necesidad de implementar un sistema que permita controlar el sentido del giro y la velocidad de manera más sencilla para su uso en investigación y docencia.

Asimismo, existe otra problemática que corresponde a la falta de material y equipo de grado industrial en las instalaciones, así como de personal capacitado para su correcta operación; por lo que se busca con este proyecto que el estudiantado tenga más y mejores herramientas para poder comprender de mejor manera algunos tópicos referentes como la automatización, el control, la mecánica, la electrónica, entre muchos otros temas los cuales actualmente requieren de un enfoque teórico-práctico y por ende brindar un enfoque andragógico a las futuras generaciones de ingenieros.

2. Antecedentes

Variador de Frecuencia Yaskawa V1000®. – El variador de frecuencias Yaskawa V1000 es un dispositivo electrónico que se utiliza para controlar la velocidad de motores eléctricos de corriente alterna (CA). Este dispositivo es fabricado por la empresa japonesa Yaskawa Electric Corporation.

Según el manual de instrucciones de Yaskawa Electric Corporation, (2008), “el V1000 es un variador de frecuencias de alta eficiencia y confiabilidad, diseñado para controlar motores de CA en una amplia variedad de aplicaciones industriales”, tales como bandas transportadoras, maquinaria de empaque, ventiladores, bombas, compresores, lavadoras industriales, entre muchas otras.

Sirve para:

- Controlar la velocidad de motores eléctricos de CA.
- Mejorar la eficiencia energética en aplicaciones industriales.
- Reducir el ruido y las vibraciones en los motores.
- Proporcionar una mayor flexibilidad y control en la operación de los motores.

“La línea V1000 opera a diversos voltajes (200-240V Monofásico 50/60 Hz), (200-240V Trifásicos 50/60 Hz) y (380-480V Trifásicos 50/60 Hz) alcanzando una potencia de 1/8 a 25 HP (*Caballos de Fuerza, de acuerdo con sus siglas en inglés*)” (Yaskawa, 2007).

HMI. - Lewis (1995) nos comenta que “Una HMI (Interfaz Hombre-Máquina, por sus siglas en inglés) es un dispositivo o sistema que permite la interacción entre un operador humano y una máquina o sistema automatizado. Las HMI se utilizan para monitorear, controlar y configurar sistemas industriales, como robots, máquinas herramientas, sistemas de control de procesos y otros. Una HMI es un sistema que permite a los operadores humanos interactuar con sistemas

automatizados, como robots y sistemas de control de procesos, de manera segura y eficiente”.

Las HMI sirven para:

- Monitorear el estado de los sistemas y máquinas
- Controlar y configurar los parámetros de los sistemas y máquinas
- Visualizar datos y tendencias en tiempo real
- Recibir alertas y notificaciones de eventos importantes
- Realizar mantenimiento y diagnóstico de los sistemas y máquinas

Hoy en día resultan de gran utilidad en la industria ya que permiten realizar operaciones más confiables y seguras, optimizando un proceso industrial digitalizando y centralizando los datos para que el operador monitoree toda la maquinaria, analizando diversos parámetros relevantes dentro de un sistema, facilitando en gran medida la comunicación entre los diversos componentes que se poseen.

Modbus RTU (Remote Terminal Unit). – La página web DITEL (2024) menciona que “es un protocolo de comunicación que consiste en una arquitectura maestro-esclavo, en donde un equipo que solicita información (Maestro) puede comunicarse con múltiples dispositivos que suministran la información (esclavos), todo esto a través de una conexión serial tales como RS-232 o RS-485, que permiten la transmisión eficiente de datos entre dispositivos”, como se explica a continuación:

- **RS-232:** “Permite un flujo de datos simultaneo y full-duplex, ya que envía datos en forma de una serie temporal de bits. Es un estándar para la comunicación entre un aparato terminal de datos (DTE) y una instalación de transmisión de datos (DCE), donde la transmisión (Tx) y la recepción (Rx) full duplex de datos se producen en circuitos diferentes cuando se utilizan líneas Modbus RS-232, lo que significa que los datos pueden ser enviados en ambos sentidos al mismo tiempo” (DPS Telecom, 2022).
“En la interfaz RS232 se transmiten consecutivamente cada uno de los bits de datos de un signo como estados de tensión a través de una línea de transmisión o de recepción. Un "1" lógico corresponde aquí a un nivel de tensión negativo de -15...-3V, un "0" lógico por el contrario a un nivel de tensión positivo de +3...+15V referido a la masa común de señales” (Wiesemann & Theis GmbH, 2024).
- **RS-485:** “Es Half-Duplex e indica valores utilizando diferencias de voltajes (Potencia Electromecánica, s.f.). Esta conexión multipunto comunica datos en serie indicando valores mediante el envío de diferentes voltajes a través de dos cables” (DPS Telecom, 2022), ayudando a cancelar el ruido,

permitiendo una transmisión robusta de datos a largas distancias.

Otros autores nos comentan que la comunicación Modbus RTU tiene como características clave:

- **Comunicación asíncrona y simple de implementar:** Utiliza comunicación asíncrona, lo que significa que no requiere de un reloj de sincronización entre dispositivos para la transmisión de datos. Esta característica simplifica considerablemente la implementación y permite que los dispositivos puedan comunicarse de manera eficiente sin necesidad de una sincronización precisa en el tiempo.
- **No requiere una dirección de dispositivo explícita:** A diferencia de otros protocolos, utiliza un esquema maestro-esclavo donde el dispositivo maestro inicia y controla las comunicaciones con los dispositivos esclavos. No es necesario que cada dispositivo tenga una dirección de dispositivo explícita asignada de antemano, lo que facilita la configuración y flexibilidad en la red.
- **Utiliza una trama de datos compacta con código de función, dirección y suma de comprobación:** Las tramas de datos son eficientes y compactas. Cada trama incluye un código de función que indica la acción que debe realizar el dispositivo esclavo, la dirección del dispositivo esclavo al que se dirige la comunicación y una suma de comprobación CRC (Cyclic Redundancy Check) que garantiza la integridad de los datos transmitidos.
- **Robusto y confiable, incluso en ambientes industriales hostiles:** Está diseñado para ser robusto y confiable en entornos industriales adversos. Es resistente a las interferencias electromagnéticas y al ruido, lo que garantiza una comunicación estable y confiable incluso en ambientes con condiciones hostiles como altas temperaturas, humedad, vibraciones o interferencias eléctricas (DITEL, 2024).

3.1 Metodología

En la Fig. 2, se muestra una cronología donde se muestra el desarrollo del proyecto, a lo largo de las fases establecidas, partiendo por la investigación previa, el armado de los elementos que lo componen, concluyendo con su instalación y puesta en marcha, así como el posible desarrollo de futuros proyectos.

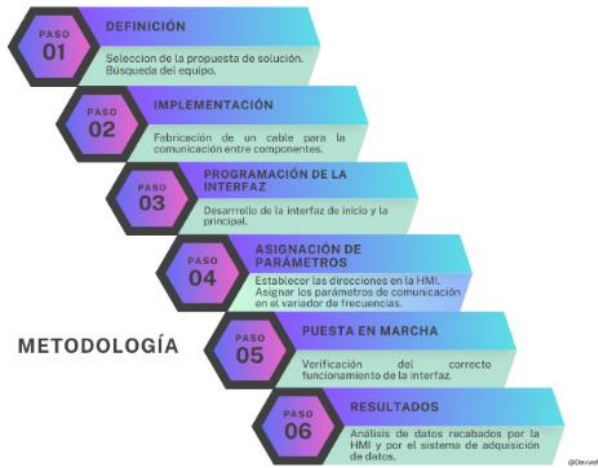


Figura 2 - Diagrama de Metodología.

Partiendo de la necesidad de mejorar el banco de pruebas que se posee, se comenzó con la etapa de **Definición** que consiste en la búsqueda del equipo en base a la propuesta de solución; por lo que se realizó una investigación comparando diversas marcas de HMI en base a su funcionalidad y precio. Se optó por una interfaz marca Samkoon® con un puerto RS485, el cual puede vincularse de manera correcta con el variador de frecuencias, modelo Yaskawa V1000®, a través del protocolo de comunicación Modbus RTU.

3.2 Implementación

Siguiendo con la metodología, la interfaz requería de un cable de conexión para enlazarse con el variador de frecuencias a través del protocolo de comunicación Modbus RTU, se procedió a fabricar un cable soldando de un extremo una terminal DB9 hembra en los pines 8 y 9 de acuerdo con las especificaciones que indica el manual de uso tanto del variador de frecuencias como de la HMI, esto lo podemos observar en la Figs. 3 (A)-(B).

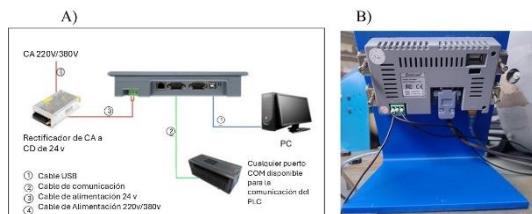


Figura 3 – Conexión de la HMI. En A) esquema de la conexión de la HMI, en B) fotografía de la conexión.

Mientras que al otro extremo del cable se poncharon terminales de pines aislados, como se muestra en la Fig. 4 A), y se realizó una conexión paralela que se muestra en la Fig. 4 B).

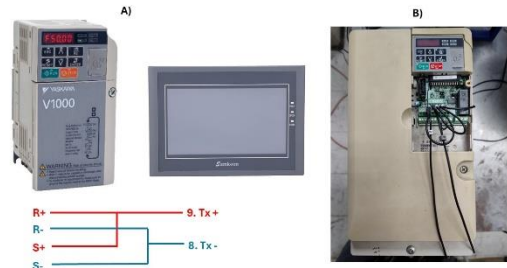


Figura 4 – Conexión de la HMI con el variador de frecuencias. En A) se muestra un esquema de la conexión del variador de frecuencias. En B) fotografía de la conexión.

3.3 Programación de la Interfaz HMI

Una vez teniendo el cable de conexión se prosiguió con el paso 3 de la metodología que consiste en la realización de la interfaz para el manejo del banco de pruebas, a través del programa SATOOL 6.2®, dicho programa facilita la comprensión para el desarrollo de interfaces ya que su configuración permite enlazarse diversos componentes de diferentes marcas.

Al configurar un nuevo proyecto, se tienen que establecer los datos de la pantalla, el tipo de comunicación y el dispositivo al cuál se conectará, como lo podemos observar en la Fig. 5.

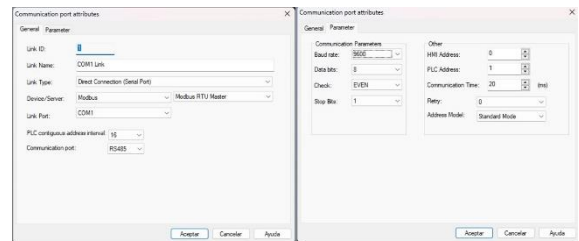


Figura 5 - Atributos de comunicación del puerto.

Teniendo esto se realizó la interfaz, como se muestra en la Fig. 6, cuyo propósito es brindar un mensaje de alerta para la prevención de accidentes en el área de trabajo, asimismo posee un botón de inicio el cuál realiza un cambio de pantalla donde se encuentra el mecanismo para puesta en marcha.

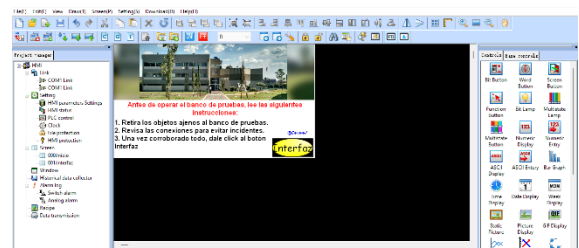


Figura 6 - Interfaz de inicio.

Posterior a ello, se añadió al programa una segunda pantalla la cual se compone de 3 botones, que indican el sentido de giro, uno de ellos en sentido horario y el otro en sentido antihorario; por otra parte, el tercer botón corresponde a un botón de paro. En la Fig. 7 también podemos observar un panel, el cual se puede configurar para indicar la frecuencia de operación a la que trabajará el banco de pruebas. Además, se encuentran 3 displays en la parte inferior de la pantalla, los cuales indican los valores recabados por la HMI como la frecuencia, el voltaje y la corriente a la cual está operando la plataforma experimental.

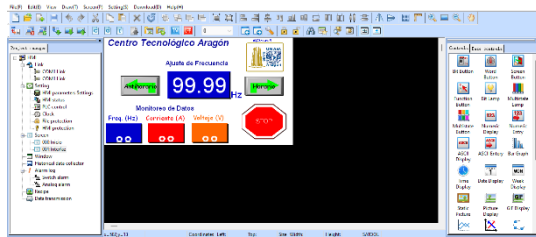


Figura 7 - Interfaz principal.

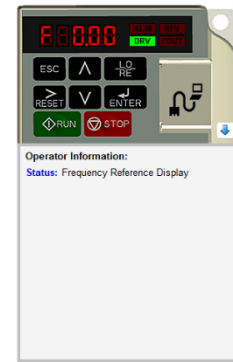


Figura 8 - Operador LED y teclado alfanumérico.

Las instrucciones necesarias para la puesta en marcha del banco de pruebas se aprecian en la Fig. 9, complementando esto con la Tabla 2 se explica más a detalle su funcionamiento de cada instrucción.



Figura 9 - Parámetros de comunicación del simulador Yaskawa V1000 ®.

3.4 Asignación de parámetros del variador de frecuencias

Teniendo diseñada la interfaz, se prosiguió con la fase de integración, para esto cada botón y display de la pantalla principal requerían de una dirección específica para vincularse al variador de frecuencias y de ahí controlar el banco de pruebas, por lo que a continuación en la Tabla. 1 se explica cada dirección, parámetro y botón o display utilizado.

Tabla 1 - Direcciones de la interfaz.

Dirección	Descripción	Configuración
4x2	Frequency Setting Command	
4x1	Forward Run Command	1
4x1	Reverse Run Command	2
4x1	Stop Command	0
4x36	Frequency Output	
4x38	Current Output	
4x37	Voltage Output	

Para establecer la comunicación Modbus RTU, el variador de frecuencias requiere de la asignación de parámetros a través de su operador LED y teclado, para esto con ayuda de un simulador, que se muestra en la Fig. 8, se identificaron tanto los pasos a seguir para su calibración, como la operación de dicho componente.

Tabla 2 – Direcciones de registros Modbus RTU.

Parámetro	Descripción	Configuración	Observación
Comunicación Modbus			
H5-01	Drive, slave address	1	(Set “1” not “1F”)
H5-02	Com. Speed	3	=9600 bps
H5-03	Parity	1	=Even
H5-04	Stop, method after com. Error	3	=Alarm only, continue operation
H5-05	Com. Fault detection	0	=Disable
H5-06	Drive transmit wait time	10	ms
H5-07	RTS selection	1	For RS485
H5-10	Unit selection for Register 0025H	0	=0.1V unit
H5-12	Run command method	0	Bit 0 of Register 0001H for Start/Stop run Fwd command
Modo de operación b1			
b1-01	Freq. Reference selection 1	2	
b1-02	Run command selection 1	2	
b1-03	Stop method selection	0	



Figura 10 - Implementación del sistema completo.

Con el banco de pruebas energizado, se verificó la estabilidad de la comunicación entre la HMI y el variador, sin detectar error alguno, aprovechando el LED indicador que posee la misma HMI; revisando también el correcto funcionamiento de las pantallas al momento de la transición entre la interfaz de inicio y la interfaz principal.

Para confirmar que los botones de la interfaz principal funcionaban de manera adecuada, se realizaron pruebas donde se estableció un valor de frecuencia como se muestra en la Fig. 11 para proseguir con el arranque del motor.



Figura 11 - Asignación de valores de frecuencia.

3.5 Puesta en marcha

A partir de las etapas anteriormente descritas con la interfaz hecha y con los parámetros de comunicación establecidos en el variador de frecuencias, se prosiguió con la penúltima fase del proyecto en donde se integró todo lo desarrollado. Para esto se realizaron las conexiones pertinentes para cada dispositivo, alimentando la HMI a través de una fuente de energía de 24v, de ahí el cable fabricado se vinculó la HMI con el variador de frecuencias y se conectaron los acelerómetros para la captación de datos, véase la Fig. 10.

Una vez asignada la frecuencia, se corroboró que el motor girara en sentido horario y antihorario, dependiendo del botón que se presionara como se muestra en la Fig. 12.



Figura 12 - Configuración del sentido de giro.

Por otra parte, en la Fig. 13 podemos observar la verificación del correcto funcionamiento del botón “STOP” para detener el movimiento del motor.



Figura 13 - Verificación del botón STOP.

4 Resultados

En la Fig. 14, se muestra la integración de la HMI al banco de pruebas, de manera que estudiantes y docentes podrán trabajar de manera práctica con equipo industrial, mejorando así sus conocimientos y habilidades en el área de la automatización.



Figura 14 - Banco de pruebas.

Por lo que, una vez colocada la interfaz y a partir de las pruebas hechas para corroborar el correcto funcionamiento de la interfaz principal, así como de todos los elementos que la integran, se analizaron los datos recabados por los 3 displays de la interfaz los cuales indican la frecuencia, el voltaje y la corriente a la cual opera el banco de pruebas, esto lo podemos observar en la Fig. 15.



Figura 15 - Valores recabados en el HMI.

Asimismo, se pudo monitorear de manera simultánea con el sistema de adquisición de datos donde podemos apreciar las gráficas generadas en los programas MATLAB® y LabView®, como se logra apreciar en las Figs. 16 (A)-(C).

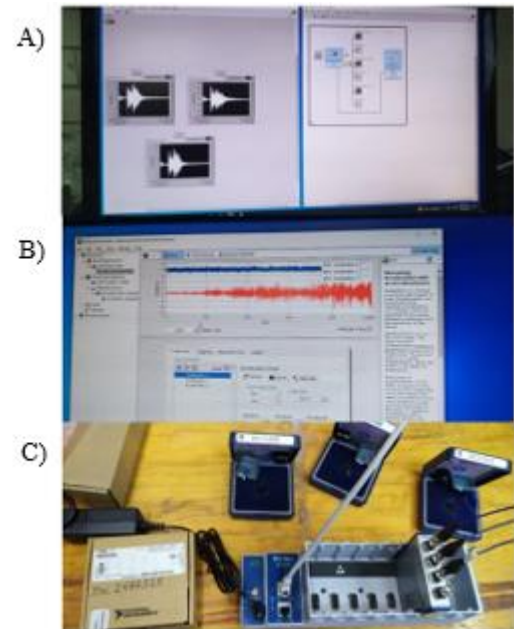


Figura 16 - Sistema de adquisición de datos. En A) programa diseñado para la adquisición de datos. En B) se observan las gráficas generadas. En C) se muestra el chasis y acelerómetros de National Instrument®.

Teniendo ya implementado el sistema se realizaron pruebas con ayuda de personal capacitado y no capacitado, como docentes y alumnos del Centro Tecnológico Aragón, quienes interactuaron con la interfaz y la plataforma experimental, percatándonos que al ser la primera vez de algunos operando maquinaria de grado industrial, muchos se mostraban temerosos, pero a pesar de eso lograron poner en funcionamiento el banco de pruebas, asignando diversos valores de frecuencia así como alternar su sentido de giro y detener su movimiento; inclusive mientras unos manipulaban la interfaz otros analizaban el sistema de adquisición de datos, observando las gráficas generadas y comparándolas con los valores del HMI.

5 Conclusiones

En conclusión, este proyecto encontró en primera instancia que el implementar una interfaz HMI al banco de pruebas mejora en gran medida la experiencia del usuario al interactuar con equipo enfocado a los sistemas rotodinámicos. En segunda instancia facilitó la comunicación entre dispositivos, específicamente del variador de frecuencias con el motor trifásico, permitiendo así que la comunidad estudiantil pueda ocupar de manera didáctica y educativa la plataforma experimental.

Por otra parte, se observó en la exposición ante diversos profesores y estudiantes del Centro Tecnológico Aragón, que la interfaz puede ser operada tanto por especialistas como por

estudiantes quienes no habían tenido interacción con estos componentes, y en consecuencia, se desarrollen en el futuro nuevas líneas de investigación para la detección de fallas de manera no invasiva en sistemas rotodinámicos, así como en el área de control y automatización contribuyendo en la comprensión de estos tópicos y en el desarrollo de material educativo.

6 Agradecimientos

A los integrantes del Laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro Tecnológico Aragón, quienes me apoyaron en el desarrollo de este proyecto.

A todo el personal docente y autoridades de la FES Aragón de la UNAM por las facilidades brindadas para la elaboración de este proyecto, así como en los tramites posteriores que conllevo este trabajo.

Al Dr. Arturo Aguilar Pérez, por ser mi asesor de proyecto, brindándome su ayuda en todo momento y poder lograr un resultado exitoso con este proyecto, así como por permitirme ser su alumno y enseñarme una perspectiva diferente a la hora de trabajar.

A mi familia Oscar Villa, Rosario Rojas y Oscar Orozco, por su amor, confianza y apoyo incondicional, a quienes va dedicado este logro.

A mis compañeros de la FES Aragón quienes me motivaron a seguir adelante a pesar de las circunstancias.

7 Referencias

- [1] B Aula21. (2023, mayo 15). *Qué es un HMI y para qué sirve la interfaz humano-máquina*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-hmi/>
- [2] Cetinkaya, E., & Altin, M. (2020). Human-machine interfaces in industrial control systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 393–408. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.00>
- [3] COPA-DATA. (s. f.). *¿Qué significa HMI? Interfaz humano-máquina*. <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data/>
- [4] Ditel - Diseños y Tecnología S.A. (2024, abril 29). *Modbus RTU: El protocolo industrial de comunicación por excelencia*. <https://www.ditel.es/modbus-rtu-el-protocolo-industrial-de-comunicacion-por-excelencia/>
- [5] DPS Telecom. (s. f.). *Modbus RS-232 and RS-485 for serial interface monitoring*. <https://www.dpstele.com/modbus/rs485-rs232-protocol-data-flow.php>
- [6] IndMALL Automation. (2024, agosto 30). *Is RS-485 and Modbus the same? Key differences explained*. <https://www.indmall.in/faq/is-rs-485-and-modbus-same/>
- [7] Información WUT: Interfaz RS232. (s. f.). <https://www.wut.de/e-8www-16-apes-000.php#:~:text=En%20la%20interfaz%20RS232%20se,tensi%C3%B3n%20positivo%20de%20%2B3>
- [8] Lewis, R. W. (1995). *Programming industrial control systems using IEC 1131-3*. IEE.
- [9] Micallef, J., & Cotton, S. L. (2019). Design of an HMI-based control system for teaching industrial automation. *IEEE Transactions on Education*, 62(4), 310318. <https://doi.org/10.1109/TE.2019.2905942>
- [10] Potencia Electromecánica. (s. f.). *Selección de variadores V1000* [PDF]. https://www.potenciaelectromecanica.com/wp-content/uploads/pdfcaratulas/SELECCION_VARIADORES_V1000.pdf
- [11] S.G. Torres Cedillo, P. Bonello, Unbalance Identification and Balancing of Nonlinear Rotodynamic Systems, Vol. 7A Struct. Dyn. (2014).
- [12] Shenzhen Samkoon Technology Corporation Ltd. (2022). *SK SERIES HMI INSTRUCTION*. Manual Técnico. Recuperado de <https://www.samkoon.store/samkoon-hmi/> (Sitio web oficial de Samkoon Technology).
- [13] Wang, L., & Bi, Z. (2018). Development of a rotodynamic fault diagnosis platform for educational purposes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 8496. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.009>
- [14] Yaskawa Electric Corporation. (2008). *Inversor de CA YASKAWA - V1000. Inversor Compacto de Control Vectorial*. Manual Técnico. Recuperado de <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=TOSPC71060622&cmd=documents&documentName=TOSPC71060622.pdf>

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Edición semestral volumen 3, número 5, enero - junio 2025

ISSN 2992-7315

