

ISSN 2594-2921

# Científica

**Científica:** Journal of Electromechanical Engineering | vol. 28, no. 2 | July-December 2024 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



## Volumen 28 Issue 2, July-December 2024

### **Sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos**

Biomechanical System for Sports Reflex Training

Tania Fernanda **Mata Bernal**, Jareth Israel **Rivera Pineda**, Miguel **Vázquez González**,  
César **Ponce de la Fuente**, Sergio Alberto **Navarro Tuch**, Luis Antonio **Aguilar Pérez**.

---

### **Diseño y simulación del cardán para el sistema de potencia del vehículo BAJA SAE UAM 2023**

Design and simulation of the gimbal for the vehicle power system BAJA SAE UAM 2023

Iván **González Uribe**, Romy **Pérez Moreno**, Diego Antonio **Juárez-Guerra**,  
Erick Uriel **Calette Lemus**, Hazel Daniel **Pablo López**, Luis Fernando **Domínguez Correa**.

---

### **Diseño y simulaciones MEF & CFD de un cortador de cable de registro para la industria petrolera**

Design and FEM & CFD simulations of a Cable Cutter for the Oil Industry

Jesús **Bermúdez Vilchiz**, Luis Alberto **Ramírez López**, Apolinar **Albiter Hernández**,  
Víctor Augusto **Castellanos Escamilla**, Iván Enrique **Martínez Merlín**.

---

### **Aprendizaje de conceptos básicos de electrónica: estrategia tecnopedagógica y aplicación de una prueba objetiva**

Learning basic concepts of electronics: techno-pedagogical strategy and application of an objective test

Caroleny Eloiza **Villalba Hernández**, Daniel **Mocencagua Mora**,  
Luis Abraham **Sánchez Gaspariano**.

---

### **Aplicación del modelo de sistemas viables para el crecimiento y desarrollo sustentable en las organizaciones: una revisión de literatura**

Application of viable systems model for growth and development sustainable in organizations: a literature review

Eric Daniel **Gonzalez Herrera**, Mario **Aguilar Fernández**.

---

## **Sistema de detección de insuficiencia cardíaca congestiva en señales de ECG a través de aprendizaje máquina**

Detection system of congestive heart failure in ECG signals through machine learning

Aldair **Ascencio Salazar**, Ángel Humberto **Corral Domínguez**,  
Fortunato **Ramírez Arzate**, José Ricardo **Cárdenas Valdez**.

---

## **Estudio del desarrollo de las aeronaves tilt-rotor**

Study of the development of Tilt-rotor aircraft

Víctor Gabriel **Sánchez Meza**, Alberto **Luviano Juárez**,  
Yair **Lozano Hernández**, Jaime **González Sierra**.

---

## **Simulación numérica de casco mediante interacción de elementos 2D y 3D**

Numerical simulation of helmet through interaction of 2D and 3D elements

Iván Lenín **Cruz Jaramillo**, Martín **Domínguez Sánchez**,  
María del Carmen **López Hernández**, Víctor Manuel **Ferreira Coroy**.

---

## **Caracterización mecánica de defectos en las Unidades de Líneas de Acero (ULA) operativas en pozos petroleros**

Mechanical characterization of defects in slickline units (LSUs) operating in oil wells

Mauricio **Arellano Pastrana**, Jesús **Bermúdez Vilchiz**, Apolinar **Albiter Hernández**,  
Víctor Augusto **Castellanos Escamilla**, Iván Enrique **Martínez Merlin**.

---

## **Low-cost device for continuous monitoring of human organs during transportation**

Dispositivo de bajo costo para el monitoreo continuo de órganos humanos durante el transporte

Daniel Armando **Aguirre Ibarra**, Edgar Roberto **Pérez Serrano**,  
Leonardo **Alfaro Díaz**, Isaac Valentín **Aguirre Manríquez**.

---

**CIENTIFICA**, year 28, issue 2 July-December 2024. Biannual Journal online published by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: [cientifica@ipn.mx](mailto:cientifica@ipn.mx), Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

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

# Sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos

Biomechanical System for Sports Reflex Training

Tania Fernanda **Mata Bernal**<sup>1</sup>, Jareth Israel **Rivera Pineda**<sup>2</sup>, Miguel **Vázquez González**<sup>3</sup>,  
César **Ponce de la Fuente**<sup>4</sup>, Sergio Alberto **Navarro Tuch**<sup>5</sup>, Luis Antonio **Aguilar Pérez**<sup>6</sup>

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Santa Fe, Ciudad de México, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0006-1416-1376

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0007-7615-0629

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-8341-7498

<sup>4</sup> ORCID: 0009-0003-1419-3683

<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-3551-7689

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, MÉXICO

<sup>6</sup> ORCID: 0000-0002-7051-0001 | laguilarpe@comunidad.unam.mx

Recibido 05-06-2024, aceptado 25-07-2024.

## Resumen

En el ámbito deportivo, la mejora de los reflejos se considera un componente crucial durante el entrenamiento. Para ello, se utilizan diversas herramientas tecnológicas para entrenar la capacidad de reacción ojo-mano, una capacidad comúnmente asociada a los reflejos de un atleta. Los dispositivos utilizados para estas tareas se basan principalmente en sistemas de iluminación controlados de manera remota, combinados con sensores táctiles electrónicos. Sin embargo, algunos de estos sistemas presentan limitaciones físicas en términos de la estimación del tiempo de reacción del atleta. Por lo tanto, se desarrolló un sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos mediante el diseño de un robot Core XY que implementa un sistema electromecánico y de visión para controlar sus movimientos. Este dispositivo utiliza el análisis de video digital en tiempo real del área de juego, lo que permite el análisis biomecánico de las características asociadas al movimiento del atleta. El control de este manipulador robótico mueve un señuelo que el atleta debe seguir para entrenar progresivamente la precisión, velocidad y exactitud de sus movimientos. El efector final es identificado utilizando una cámara que observa constantemente los movimientos realizados, registrando los movimientos localmente en una tarjeta de desarrollo Raspberry PI para su posterior análisis. El diseño de este sistema permite un espacio de trabajo escalable y adaptable a diversas disciplinas. Todo el sistema fue simulado dentro del entorno de programación MATLAB-SIMULINK utilizando el módulo SIMSCAPE MULTIBODY para estimar los parámetros discretos de la función de transferencia de la cinemática de movimiento del manipulador robótico Core XY. En pruebas controladas, se encontró que la detección de movimiento del carrito aún se encuentra altamente influenciada por la luz ambiental. Por lo tanto, las futuras modificaciones del sistema pretenden abordar este problema. Este sistema ofrece una solución precisa para el entrenamiento de los reflejos en atletas, proporcionando un enfoque más exacto y potencialmente transformando la manera en que los entrenadores y atletas desarrollan habilidades de reacción en sus alumnos.

**Palabras clave:** biomecánica deportiva, mecatrónica, visión por computadora

## Abstract

In the sports field, the improvement of reflexes is considered a crucial component during training. Various technological tools are used to train the eye-hand reaction ability, a capacity commonly associated with an athlete's reflexes. The devices used for those tasks are primarily based on remotely controlled lighting systems, combined with electronic touch sensors. However, some of these systems present physical limitations in terms of the time reaction estimation. Therefore, a biomechanical system for sports reflex training was developed through the design of a core XY Robot that implements the electromechanical and vision system to control their movements. This device uses a real-time digital video analysis, which allows the analysis of characteristics associated to the athlete's movement. The control of this robotic manipulator moves a lure that the athlete must follow to progressively train precision, speed, and accuracy of movement. The end effector is identified using a camera that constantly observes the movements made, recording the movements locally on a Raspberry PI development board for subsequent analysis. The design of this system allows for a scalable workspace adaptable to various disciplines. The entire system is simulated within the MATLAB-SIMULINK programming environment using the SIMSCAPE MULTIBODY module to estimate the discrete parameters of the transfer function of the Core XY robotic manipulator's motion kinematics. In controlled tests, it was found that the movement detection of the cart is highly influenced by ambient light. Therefore, future modifications of the system aim to address this issue. This system offers a precise solution for training reflexes in athletes, providing a more accurate approach and potentially transforming the way coaches and athletes develop reaction skills in trainees.

**Index terms:** sport biomechanics, mechatronics, computer vision..



## I. INTRODUCCIÓN

La coordinación ojo-mano es un proceso complejo que requiere la activación precisa de los sistemas neuromotores en el cerebro del atleta. En particular, esta coordinación depende mayormente de la cooperación entre el córtex y el cerebelo. Para lograr esta coordinación, asociada a movimientos precisos, como alcanzar y agarrar objetos pequeños, es de suma importancia la adquisición de información visual de alta calidad y del control neuromotor simultáneo de los ojos y las manos [1]. Por ejemplo, en el estudio presentado por [2] se utilizó el sistema de salud interactivo Hot Plus, el cual es un sistema diseñado para simular un entorno del mundo real, proporcionando retroalimentación visual inmediata a los usuarios mediante la proyección de imágenes mediante un proyector sobre una superficie. En particular, este sistema ofrece desafíos a sus usuarios que indirectamente prueban las habilidades cognitivas y motoras de la persona, estimulando la coordinación neuromotora, la capacidad de respuesta y el control de movimientos promoviendo la coordinación entre el cerebro y el cuerpo. La coordinación neuromotora de los miembros superiores es crucial para la ejecución de movimientos en deportes que requieren respuestas rápidas y precisas, tales como el tenis, el béisbol y las artes marciales. Esta habilidad permite a los atletas procesar rápidamente la información visual y coordinar sus movimientos en consecuencia, mejorando así su rendimiento general. El trabajo presentado por [3] analiza de manera sistemática algunos de los principales esfuerzos realizados para poder entrenar la coordinación mano ojo en entornos deportivos desde 1950 a 2023. Entre los principales señalamientos que realiza este trabajo señala que mayormente se busca mejorar el rendimiento del sistema visual, por lo que el uso de dispositivos tecnológicos puede ayudar a la recuperación y en su caso el mejoramiento de la capacidad neuromotora del atleta. También destaca que muchos de los trabajos analizados carecen de grupos de control replicables en otros entornos por lo que es necesario establecer una prueba estandarizada que mida el rendimiento del atleta de manera replicable. Esto lo atribuyen por ejemplo a que los estudios analizados tenían un tamaño de muestra que no es estadísticamente significativo, o que no era correctamente definido el grupo de control durante las pruebas. Así mismo, los autores señalan durante los reportes estudiados existía una considerable variabilidad entre las técnicas y tratamientos utilizados entre los participantes de los estudios por lo que no se podía replicar una prueba estandarizada que permita medir correctamente el rendimiento de esta característica, concluyendo que la evaluación de los reflejos ha sido complicada de estudiar por distintas disciplinas deportivas, aunque no omiten señalar que independientemente del estudio, la gran mayoría de los atletas ha reportado que sí notan una mejoría entre realizar el entrenamiento personalizado de los reflejos.

Por ejemplo, el estudio titulado “Visual-Motor Response Times in Athletes and Non Athletes” sugiere que los tiempos de respuesta visual-motora no presentan diferencias significativas entre deportistas de alto rendimiento y aquellos que practican por diversión, señalando la influencia de otras variables como la anticipación y la búsqueda visual del objetivo [4]. Otros estudios en el campo destacan igualmente la importancia de las habilidades visuales y el rendimiento neuromotor, sugiriendo que estas pueden transferirse desde otras actividades a rendimientos deportivos específicos [5]. La coordinación mano-ojo, los tiempos de reacción y la visión periférica espacial son fundamentales y permiten fortalecer las capacidades del atleta durante la práctica deportiva [6]. Además, programas de entrenamiento neurocognitivo han demostrado que se puede optimizar la percepción visual, el procesamiento de la información y la toma de decisiones por el deportista, mejorando variables personalizadas asociadas al tiempo de reacción y la efectividad de respuesta durante la práctica de la disciplina [7].

El uso de tecnologías aplicadas a la biomecánica deportiva, como el uso de sensores portátiles y sistemas de captura de movimiento entonces resulta esencial para la mejora del rendimiento del atleta. Estos dispositivos permiten medir variables en tiempo real y corregir técnicas de movimiento ineficientes o riesgosas [8]. Sin embargo, aún persiste la necesidad de un modelo integrador que analice las métricas relacionadas con la influencia de las cargas externas al atleta, así como también algún estándar que permita evaluar el rendimiento biomecánico del atleta junto a sus tiempos de reacción [9]. El rendimiento visual y sensorial también puede afectar significativamente la capacidad de reacción ante impactos en la cabeza sufridos debido a la práctica

deportiva. Estudios indican que una mejor anticipación a este tipo de eventos podría reducir la severidad causada por estos, sugiriendo que la integración de tecnologías para la evaluación y entrenamiento visual podría ser clave en la mejora del rendimiento del atleta y la reducción del riesgo de lesiones debido a la práctica del deporte [10]. Aunque algunos estudios no señalan directamente las diferencias significativas entre grupos de estudios entrenados con estímulos visuales controlados, la evidencia práctica sugiere que este tipo de entrenamiento sí puede mejorar el tiempo de reacción y la función cognitiva [11].

8

La anticipación, así como el rendimiento visual y sensorial juegan un papel crucial en la reducción del riesgo de conmociones cerebrales debido a un pobre desempeño en la práctica deportiva del atleta. En la actualidad existen programas de entrenamiento visual como el Nike Sparq Sensory Station [12] que podrían ser efectivos para mejorar estas habilidades sobre todo al disminuir la tasa de conmociones en jugadores de fútbol americano [13]. El sistema FITLIGHT® es otro sistema similar a nivel comercial por ejemplo utiliza luces inalámbricas y programas de entrenamiento patentados para desafiar a los usuarios con tareas que permiten mejorar el tiempo de reacción, la precisión mental, el procesamiento sensorial y otros atributos neurocognitivos, siendo utilizado para mejorar estas habilidades en jugadores de baloncesto [14]. Pérez-Castilla en [15] examina distintos avances tecnológicos que han impulsado la biomecánica deportiva mediante métodos y técnicas de análisis y procesamiento de datos. Como se observa en estos trabajos, el uso de tecnologías portátiles con sensores fisiológicos permite una adquisición precisa y no invasiva de signos vitales, proporcionando retroalimentación objetiva sobre el rendimiento y estado de salud del atleta [16]. El entrenamiento de la visión deportiva también ha demostrado mejoras significativas en habilidades visuales y rendimiento deportivo, sugiriendo que la repetición y la práctica pueden llevar a adaptaciones a largo plazo en el sistema visual [17]. Finalmente, técnicas avanzadas de entrenamiento visual utilizando tecnología digital, como la realidad virtual y programas de aprendizaje perceptual, se integran en actividades de entrenamiento para mejorar la capacidad de procesar y responder a estímulos visuales en contextos deportivo [18].

En conjunto, los sistemas comerciales de entrenamiento de reflejos deportivos han demostrado que poseen limitaciones físicas principalmente en cuanto a la construcción y dependencia de la transmisión de datos, por lo que la precisión y eficacia presentada en las rutinas de entrenamiento mayormente dependerá de la capacidad del envío de la información desde el dispositivo al centro de mando, así como de la posición estática en la que estos sean colocados. Frente a esta carencia en la capacidad de los sistemas de estandarizar el movimiento para estimar el impacto que el entrenamiento de los tiempos de reacción de los atletas pueda generar en posiciones aleatorias dentro del espacio de trabajo real de la persona, se propone la implementación de la metodología QFD enfocada al diseño de productos para el diseño de un sistema mecatrónico mediante el cual se puedan estudiar los parámetros biomecánicos de un atleta, y con esto proponer en trabajos futuros un conjunto de variables que permitan estandarizar las pruebas biomecánicas para sistemas de entrenamiento de reflejos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del proyecto propuesto, el sistema tiene como población objetivo el ser usado por personas deportistas de tenis de mesa, por lo que podría ser utilizado por personas de cualquier rango de edad o género. En la Fig. 1 se presenta el diagrama de necesidades propuesto. Para definir las especificaciones técnicas y funcionales del sistema a desarrollar, se utilizó un diagrama QFD (Quality Function Development). En él, se definieron los requerimientos funcionales del sistema (horizontal) y los requerimientos del cliente (vertical). En el espacio central se definieron las relaciones de los requerimientos unos con otros, siendo 9 el más alto y 1 el más bajo. A partir de su definición, en la parte inferior, se calculó la importancia que tiene cada requerimiento funcional y en base a su importancia, se tomara como prioridad su desarrollo.

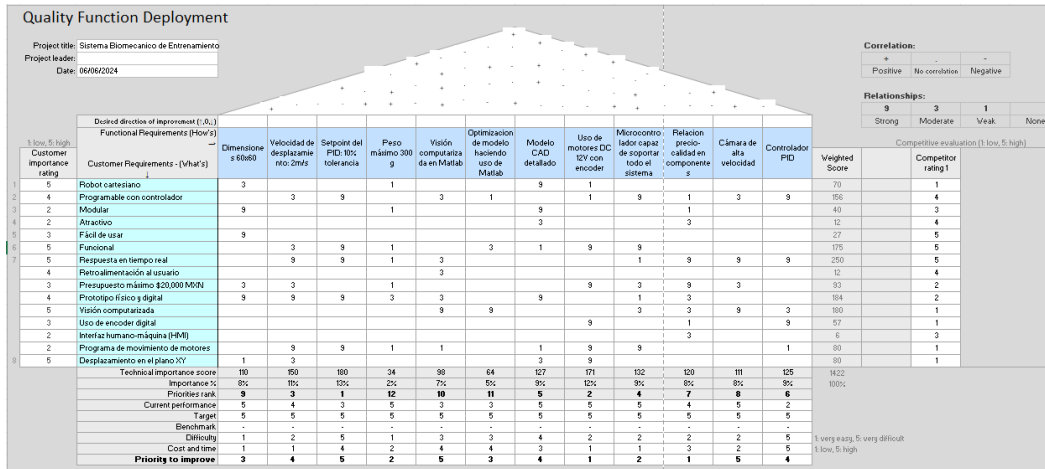


Fig. 1. Diagrama QFD para la evaluación del proyecto en términos de las necesidades del sistema de entrenamiento de reflejos propuesto.

Una vez terminado el análisis, se llegó a la conclusión de que los motores tengan una tolerancia del Set-Point de 10%, es decir que lo más importante es enfocar la atención al desarrollo de esta parte durante la construcción del proyecto. Por su parte, el aspecto que menos importancia tiene en el proyecto es el peso del sistema, esto implica que no se tenga que cuidar este aspecto, sin embargo, el proyecto no se tiene que basar principalmente en este requerimiento para su desarrollo. Una vez definida esta parte, el árbol de funciones es una herramienta crucial en la etapa inicial de planificación y diseño. Las razones clave por las cuales es de suma importancia son que genera claridad y comprensión, ayuda a identificar requisitos y objetivos, facilita la asignación de responsabilidades, eficientiza la estimación de recursos y simplifica la gestión del proyecto. En la Fig. 2, se muestra el árbol de funciones utilizado en este proyecto.

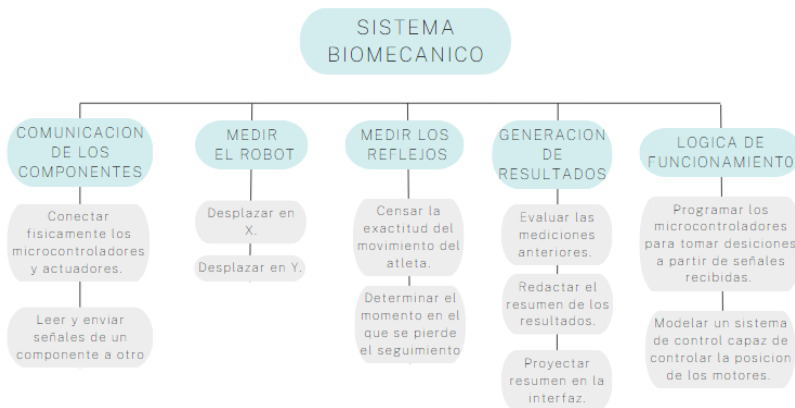


Fig. 2. Árbol de funciones.

Por su parte, en la Fig. 3 se muestra el diagrama de conexiones de los componentes electrónicos del sistema, estos son: un Raspberry Pi 3B+ y un Arduino UNO como los principales microcontroladores, dos motores DC 12V 1000 rpm con encoder, un puente H L298N, un módulo de cámara V2 de Raspberry, una LCD 4x20, un voltaje reductor 12V a 5V, y una fuente de poder de 12V/5A. El Raspberry y el Arduino están conectados mediante un cable serial, el cable va desde la entrada de voltaje del Arduino hasta un puerto USB del Raspberry. Las salidas de los motores DC están conectadas directamente a los puertos de entrada del Arduino, mientras que el suministro de 12V proviene del puente H y las señales tanto PWM como de dirección provienen de los

5

puertos de salida del mismo puente H. El puente H a su vez, obtiene voltaje directo de la fuente de poder. El Raspberry obtiene su fuente de poder a través del voltaje reductor y este a su vez está conectado a la fuente de poder de 12V. La cámara está conectada a la tarjeta madre del Raspberry en el puerto CSI de cámara. Por último, la LCD funciona con 8 bits, los cuales provienen de 8 GPIO pins del Raspberry, además se regula el contraste e iluminación por medio de los puertos de salida del Raspberry, también tiene entradas de 5V y tierra, las cuales provienen directamente del Raspberry.

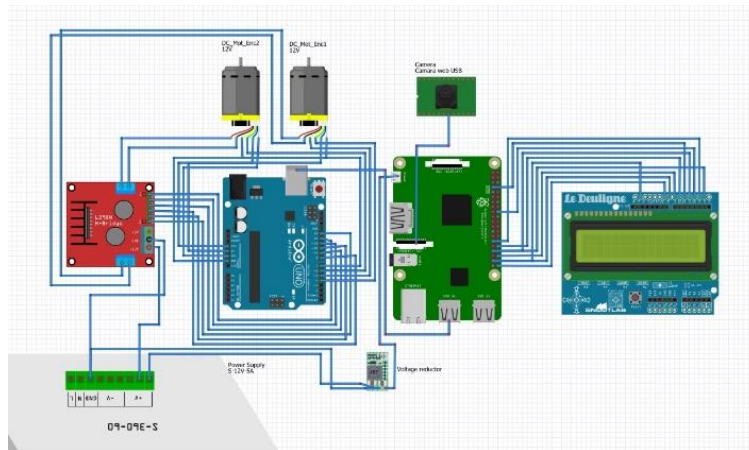


Fig. 3. Diagrama de conexión de componentes electrónicos.

Para el diseño mecánico, se realizó un modelo CAD del sistema, con todos los elementos mecánicos que cuentan con algún grado de libertad y la base superior en la que estarán fijados los elementos mecánicos y la cámara. En la Fig. 4 se muestra el robot cartesiano tipo Core XY armado.



Fig. 4. Prototipo de entrenador biomecánico para reflejos deportivos.

Se caracterizaron los motores del sistema y se definió una ecuación general para conocer cómo funciona el sistema de control de cada motor y así conocer cuál es su salida en función a la entrada de voltaje aplicada. En la Fig. 5a se muestra el sistema de control propuesto. En la Fig. 5b se muestra el esquema de modelo del sistema. En este modelo del sistema, la variable  $L$  corresponde a la inductancia de la armadura del motor,  $R$  a la resistencia de la armadura,  $v(t)$  corresponde al voltaje aplicado, mientras que  $i(t)$  corresponde a la corriente del motor. Por su parte en el sistema mecánico,  $J$  corresponde a la inercia que debe mover el motor, que en este caso está representada por la cuerda y la masa que debe mover del señuelo.  $B$  por su parte corresponde con el

coeficiente de amortiguamiento, es decir la fricción dinámica entre la cuerda y el sistema de giro. Finalmente, las variables  $K_m$  y  $K_a$  representan los coeficientes de conversión mecánico eléctrico y eléctrico mecánico.

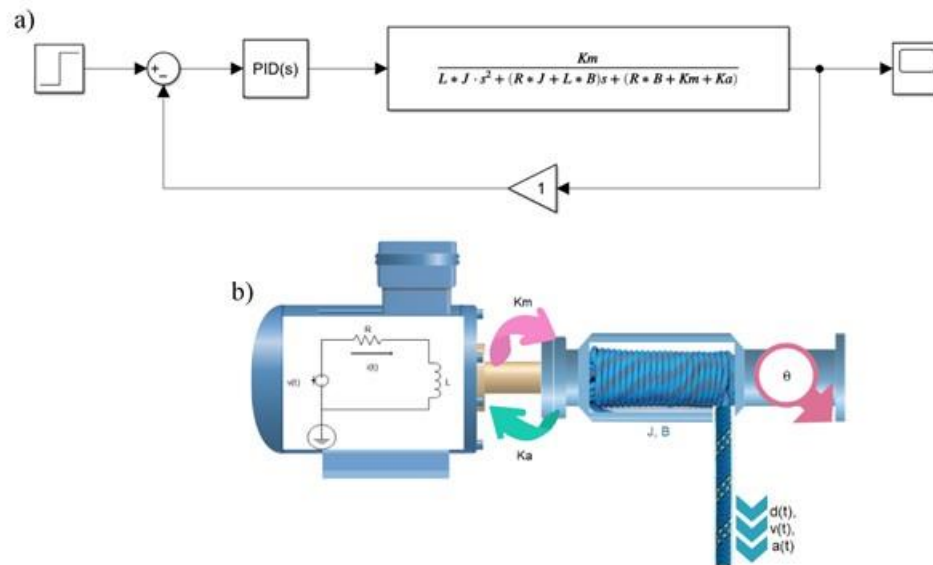


Fig. 5. Esquema de control de la función de transferencia de la planta a) Función de transferencia en lazo cerrado, b) Parámetros del modelo del sistema electromecánico.

Una vez obtenido el esquema de control, se hizo un modelo de SimScape, el cual replica el CAD realizado y le permite simular movimientos controlados a partir de los grados de libertad definidos en este mismo. Para el movimiento de los motores, se incluyó el esquema de control de la Fig. 6. Con esto, es posible simular el movimiento del efector final. A continuación, se muestra el código en MatLab para realizar la simulación y también una imagen de la simulación de salida, teniendo como entrada un set de coordenadas  $(X, Y)$  y obteniendo como salida el movimiento del efector final en las coordenadas indicadas.

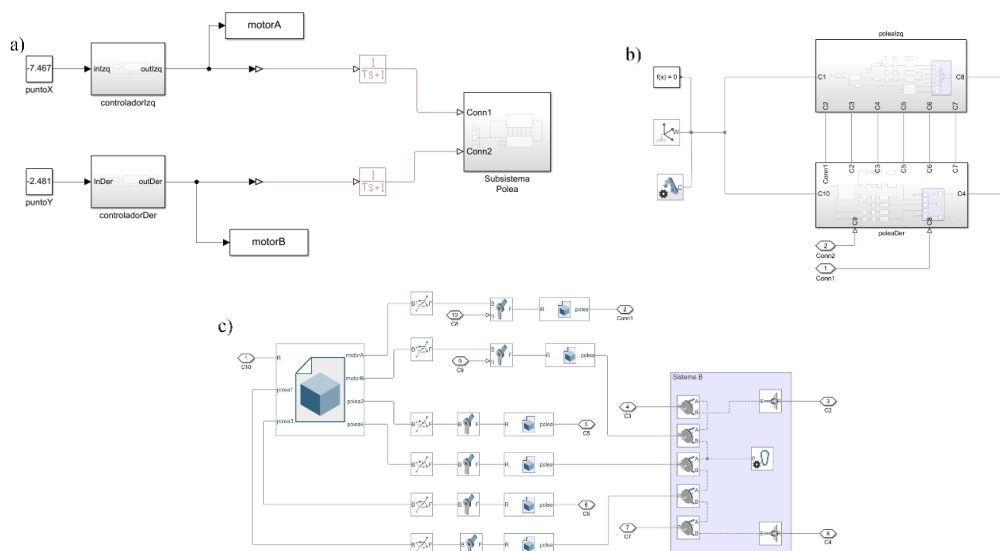


Fig. 6. Esquema de control en la simulación completa: a) Sistema general de controlador y planta, b) Esquema de interconexión de dos poleas, c) Sistema multicuerpo de una polea.



7

El funcionamiento del sistema es el siguiente. Se enciende el programa, inicia y se procede a calibrar, esto quiere decir que, por medio del sistema de visión, el efector final recibe una señal de moverse a cierta coordenada para así colocarse en el centro del espacio de trabajo. Una vez concluido este proceso, el usuario deberá colocar su mano sobre el efector final y el sistema de visión envía una señal. Cuando esto pase, los motores reciben una bandera indicando que el usuario está listo y comenzarán a moverse en diferentes direcciones para así mover el efector final. El usuario deberá seguir el efector con su mano durante un tiempo determinado (30 segundos), si el sistema de visión detecta que el usuario tiene un buen nivel de reacción (mayor a 85% de efectividad), los motores aumentarán su velocidad para así aumentar la dificultad del entrenamiento, en caso contrario, no se aumenta la velocidad. Tras 30 segundos, el movimiento de los motores se detiene y el puntaje del usuario se muestra en la LCD (véase Fig. 7).

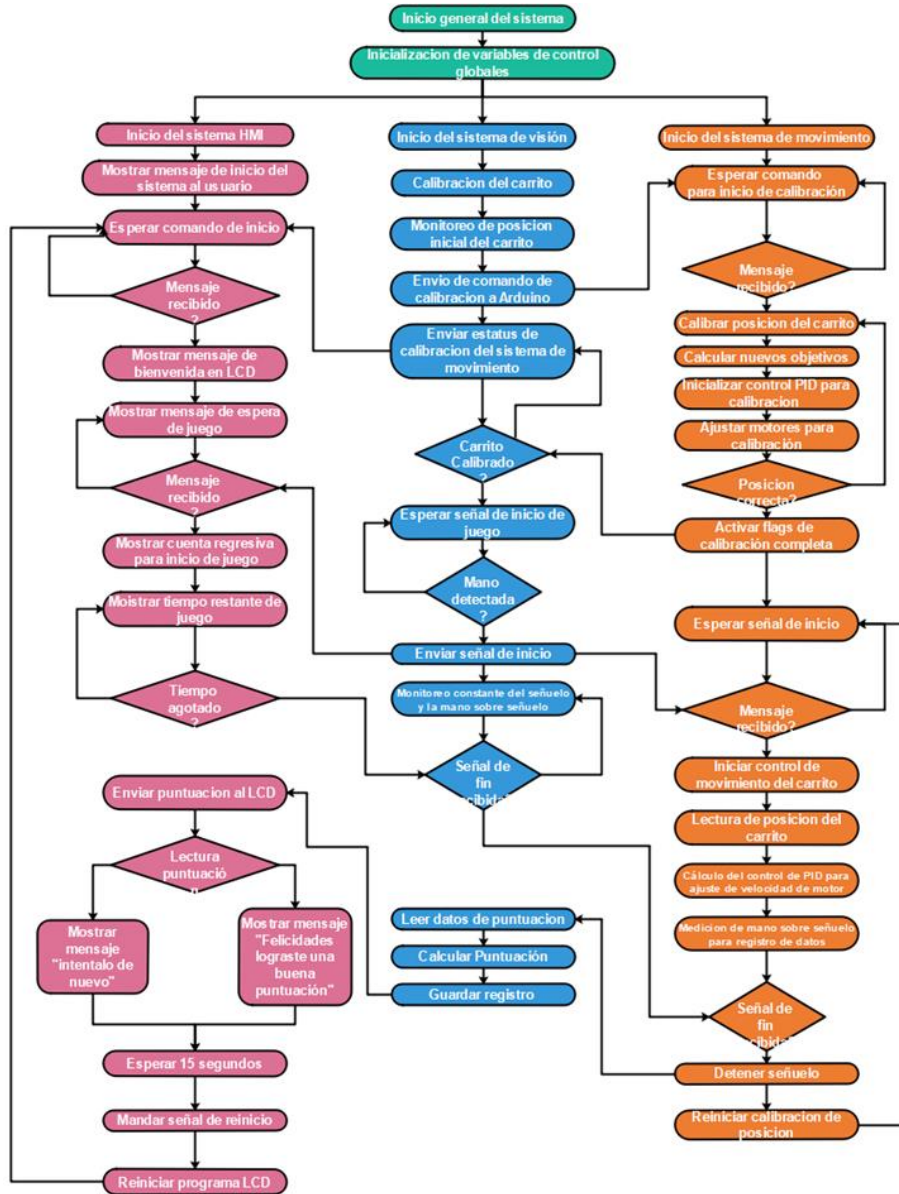


Fig. 7. Diagrama del software.

### III. RESULTADOS

Una vez el robot se ensambló, se hicieron pruebas para obtener las constantes del sistema de control PID. Se utilizó el segundo método de Ziegler Nichols para obtener estos valores como lo describe V. Alfaro [19]. El segundo método de Ziegler Nichols, también llamado como método de oscilación, propone iniciar con las constantes  $K_i$  y  $K_d$  en 0, haciendo el sistema uno únicamente proporcional, a continuación, se eleva la constante  $K_p$  paulatinamente hasta obtener un valor ( $K_p$  crítico) que ponga el sistema en una oscilación con amplitud constante. Esto se logró con una  $K_p = 50$ .

∞

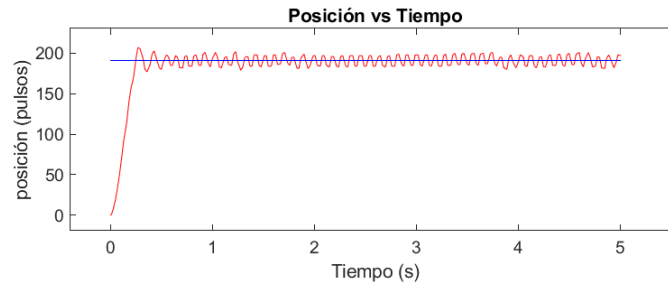


Fig. 8. Sistema con  $K_p$  crítico en motor A.

El método requiere que se mida el periodo de las oscilaciones y con esto se obtenga el periodo crítico, de modo que los coeficientes finales para el sistema se obtienen como:

- $K_p = 0.6 * K_{p\_crítico}$
- $K_i = 0.5 * \text{Periodo crítico}$
- $K_d = 0.125 * \text{Periodo crítico}$

Para este sistema el *Periodo crítico* = 0.11s, por lo que las constantes para el sistema de control PID resultan en los siguientes valores:

- $K_p = 30$
- $K_i = 0.055$
- $K_d = 0.01375$

En cuanto a la detección del carrito a través de la cámara, se realizaron pruebas en un salón en condiciones ideales, asegurando la ausencia de sombras y cambios en la luz solar que pudieran alterar los resultados. En la gráfica se presenta el porcentaje del color del robot que detectaba la cámara. Lo ideal sería que siempre se detectara el 75%, 50% o 25% del robot. Esto no fue cierto, pues observamos variaciones de 1% o 2%. Estas variaciones son evidentes en la gráfica, demostrando que, a pesar de las condiciones controladas, hubo pequeñas fluctuaciones en la detección del color del robot por parte de la cámara. Estas variaciones se deben al diseño del carrito, ya que, al contar sólo con un riel, es un poco inestable. No siempre se encuentra en una posición plana, si no que a veces tiende inclinarse, lo cual genera que la cámara no detecte el 100% del mismo. En la Fig. 9 se muestran los resultados obtenidos de la comparativa de mediciones reales y esperadas.

9

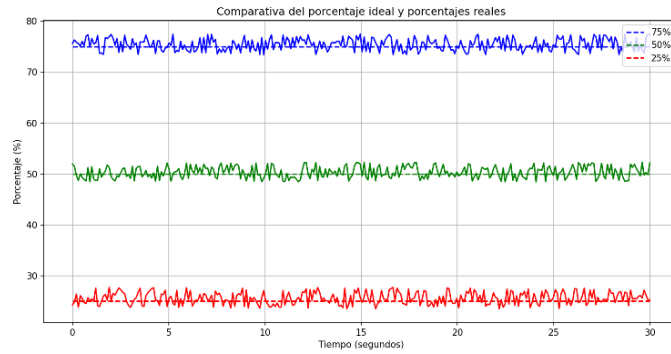


Fig. 9. Detección del carrito con base en pruebas realizadas.

En cuanto a los resultados de la calibración de los motores resultó que esta fue tan precisa durante la calibración de la cámara con respecto al centro del área del prototipo que la esperada dentro de las condiciones establecidas en un principio como claves de movimiento. En la siguiente gráfica, se presenta de color rojo el centro real y de color azul, lo que la cámara detectaba como “centro” en un lapso de 10 segundos. En verde, se observa nuestro límite de error establecido, el cuál servía para corroborar si es que la cámara se descalibraba en algún momento. En la gráfica, se observa cómo la cámara detectó el centro real correctamente. Sin embargo, también se puede notar cómo existieron algunas variaciones. Es importante recordar que con base en los cuadrillos verdes que se encontraban en las esquinas del prototipo, la cámara definía el centro del área, por lo que, si la cámara no detectaba el 100% del cuadrillo, la búsqueda del centro no era la adecuada. Adicional, la cercanía del usuario con respecto a la cámara generaba un poco de inestabilidad, lo que también influía en estas variaciones.

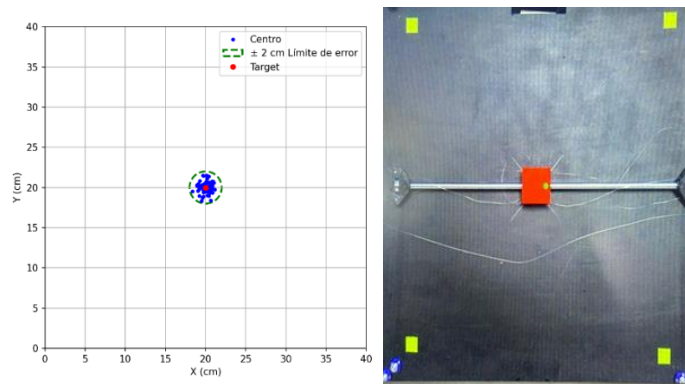


Fig. 10. Detección del centro con base en pruebas realizadas a) Mediciones realizadas del sistema, b) mediciones realizadas a partir de la cámara del sistema.

A continuación, siguieron las pruebas para el sistema del robot cartesiano. Se realizaron medidas físicas con base en la señal de los encoders. Para ello se seleccionó una posición de (-50, -20) para que ambos motores giraran con puntos de establecimiento distintos y así poder observar la respuesta de ambos. Para probar la exactitud de las simulaciones se llevaron a cabo pruebas comparativas con el sistema completo, se debe tomar en cuenta que el modelo realizado en Simscape es un modelo cinemático, que toma en cuenta los grados de libertad de todas las poleas, pero no toma en cuenta las fuerzas aplicadas al sistema, por lo que no es un sistema dinámico. Al observar los resultados en la Fig.11, la simulación no presenta oscilaciones y llega al punto de manera críticamente amortiguada. Sin embargo, el motor A físico sí presenta oscilaciones en la respuesta, aun así, ambos convergen en el setpoint con un tiempo de establecimiento de casi medio segundo. El caso del motor

B es similar, contando con el mismo sobre impulso que el motor A, pero podemos ver un defecto intrínseco de los motores con control por PWM, la señal de error que el controlador otorga para el motor B no es capaz de accionar el motor y por ello no llega al objetivo establecido (véase Fig. 11).

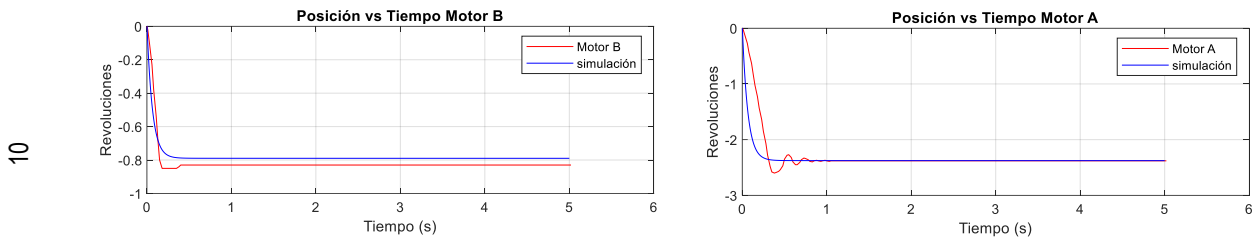


Fig. 11. Comparación de comportamiento del motor real y en simulación.

#### IV. CONCLUSIONES

La implementación de robots cartesianos en el ámbito deportivo tiene el potencial de revolucionar la mejora de reflejos en deportistas de alto rendimiento, ofreciendo precisión y consistencia en la medición de los resultados obtenidos. Aunque en estos momentos, el desarrollo de este tipo de dispositivos de entrenamiento se ha visto limitado por el tipo de tecnología que estas utilizan, estas pueden ser mejoradas mediante la integración de sistemas biomecánicos que permitan medir variables biomecánicas estandarizadas. Es por ello que resulta de suma importancia desarrollar nuevos sistemas de entrenamiento para los deportistas, mediante los cuales se pueda evaluar la biomecánica de movimiento a partir condiciones bien definidas del funcionamiento del dispositivo. Para demostrar esta situación, se desarrolló el sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos utilizando los principios de modelado de robots cartesianos tipo Core XY Por ello en el presente trabajo se desarrolló la función de transferencia que rige el comportamiento del modelo a partir de la cual se pueden controlar de manera precisa los motores del sistema. Esto permite obtener un sistema que, derivado de las pruebas preliminares realizadas, permite ser efectivo en la detección del objetivo de entrenamiento. El trabajo en este momento cumple con las expectativas de diseño planteadas en los requerimientos expuestos del diagrama QFD, restando que en trabajos futuros se desarrollen pruebas de campo donde se puedan evaluar las capacidades de atletas reales utilizando el sistema. Además, se recomienda que para mejorar el rendimiento del sistema, así como de la seguridad de uso del sistema, se incluya un sistema de iluminación así como el diseño de un controlador específico que sirva de base para la sustitución del Arduino de bajo poder de procesamiento de datos, proponiéndose tal vez el uso de un sistema basado en la placa ESP32. También se recomienda que el uso de materiales sea más rígido y la adecuada instalación de una cubierta de acrílico e implementación de un sistema de doble riel para el efector final, con lo cual se puedan realizar pruebas extendidas de funcionamiento.

#### REFERENCIAS

- [1] J. R. Rizzo, M. Beheshti, T. Naeimi, F. Feiz, G. Fatterpekar, L. J. Balcer, S. L. Galetta, A. G. Shaikh, J. C. Rucker, T. E. Hudson, "The complexity of eye-hand coordination: a perspective on cortico-cerebellar cooperation," *Cerebellum & Ataxias*, pp. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40673-020-00123-z>
- [2] P. T. Chan, W. C. Chang, H. L. Chiu, C. C. Kao, D. Liu, H. Chu, K. R. Chou, "Effect of interactive cognitive-motor training on eye-hand coordination and cognitive function in older adults," *BMC Geriatrics*, vol. 19, nº 27, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12877-019-1029-y>
- [3] A. Buscemi, et al., "Role of Sport Vision in Performance: Systematic Review," *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, vol. 9, nº 2, pp. 1-18, 2024. <https://doi.org/10.3390/jfmk9020092>

- [4] G. Paterson, *Visual-Motor Response Times in Athletes and Non-Athletes*, Stellenbosch, Sudáfrica: Departamento de Ciencias del Deporte, Universidad de Stellenbosch, 2010.
- [5] P. Maman Biswas, S. Kumar, S. Jaspal Singh, "Role of sports vision and eye hand coordination training in performance of table tennis players," *Brazilian Journal of Biomechanics*, vol. 5, n° 2, pp. 106-116, 2011. <https://www.redalyc.org/pdf/930/93018957006.pdf>
- [6] J. F. Clark, B. E. Betz, L. T.G. Borders, A. Kuehn-Himmler, K. A. Hasselfeld, J. G. Divine, "Vision Training and Reaction Training for Improving Performance and Reducing Injury Risk in Athletes," *Journal of Sports Performance Vision*, vol. 1, n° 1, pp. 8-16, 2020. <https://doi.org/10.22374/jspv.v2i1.4>
- [7] F. Moya-vergara, D. Curotto-Berruezo, P. Valladares-Arellano, E. Arriaza-Ardiles, T. Valverde-Esteve, J. García-Manso, "Evaluation of visual-motor reaction time and quality of response in rugby sevens players after the application of a neurocognitive training programme," *International Journal of Performance Analysis in Sport*, vol. 19, no. 6, 2019, <https://doi.org/10.1080/24748668.2019.1691814>
- [8] W. Tai, R. Zhang, L. Zhao, "Cutting-Edge Research in Sports Biomechanics: From Basic Science to Applied Technology," *Bioengineering*, vol. 10, n° 668, 2023. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060668>
- [9] Ferraz, P. Duarte-Mendes, H. Sarmento, J. Valente-Dos-Santos, B. Travassos, "Tracking devices and physical performance analysis in team sports: a comprehensive framework for research-trends and future directions," *Frontiers in Sports and Active Living*, pp. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1284086>
- [10] J. Harpham, J. Mihalik, A. Littleton, B. Frank, K. Guskiewicz, "The Effect of Visual and Sensory Performance on Head Impact Biomechanics in College Football Players," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 42, n° 1, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0881-8>
- [11] G. Theofilou, I. Ladakis, C. Mavroidi, V. Kilintzis, T. Mirachtsis, I. Chouvarda, E. Kouidi, "The Effects of a Visual Stimuli Training Program on Reaction Time, Cognitive Function, and Fitness in Young Soccer Players," *Sensors*, vol. 22, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176680>
- [12] K. Burris, S. Liu, L. Appelbaum, "Visual-motor expertise in athletes: Insights from semiparametric modelling of 2317 athletes tested on the Nike SPARQ Sensory Station," *Journal of Sports Sciences*, vol. 37, n° 1, pp. 15-27, 2019. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1698090>
- [13] S. M. Kung, T. K. Suksreephaisan, B. G. Perry, B. R. Palmer, R. A. Page, "The Effects of Anticipation and Visual and Sensory Performance on Concussion Risk in Sport: A Review," *Sports Medicine*, vol. 6, n° 54, pp. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00283-6>
- [14] K. Hassan, M. M. Alhumaid, B. E.Hamad, "The Effect of Using Reactive Agility Exercises with the FITLIGHT Training System on the Speed of Visual Reaction Time and Dribbling Skill of Basketball Players," *Sports*, vol. 10, n° 176, 2022. <https://doi.org/10.3390/sports10110176>
- [15] A. Pérez-Castilla, F. García-Pinillos, "Sports Biomechanics Applied to Performance Optimization," *Applied Sciences*, vol. 14, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14093590>
- [16] R. De Fazio, V. Mastronardi, M. De Vittorio, P. Visconti, "Wearable Sensors and Smart Devices to Monitor Rehabilitation Parameters and Sports Performance: An Overview," *Sensors*, vol. 23, n° 4, pp. 18-, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23041856>
- [17] M. F. Zupan, A. W. Arata, A. Wile, R. Parker, "Visual adaptations to sports vision enhancement training: A study of collegiate athletes at the US Air Force Academy," *Optometry - Journal of the American Optometric Association*, vol. 43, pp. 43-48, 2006. <https://sponet.fi/Record/4039071>
- [18] L. G. Appelbaum, G. Erickson, "Sports vision training: A review of the state-of-the-art in digital training techniques," *International Review of Sport and Exercise Psychology*, vol. 9, n° 1, pp. 160-189, 2016. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2016.1266376>
- [19] M. Alfaro, "Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores," *Ingeniería*, vol. 12, no. 1-2, 2002. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/6430>



## Diseño y simulación del cardán para el sistema de potencia del vehículo BAJA SAE UAM 2023

Design and simulation of the gimbal for the vehicle power system BAJA SAE UAM 2023

Iván **González Uribe**<sup>1</sup>, Romy **Pérez Moreno**<sup>2</sup>, Diego Antonio **Juárez-Guerra**<sup>3</sup>, Erick Uriel **Calette Lemus**<sup>4</sup>,  
Hazel Daniel **Pablo López**<sup>5</sup>, Luis Fernando **Domínguez Correa**<sup>6</sup>

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-8435-1196 | igu@azc-uam.mx

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0009-9079-3799 | romy@azc.uam.mx

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-0208-5111 | al2193041399@azc.uam.mx

<sup>4</sup> ORCID: 0009-0004-0709-7607 | al2192003055@azc.uam.mx

<sup>5</sup> ORCID: 0009-0001-8023-3298 | al2142001145@azc.uam.mx

<sup>6</sup> ORCID: 0009-0004-7585-5908 | al2182002000@azc.uam.mx

Recibido 05-06-2024, aceptado 25-07-2024.

### Resumen

En este artículo se exponen los requerimientos y el diseño de un cardán para la implementación de un sistema de transmisión 4X4, los vehículos con este sistema de transmisión de potencia son de interés para la industria automotriz, debido a que son capaces de transitar en terrenos difíciles. El problema por resolver es la implementación de este tipo de transmisión en el vehículo del ESCUADRÓN UAM 2023, esto debido a que el reglamento para la competencia BAJA SAE 2023 dicta que el tren de transmisión de potencia debe de ser 4X4. Además, en el artículo se ofrece una visión enfocada de los desafíos y consideraciones prácticas que se presentan al momento de construir un vehículo monoplaza para BAJA SAE. Se deben de diseñar todos los nuevos elementos para la transmisión de potencia a los ejes delanteros, entre ellos está el cardán, pieza fundamental pues sirve como eje de transmisión entre los ejes paralelos del vehículo ya sea de manera constante o no. Para el diseño del cardán se calcularon las fuerzas que transmitiría seguido de una selección de material y, posteriormente, realizar la simulación, tomando en cuenta la salida del motor y las reducciones que se encuentran antes del cardán. Con este artículo se espera obtener el diseño final del cardán, para posteriormente implementarlo en el vehículo para la competencia BAJA SAE MÉXICO 2023.

**Palabras clave:** BAJA SAE, cardán, diseño, ESCUADRÓN UAM 2023, simulación.

### Abstract

In this article, the requirements and design of a driveshaft for the implementation of a 4X4 transmission system are presented. Vehicles equipped with this power transmission system are of great interest because they can overcome challenging terrains. The implementation will take place in the ESCUADRÓN UAM 2023 vehicle, as the regulations for the BAJA SAE 2023 competition require a 4X4 powertrain. Furthermore, the article provides a focused view of the challenges and practical considerations that arise when building a single-seater vehicle for BAJA SAE. All new elements for power transmission to the front axles must be designed, including the driveshaft, a crucial component serving as the transmission link between the parallel axles of the vehicle, whether continuously or not. For the design of the driveshaft, forces to be transmitted were calculated, followed by material selection and subsequent simulation, considering the motor output and speed reductions that occur before the driveshaft. This article aims to obtain the final driveshaft design for subsequent implementation in the vehicle for the BAJA SAE MÉXICO 2023 competition.

**Index terms:** design, driveshaft, ESCUADRÓN UAM 2023, BAJA SAE, simulation.

## I. INTRODUCCIÓN

La competencia BAJA SAE es organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices a nivel internacional. Los estudiantes de ingeniería diseñan y construyen un vehículo todoterreno, en el cual ponen en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de su formación académica [1]. Dentro de este vehículo, la transmisión de potencia es uno de los elementos importantes a diseñar y de lo cual se enfoca este trabajo. El sistema de transmisión de potencia para el vehículo BAJA SAE consta de un motor conectado a una caja CVT (transmisión continua variable) [2], el diagrama de una CVT se muestra en la Fig. 1, que transmite la potencia a un diferencial con una salida para los ejes trasero y otro hacia una caja de engranes cónicos, la cual está conectada al cardán para llegar al diferencial delantero y por último a las flechas delanteras.

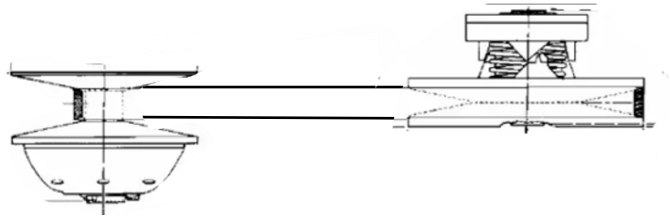


Fig. 1. Diagrama de una transmisión variable continua

El reglamento de la competencia BAJA SAE 2023 considera un cambio importante para la edición 2023, en el cual se estipula que todos los vehículos deben de contar con un sistema de transmisión de potencia 4x4 para poder competir [3]. En años anteriores, el equipo Escuadrón UAM competía con vehículos 4X2 [4, 5]. Por lo que se deberán de diseñar todos los nuevos elementos necesarios para transmitir la potencia a los ejes delanteros.

En los vehículos 4X2 utilizados para competir en ediciones anteriores, el sistema de transmisión de potencia constaba de un motor conectado a la caja CVT de la marca CVTech, que se conectaba al diferencial de la marca DANA, para transferir la potencia a las flechas traseras, lo cual se puede observar en la Fig. 2.



Fig. 2. Sistema de transmisión de potencia 4X2

Para implementar el sistema 4X4 se tomó como referencia el vehículo BAJA SAE del equipo de la Universidad VIT en la India del año 2022 [6]. Este sistema consta de las partes marcadas en la Fig. 3.

3

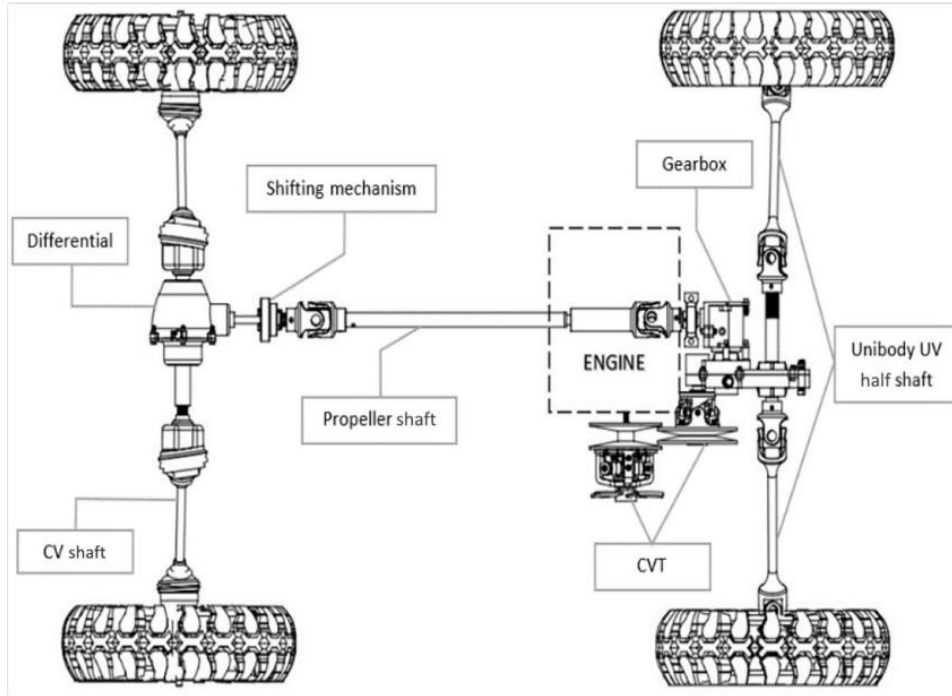


Fig. 3. Sistema de conversión 4x4 de la Universidad VIT [6]

Adicionalmente, se consideró el vehículo Mini BAJA SAE de la Universidad Pontificia Bolivariana [7]. Este sirvió como referencia, ya que considera el uso de un motor de 10 hp debido a que es un motor similar al de la competencia de este año. La diferencia es que, en este sistema, la transmisión de potencia se realiza mediante el uso de cadenas (véase Fig. 4).

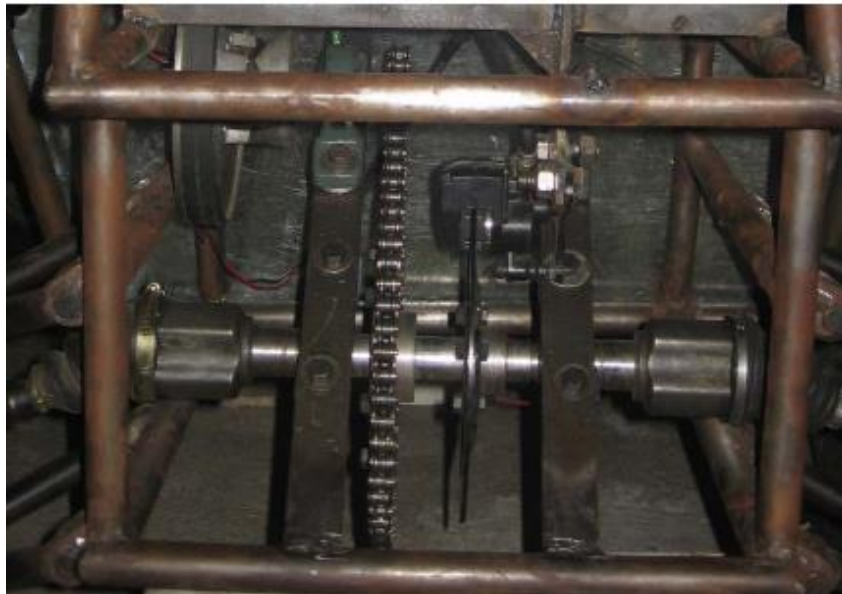


Fig. 4. Sistema de la Universidad Boliviana para la transmisión de potencia.

Para el vehículo se decidió seleccionar una caja CVT modelo Comet 790 y cambiar el diferencial DANA por un diseño propio, el cual fue maquinado mediante CNC. Este diferencial tiene un ángulo de salida de 90° que conecta el eje trasero con el diferencial delantero por medio del cardán, lo cual se puede observar en la Fig. 5.

4

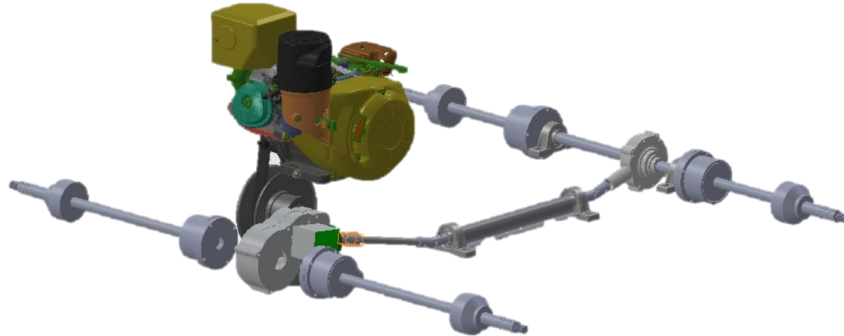


Fig. 5. Sistema de transmisión de potencia 4X4.

## II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La potencia suministrada al vehículo se realiza mediante un motor donado por Fundación NEMI, el cual es especificado con las siguientes características [3]. Al motor se le instalará una placa de restricción en la toma de aire, conforme al reglamento, lo que hará que la potencia de salida es de 9.4 HP establecida por el reglamento del BAJA SAE y el cual es el factor importante para la transmisión de potencia (véase Fig.6).

- a) Modelo: Kohler CH440
- b) Potencia: 14 HP, restringida a 9.4 HP
- c) Torque: 18.5 ft-lb
- d) Velocidad: 3600 rpm



Fig. 6. Motor proporcionado por Fundación NEMI

Para la selección de la caja CVT se optó por seleccionar el modelo Comet 790, debido a que su relación de transmisión de potencia cuenta con una reducción mayor a comparación de la utilizada en años anteriores, por lo que proporciona un mayor torque, el cual era un objetivo para el vehículo de este año. En la Tabla 1 se muestra una comparación de la CVT utilizada en años anteriores con el modelo Comet 790.

TABLA 1  
COMPARACIÓN CAJAS CVT

Modelo	Relación de transmisión de velocidades		
	Baja	Alta	Global
Comet 790	3.38:1	0.54:1	6.26:1
CVTech AAB	3:1	0.45:1	6.66

5

Adicionalmente, se tomó la decisión de cambiar el diferencial DANA por una caja de engranes personalizada. Esto debido a que se tiene como objetivo disminuir el peso del vehículo. Las características requeridas en la caja de engranes se muestra a continuación:

- a) Reducción al cardán: 3.27:1
- b) Reducción a los ejes traseros: 9.3:1
- c) Peso: 7 kg

Para calcular el torque que transmite el cardán, se toman en cuenta los demás componentes del sistema de transmisión de potencia, empezando con el torque máximo que entrega el motor. Para realizar esto se usará la ecuación 1 (1).

$$\tau_{Cardán} = \tau_{motor} * R_{CVT} * R_{Caja} \quad (1)$$

En donde:

$\tau_{Cardán}$ : Es el torque que llegará al cardán.

$\tau_{motor}$ : Es el torque que entrega el motor.

$R_{CVT}$ : Es la reducción de la CVT.

$R_{Caja}$ : Es la reducción de la caja de engranes.

Se debe de tomar la reducción de 3.38:1 de la caja CVT debido a que es cuando se presenta un mayor torque. Debido a que bajo esta condición se podría presentar falla en el cardán. El siguiente paso en el diseño del cardán es la selección del material. Para esto, se tiene como objetivo contar con un cardán compacto, por lo que se buscaron materiales con alta resistencia a la cedencia. Los materiales comunes para este tipo de elementos se muestran en la Tabla 2 [8]. Adicionalmente, al proponer este parámetro al tener una resistencia mayor, se espera que el diámetro del cardán disminuya y esto produzca una disminución de peso.

TABLA 2  
MATERIALES PROPUESTOS PARA EL CARDÁN

Material	Propiedades del material		
	Temperatura (*F)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)
1030 TyR	600	799.79	620.52
1060 TyR	800	1075.58	762.32
4140 TyR	1000	951.47	834.26



Una vez seleccionado el material Acero 4140 T y R se procedió con el diseño analítico del cardán. Para ello, se utilizaron distintos criterios de falla y se despejó el diámetro de la ecuación, se propuso un factor de seguridad de 3 y se obtuvo el diámetro a utilizar en las simulaciones. Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones [9].

ED-Goodman (Ecuación 2 (2)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^3 \quad (2)$$

ED-Gerber (Ecuación 3 (3)):

$$d = \left( \frac{8nA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Variables del criterio de ED- Gerber (Ecuación 4 (4) y Ecuación 5 (5)):

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2} \quad (4)$$

$$B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2} \quad (5)$$

ED-ASME elíptica (Ecuación 6 (6)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ 4 \left[ \frac{K_f M_a}{S_e} \right]^2 + 3 \left[ \frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right]^2 + 4 \left[ \frac{K_f M_m}{S_y} \right]^2 + 3 \left[ \frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right]^2 \right\}^{1/2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

ED-Soderberg (Ecuación 7 (7)):

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^3 \quad (7)$$

Posteriormente, para el análisis del cardán se utilizó un software de simulación por método de elemento finito (ANSYS). El primer paso fue realizar el discretizado de la pieza, el cual se muestra en la Fig. 7. Este elemento consta de dos ejes conectados por juntas universales y los ejes están sostenidos por dos chumaceras. Debido a esto, el discretizado se realizó de manera libre y con elementos de alto orden. Adicionalmente, se hicieron elementos del tamaño de 5 mm con el fin de obtener un resultado confiable y considerando el tamaño de las piezas.



Fig. 7. Discretizado del cardán.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis del modelo, se sometió el cardán a las condiciones y resultados establecidos en la ecuación 1. De esta manera se obtuvieron los esfuerzos, desplazamientos, deformaciones unitarias y los factores de seguridad estáticos y a la fatiga producidos en el cardán. En la Fig. 8, se muestran los desplazamientos bajo las condiciones descritas anteriormente.



Fig. 8. Desplazamientos presentes en el cardán [mm].

En la Fig. 9 se muestran los esfuerzos generados en el sistema.



Fig. 9. Esfuerzos presentes en el cardán [MPa].

Por último, se determinó el factor de seguridad estático y dinámico para el cardán con el fin de determinar si los elementos soportarán las fuerzas a las que estarían sometidos. Los resultados de estas simulaciones se pueden observar en la Fig. 10 y Fig. 11.



Fig. 8. Factor de seguridad estático presente en el cardán.



8

Fig. 11. Factor de seguridad dinámico presente en el cardán.

Al calcular el diámetro del cardán con los diferentes criterios de falla y proponiendo un factor de seguridad 3, las ecuaciones nos dieron un valor aproximado de una pulgada de diámetro para el cardán, por lo que se utilizó este valor para realizar las simulaciones. Al aplicar en la simulación el torque que recibirá el cardán por medio del engrane cónico al cual está conectado. Se determina que el desplazamiento radial a lo largo de la pieza es mínimo. El intervalo de valores se encuentra entre 0.14 mm y 0.79 mm. Los esfuerzos presentados por la simulación que tendrá el cardán tienen variaciones desde los 90.44 MPa a 454.6 MPa. Por último, los resultados del factor de seguridad estáticos y dinámicos obtenido por la simulación en el cardán son de 6.9585 y 3.3125 respectivamente en la zona del cardán, estos valores coinciden con los calculados teóricamente. Cabe mencionar que no se realizó una comparación de los datos analíticos y los numéricos, ya que las simulaciones fueron realizadas en conjunto de todos los elementos y no de manera individual. Una vez que se terminó toda la fase de diseño se procedió a construir e implementar el sistema en el Vehículo 4x4 como se muestra en la Fig. 12.



Fig. 12. Implementación del sistema de potencia

En la Fig. 13 se muestra el vehículo completamente armado y arrastrando una camioneta comercial sin problema.



Fig. 13. Implementación del sistema de potencia.

#### IV. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto se pudo diseñar, calcular y simular las dimensiones para el cardán del equipo Escuadrón UAM 2023, teniendo siempre en mente el objetivo de tener un cardán compacto. Adicionalmente, con el factor de seguridad establecido de 3 se garantiza que el elemento funcionara adecuadamente y será liviano en comparación si se utilizaran factores superiores a este el cual es un requerimiento para el diseño de vehículos. Se optó por el acero 4140 T y R para el cardán debido a sus propiedades mecánicas permiten obtener una resistencia adecuada y disminuir el peso y volumen del material, de esta manera se logra cumplir con uno de los objetivos el cual es disminuir el peso del vehículo. Si se compara el modelo de la universidad VIT con este diseño propuesto, se puede apreciar claramente una disminución en el tamaño de los elementos y se eficiente el sistema al seleccionar elementos como se las juntas y las cajas diferenciales propuestas. En comparación al sistema de la Universidad Boliviana, al cambiar de cadenas a un sistema de engranajes, se tiene una mejor tracción y no existe un tiempo de retardo como sucede al usar cadenas. Por lo cual este sistema tiene un mejor desempeño que los anteriores.

Por último, se realizaron las simulaciones para corroborar los valores calculados teóricamente. Una vez que se diseñó, se encontraron factores de seguridad superiores a tres lo que permite determinar que el componente funciona adecuadamente y por lo cual el sistema de potencia cumple con los requerimientos de diseño. En algunos puntos de la simulación se encontraron factores menores a uno, cabe destacar que donde se presentaban estos datos eran en las partes del sistema de transmisión que se compraron y no se fabricaron, esto se debe a que la mayoría de estos elementos no se contaban con las especificaciones y solo eran demostrativas en el elemento. Cuando se implementó y se construyó el sistema y vehículo, se pudo determinar que el sistema funcionaba muy bien ya que pudo cumplir con las pruebas establecidas en la competencia BAJA SAE.

Adicionalmente, se puede saber que los objetivos se cumplieron ya que se obtuvo un reconocimiento por parte de BAJA SAE en el cual se demuestra que el diseño de todos los elementos del vehículo fue el mejor (véase Fig. 14).



Fig. 14. Reconocimiento por el mejor desempeño

Cabe mencionar que no se realizó una comparación de los datos analíticos y los numéricos ya que las simulaciones fueron realizadas en conjunto de todos los elementos y no de manera individual.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, a la Rectoría General, a la Rectoría de Unidad, a la División de CBI, a la División de CyAD, al Departamento de Energía, al Departamento de Materiales y al Departamento de Electrónica por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] A. Adam, A. Austin A., B. Ian, B. Greg, C. Kyle, D. Ethan, G. Jonathan, K. Noah, L. Dandan, "USD Baja SAE, Reporte de Proyecto", Department: Shiley Marcos School of Engineering, 2024.
- [2] J. Martínez, D. Corona, S. Diaz, R. Boccardo, "Characterization of an Adjustable Centrifugal Continuously Variable Transmission for a Baja SAE Prototype. No. 2010-01-0861", *SAE Technical Paper*, 2010.
- [3] *Society of Automotive Engineers, 2023*, BAJA SAE Mexico Rules 2023, pp. 22-23.
- [4] C. R. Franco Suárez, D. García Mendoza, R. Saavedra Moreno, "Diseño e implementación del sistema de potencia ligero para el vehículo BAJA SAE UAM 2022," Proyecto de Integración, Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 48-88, 223.
- [5] *Society of Automotive Engineers, 2018*, BAJA SAE Rules 2018, pp. 19.
- [6] C. Kannan, B. Ashok, D. Harshad, S. Agarwal, D. Kapoor, K. Akshat, A. Mathew, "Design, Analysis, and Simulation of a Four-Wheel-Drive Transmission for an All-Terrain Vehicle", *SAE technical paper series*. pp. 3-10, 2022.
- [7] C. A. Calderón Acuña, J. C. Ortiz Lievano, C. F. Patiño Castillo, O. F. Rodríguez Pico, "Diseño y construcción de un prototipo mini-baja SAE", Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, 2008, pp. 71-74.
- [8] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw Hill, Tabla A-21, 2012.
- [9] R. L. Mott, V. G. Pozo, S. S. Sánchez, A. H. Fernández, J. V. Sánchez, *Diseño de elementos de máquinas*, 2006.



## Diseño y simulaciones MEF & CFD de un cortador de cable de registro para la industria petrolera

Design and FEM & CFD simulations of a Cable Cutter for the Oil Industry

Jesus Bermudez Vilchiz<sup>1</sup>, Luis Alberto Ramírez López<sup>2</sup>, Apolinar Albiter Hernández<sup>3</sup>,  
Víctor Augusto Castellanos Escamilla<sup>4</sup>, Iván Enrique Martínez Merlin<sup>5</sup>

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0009-0000-0137-0458 | M18250511@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>2</sup>ORCID: 0009-0009-8286-3371 | M18250509@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0002-9097-5981 | aalbiter@imp.mx

<sup>4</sup>ORCID: 0000-0001-8511-4477 | victor.ce@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>5</sup>ORCID: 0000-0001-9030-5024 | iemerlin@hotmail.com

Recibido 15-08-2024, aceptado 30-09-2024.

### Resumen

Los dispositivos cortadores de cable de registro son fundamentales en la industria petrolera, desempeñando un papel crucial en operaciones que requieren seguridad y eficiencia.

En la industria petrolera mexicana, sin embargo, existe una notable dependencia de tecnologías con distribuidores extranjeros. Con el objetivo de reducir esta dependencia y fortalecer la capacidad nacional, se ha desarrollado un dispositivo de corte de cable de registro de origen nacional. Este dispositivo no solo busca garantizar la autonomía tecnológica.

El diseño y simulación del dispositivo se llevó a cabo mediante el uso de SolidWorks®, un software de diseño asistido por computadora. Inicialmente, se formuló una propuesta de diseño conforme a parámetros específicos, seguida por la selección meticulosa de materiales destinados a la fabricación de los componentes del dispositivo. Posteriormente, se realizaron simulaciones tanto de análisis estático como de fluidos para evaluar exhaustivamente su rendimiento.

En el análisis estático, los esfuerzos de Von Mises para el cuerpo del dispositivo y el cuerpo hidráulico fueron de 475,130,208 Pa y 257,019,664 Pa, respectivamente. Los desplazamientos fueron mínimos menores a 0.02 mm y los factores de seguridad rondaron en valores de 1.50 y 2.92. Este desarrollo nacional mejora la independencia tecnológica en la industria petrolera de México y puede aumentar la seguridad y eficiencia de las operaciones.

**Palabras clave:** dependencia tecnológica, lubricador, dispositivo cortador de cable de registro, SolidWorks®, análisis estático, análisis de fluidos.

### Abstract

Cable cutting devices are fundamental in the oil industry, playing a crucial role in operations that require safety and efficiency.

In the Mexican oil industry, however, there is a notable dependence on technologies with foreign distributors. With the aim of reducing this dependence and strengthening national capacity, a cable cutting device of national origin has been developed. This device not only seeks to guarantee technological autonomy.

The design and simulation of the device was carried out using SolidWorks®, a computer-aided design software. Initially, a design proposal was formulated according to specific parameters, followed by the meticulous selection of materials for the fabrication of the device's components. Subsequently, both static and fluid analysis simulations were performed to thoroughly evaluate its performance.

In the static analysis, the Von Mises stresses for the device body and hydraulic body were 475,130,208 Pa and 257,019,664 Pa, respectively. The displacements were less than 0.02 mm and the safety factors were between 1.50 and 2.92. This national development improves the technological independence in the Mexican oil industry and can increase the safety and efficiency of the operations.

**Index terms:** Technological dependence, lubricator, cable cutting device, SolidWorks®, static analysis, fluid analysis.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria petrolera en México está en busca de innovaciones que mejoren la eficiencia y seguridad de sus operaciones en pozos evitando consigo la dependencia tecnológica excesiva que se tienen con la tecnología de otros países y que ayude a tener una capacidad tecnológica autónoma [1]. Estando en búsqueda de diseños únicos que resuelvan problemas específicos. En este contexto es requerido diseñar dispositivos que permitan realizar exitosamente la solución de dichos problemas y que prometan ser una valiosa adición a los equipos disponible [2], [3], [4].

El objetivo principal es desarrollar el diseño de un dispositivo cortador de cable de registro destinado a la industria petrolera en México. Este diseño busca eliminar la dependencia tecnológica con proveedores internacionales. Se considera que el dispositivo sea viable tanto técnicamente como económicamente para su manufactura.

Se propone un diseño detallado de la solución, asegurando que el dispositivo sea de fácil manejo, eficiente y seguro, cumpliendo con las normas y especificaciones técnicas pertinentes. Además, se implementarán los planos de fabricación y un manual de ensamblaje y operación para facilitar su manufactura y uso.

Entre las normas consideradas en la industria del petróleo y gas, destaca la API Spect 6A Especificación para equipos de cabeza de pozo y árbol de Navidad [5]. Esta norma se centra en las consideraciones para el diseño y fabricación de dispositivos que operan bajo presión. La API Spect 6A abarca una amplia variedad de equipos y componentes. Estos equipos operan en un rango de presión que va desde los  $1.379 \times 10^7$  Pa hasta los  $1.379 \times 10^8$  Pa. Además, la norma establece un rango de temperatura de trabajo que va desde los  $-46^\circ\text{C}$  hasta los  $121^\circ\text{C}$ . Asimismo, la norma especifica diferentes clases de materiales, identificados como AA, BB, CC, DD, EE, FF y HH. También define diferentes niveles de rendimiento, desde PSL1 hasta PSL4. Finalmente, la API Spect 6A establece pruebas y requisitos específicos. Estos están diseñados para garantizar que el equipo pueda soportar condiciones extremas de presión y temperatura, y para prevenir fugas o fallos.

El estudio comparativo y la revisión de literatura han revelado una serie de trabajos significativos en el campo de los cortadores de cables de registro. Estos trabajos son fundamentales para las referencias de este estudio.

En Hunting et al. [6] se detalla el desarrollo del dispositivo Cortador de cables con cabezal de grasa hidráulico. Este dispositivo se instala en el lubricador y se activa hidráulicamente accionando un pistón. Su mecanismo de corte, de tipo guillotina, se pone en marcha al accionar un pistón con presión hidráulica. Es capaz de cortar cables de registro de hasta 11.906 mm y opera a presiones máximas de  $6.895 \times 10^7$  Pa. Además, ofrece un acceso sencillo para que un operador pueda cortar el cable de manera rápida y eficiente.

Por otro lado, en Elmar et al. [7], se presenta el dispositivo cortador de cables secundario (CCS) [8]. Al igual que el anterior, este dispositivo se instala en el lubricador y funciona a presiones máximas de  $6.895 \times 10^7$  Pa. Destaca por sus conexiones de 2-10 TPI (Roscas por Pulgada por sus siglas en inglés) y conexiones hidráulicas únicas. Su mecanismo de corte, también de tipo guillotina, se activa mediante un pistón con presión hidráulica. Este dispositivo puede cortar cables de registro de hasta 11.906 mm.

Finalmente, en Phuel oil tools et al. [9], se describe el dispositivo cizalla de cable secundario [10]. Este se coloca debajo del lubricador y por encima del atrapa-herramientas, aunque su ubicación no está restringida a estos componentes y puede instalarse de forma independiente. Dispone de conexiones principales de 4-3/4, 4 ACME y secundarias de 2-10 ACME, así como conexiones hidráulicas de 12.700 mm NPT. Su mecanismo de corte, similar a un cortapuros, es de tipo cizalla y puede cortar cables de registro de hasta 11.113 mm. Se activa hidráulicamente y opera a presiones máximas de  $6.895 \times 10^7$  Pa, con una presión de prueba de  $1.034 \times 10^8$  Pa.

Es importante señalar que, en el caso de estos tres dispositivos, el mecanismo debe ser reajustado manualmente después de su uso. Esto implica que el pistón, que se activa hidráulicamente, debe ser devuelto a su posición inicial por el operador.

Si bien estos dispositivos presentan características beneficiosas, también enfrentan problemáticas significativas para los operadores de los pozos petroleros. En primer lugar, muchos de estos equipos cuentan con un cilindro de simple efecto, lo que obliga a los operadores a reajustar manualmente el mecanismo de corte después de

cada uso. Este proceso implica bajar el dispositivo del equipo de operaciones de cable de registro, desarmarlo, cambiar la cuchilla de corte y volver a armarlo, lo que resulta engorroso y propenso a errores. Este procedimiento no solo consume tiempo, sino que también puede llevar a la fatiga del operador, aumentando el riesgo de accidentes.

Además, los operadores enfrentan serios riesgos de seguridad debido a posibles fallos en los dispositivos. Estos fallos pueden generar situaciones peligrosas que ponen en riesgo la salud y la vida de los trabajadores. La presión de trabajo y las condiciones del pozo añaden una capa adicional de complejidad, haciendo que la seguridad sea una preocupación constante.

∞

Por último, la baja eficiencia operativa es otro desafío importante. El tiempo perdido en ajustes, mantenimiento y operaciones ineficientes disminuye la productividad general. Esta pérdida de tiempo no solo afecta el rendimiento del equipo, sino que también impacta negativamente en los costos operativos, reduciendo la rentabilidad de las operaciones en el campo.

El diseño propuesto representa un avance significativo en el campo de los cortadores de cables de registro, diferenciándose notablemente de los equipos existentes. A continuación, se describen las características y ventajas de este innovador dispositivo:

- El dispositivo propuesto para cortar cables de registro durante las operaciones en el pozo ha sido diseñado desde cero. Actualmente, no existen dispositivos similares en la industria petrolera nacional que puedan colocarse en el lubricador.
- Sus conexiones han sido adaptadas para integrarse sin problemas con los dispositivos y equipos ya existentes en la industria petrolera.
- Cuenta con conexiones rápidas 6.350 mm NPT, facilitando su conexión con las bombas hidráulicas de trabajo.
- Puede operar a presiones máximas de trabajo de  $6.895 \times 10^7$  y  $2.068 \times 10^7$  Pa, y soporta presiones de prueba hidrostática de  $1.034 \times 10^8$  y  $3.103 \times 10^7$  Pa.
- Su mecanismo de corte, de tipo cizalla, es independiente al pistón de accionamiento. Este mecanismo se compone de una cuchilla y una matriz de corte, las cuales pueden ser reemplazadas fácilmente una vez que hayan alcanzado su vida útil.
- Tras su uso, el mecanismo de corte puede regresar a su posición inicial mediante presión hidráulica. Esto es posible gracias a que el cuerpo hidráulico ha sido diseñado como un pistón de doble efecto, eliminando la necesidad de un reajuste manual.
- Tiene la capacidad de cortar cables de registro de 3.175 hasta 25.400 mm.
- La capacidad de este dispositivo para colocarse en el lubricador puede resultar muy beneficiosa para la industria petrolera por diversas razones. Entre ellas, permite un mejor control del flujo de los fluidos extraídos, incrementa la seguridad en caso de emergencia al evitar accidentes y daños en otros dispositivos o equipos, y ofrece una mayor flexibilidad al poder ser utilizado tanto en pozos terrestres como marítimos.
- El dispositivo propuesto presenta características que son de gran valor para la industria petrolera en México, ya que elimina la dependencia tecnológica de otros países. Esto evita la necesidad de comprar o rentar equipos que generan altos costos. Al adquirir o rentar estos dispositivos, las empresas deben afrontar gastos significativos, que incluyen el traslado, mantenimiento y refacciones. Los costos de traslado pueden ser elevados, y el mantenimiento, que a menudo debe realizarse por las mismas empresas vendedoras, añade un gasto recurrente. En contraste, el dispositivo propuesto es completamente nacional, lo que se traduce en varios beneficios específicos. En primer lugar, los costos de adquisición, mantenimiento y refacciones son considerablemente menores. Esto se debe a que el mantenimiento puede ser realizado por personal local con conocimientos en equipos de pozos petroleros, eliminando la necesidad de depender de proveedores externos y reduciendo los tiempos de inactividad. Además, las refacciones del dispositivo están diseñadas para ser fácilmente reemplazables, lo que facilita su mantenimiento y reduce el tiempo necesario para llevar a cabo reparaciones. Al utilizar materiales de bajo costo, se minimizan los gastos operativos, permitiendo a las empresas optimizar su presupuesto. Estos factores no solo contribuyen a una reducción de costos, sino que

también aumentan la eficiencia operativa. Al disminuir el tiempo dedicado a la adquisición y mantenimiento de equipos, las empresas pueden reorientar sus recursos hacia otras áreas productivas, mejorando así la productividad general. En resumen, el diseño del dispositivo no solo mejora la eficiencia y seguridad operativa, sino que también ofrece ahorros significativos en costos y tiempo, lo que representa una solución viable y sostenible para la industria petrolera en México.

## II. METODOLOGÍA

### 4 A. Parámetros para el diseño mecánico del dispositivo cortador de cable de registro

Las características principales que se tomaron para la propuesta de diseño del dispositivo son tomadas a consideración para que sean adaptables a lo ya existente en la industria petrolera, como son el tipo de rosca ACME de 4 1/8, 3 3/4, 3 y 2 para las conexiones con el lubricador.

Rosca NPT de 6.350 mm para las conexiones rápidas entre el dispositivo cortador de cable de registro y la bomba hidráulica ENERPAC modelo P80 de  $6.895 \times 10^7$  Pa.

Que cumpla con las presiones requeridas para cortar el cable de registro y que también soporte las presiones de trabajo expuestas para cumplir con las normas mencionadas, en la Tabla 1 se observan los parámetros tomados a consideración para la propuesta de diseño.

TABLA 1.  
 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PROTOTIPO DE CORTADOR DE CABLE DE REGISTRO.

Conexiones principales	Rosca ACME	4 1/8, 3 3/4, 3, 2
Conexión hidráulica	Rosca NPT	6.350 mm
Presión hidráulica máxima de trabajo para cuerpo del dispositivo	-	$6.895 \times 10^7$ Pa
Presión hidráulica de prueba hidrostática para cuerpo del dispositivo	-	$1.034 \times 10^8$ Pa
Presión hidráulica máxima de trabajo para cuerpo hidráulico	Bomba hidráulica ENERPAC P80	$2.068 \times 10^7$ Pa
Presión hidráulica de prueba hidrostática para cuerpo hidráulico	Bomba hidráulica ENERPAC P80	$3.103 \times 10^7$ Pa
Presión requerida para cortar el cable de registro	Cortador de cable de registro	$1.793 \times 10^7$ Pa

### B. Selección de materiales para fabricación del dispositivo cortador de cable de registro

Las condiciones ambientales que presentan los pozos petroleros llegan a ser extremas para los aceros de los componentes de los dispositivos que operan en la industria es por esta razón que se deben seleccionar aceros adecuados. Durante las operaciones dentro de un pozo petrolero se tienen presentes condiciones que generan desgaste en las propiedades mecánicas de los componentes y dispositivos, como son la exposición a: agentes corrosivos, altas temperaturas, presiones extremas, arenamiento y emulsiones de agua-petróleo [11], [12].

Los aceros AISI 4140T y AISIM2 se seleccionaron para la fabricación del dispositivo cortador de cable de registro debido a sus propiedades mecánicas, el acero AISI 4140T presenta buena resistencia y tenacidad, alta resistencia a la fatiga y al desgaste, durabilidad, buena maquinabilidad para la fabricación de piezas, buena respuesta ante tratamientos térmicos y por su costo-efectividad al ser más rentable en comparación con otros aceros de alta resistencia [13].

El acero AISI M2 será utilizado para fabricar el mecanismo de corte, presenta excelente dureza, resistencia al desgaste, tenacidad o dicho de otra manera que es resistente a impactos y esfuerzos sin fracturarse por lo que es ideal para el mecanismo de corte de cable de registro, también presenta una buena resistencia a la corrosión y a los ácidos como se describe en [15].

Por lo tanto, las propiedades y características únicas que presentan ambos aceros los hacen adecuados para su selección y para la fabricación del dispositivo.

### C. Diseño en software SolidWorks®

El dispositivo propuesto se diseñó en el software CAD SolidWorks [17]. Los componentes están enlistados en la Fig. 1: (a) cuerpo de dispositivo, (b) cuerpo hidráulico, (c) embolo, (d) cuchilla de corte, (e) cuña, (f) tuerca bipartida, (g) tapón cuerpo hidráulico, (h) guía de cable de registro, (i) matriz de corte, (j) soporte de matriz de corte y guía de cable de registro, (k) tapón de cuerpo. La muestra en una vista de corta A-A la sección transversal del dispositivo propuesto mostrando cada componente de este.

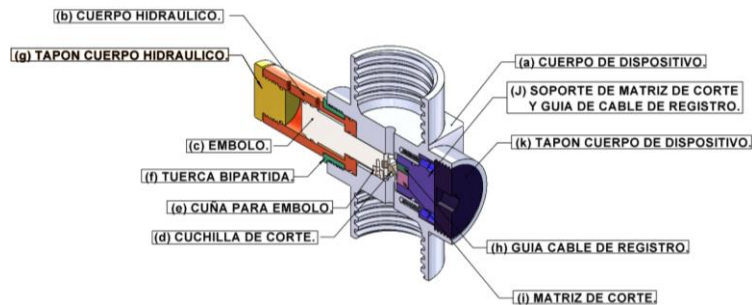


Fig. 1. Vista de sección A-A de dispositivo cortador de cable de registro con vista de los componentes del dispositivo.

### D. Funcionamiento del dispositivo cortador de cable de registro

El componente principal del dispositivo cortador de cable de registro es el “cuerpo de dispositivo” (véase Fig. 2) este será por donde se hará pasar el cable de registro el cual puede ir desde diámetros que van desde 3.175 hasta 25.400 mm.

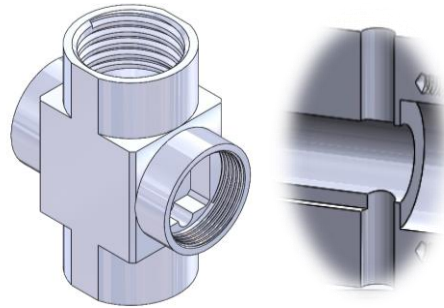


Fig. 2. Cuerpo de cortador de cable de registro.

El dispositivo funciona mediante la aplicación de presión hidráulica de aceite 20W-50 en el “cuerpo hidráulico”, el cual presenta dos barrenos con rosca NPT de 6.350 mm. para conexiones rápidas macho y hembra, que se utilizan para la entrada y salida del aceite 20W-50, proporcionando la presión requerida para llevar a cabo el corte del cable de registro como se muestra en la Fig. 3.



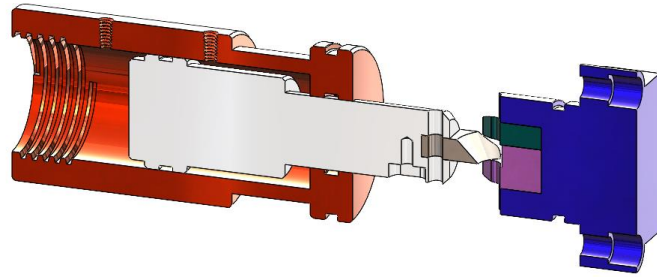


Fig. 3. Funcionamiento de cortador de cable de registro.

El “cuerpo hidráulico” es en donde se colocara internamente el embolo, presenta unos alojamientos para los empaques back-up ring y anillos o-rings con la finalidad de tener un cierre hermético y evitar fugas de aceite, presenta una rosca 2 ACME para la unión del tapón de cuerpo hidráulico, el “embolo” es el componente que será el accionador del mecanismo de corte al aplicársele presión hidráulica, también presenta un alijo para colocar empaques back-up ring y anillo o-rings, además de un barreno para unir a través de un perno con la “cuchilla de corte”, encargada de realizar el corte del cable de registro, la “cuña” para guía de embolo es la encargada de guiar y mantener el embolo centrado y evitar que se gire la cuchilla, la “tuerca bipartida” es la que une el cuerpo hidráulico con el cuerpo del dispositivo, esto mediante la conexión de rosca 3 ACME, el “tapón de cuerpo hidráulico” es el componente que cierra el cuerpo hidráulico por medio de la conexión roscada 2 ACME y también cuenta con el alijo para colocar los empaques back-up ring y anillos o-rings. En la Fig. 4 se muestran los componentes mencionados.

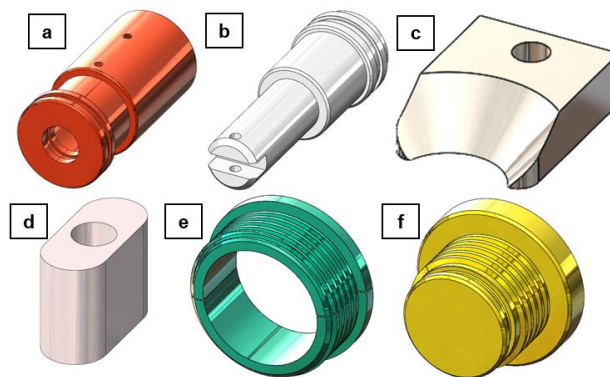


Fig. 4. Componentes del cortador de cable de registro. a) Cuerpo hidráulico, b) Embolo, c) Cuchilla de corte, d) Cuña para émbolo, e) Tuerca bipartida, f) Tapón de cuerpo hidráulico.

La parte mecánica encargada específicamente del corte del cable de registro (véase Fig. 5) se conforma de una “guía de cable de registro” que es la pieza que permite centrar el cable de registro en la “matriz de corte” donde se efectuara el corte por medio de la “cuchilla de corte”, el “soporte de matriz de corte” es la que albergara dichos componentes fijándolos con pernos, se ensambla con el cuerpo de dispositivo mediante tornillos cilíndricos Allen, cuenta también con un alijo para los empaques y anillos o-rings y back-up ring, el “tapón de cuerpo de dispositivo” es el pieza que sella el mecanismo de corte evitando que el mismo se mueva por el contacto de la cuchilla de corte contra la matriz de corte, este tapón se une con el cuerpo del dispositivo con la conexión roscada ACME de 3 3/4.

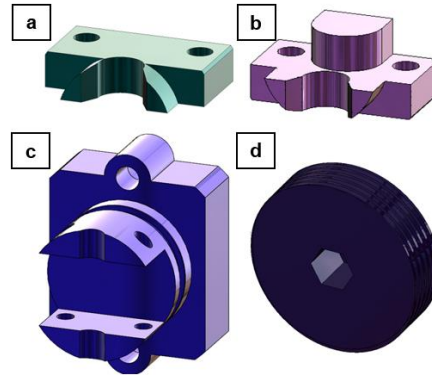


Fig. 5. Componentes para el mecanismo de corte de cable de registro, a) Matriz de corte, b) Soporte de matriz de corte, c) Guía de cable de registro y d) Tapón de cuerpo del dispositivo.

Una vez que se hace pasar el aceite 20W-50 por las conexiones rápidas NPT en el cuerpo hidráulico, se acciona el émbolo, dicho componente tiene una comisura en la cual se une la cuchilla de corte. Al ser accionado el émbolo el mecanismo de corte diseñado comienza su funcionamiento, consiste en que la cuchilla realice un corte transversal en el cable de registro cuando dicho cable este en la guía y la matriz de corte (véase Fig. 6).

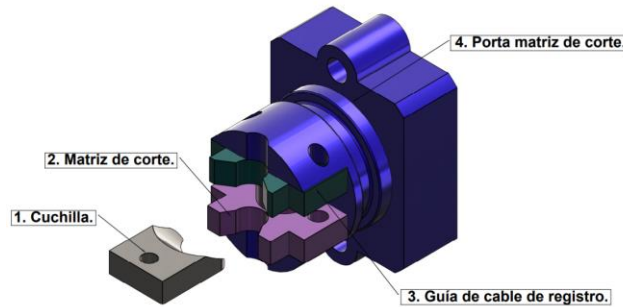


Fig. 6. Mecanismo de corte de cable de registro.

## E. Simulaciones

### 1) Análisis estático

El análisis estático se realizó en los componentes más críticos del dispositivo cortador de cable de registro mediante el software CAD SolidWorks© Simulación, este análisis se realiza con la finalidad de predecir el comportamiento de dichos componentes ante las presiones que actúan en ellos, proporcionando información como los esfuerzos y factores de seguridad, lo que permite determinar si los componentes diseñados y propuestos son adecuados para su función y para su futura fabricación. Los componentes críticos mencionados son el “cuerpo del dispositivo” y el “cuerpo hidráulico”, ya que en ellos se les definirá sus puntos de sujeción y las presiones tomando en cuenta el acero de trabajo que se ha seleccionado.

De acuerdo con la norma API Spect 6A, en el apartado de control de calidad se describe la información sobre pruebas e inspecciones, entre las pruebas mencionadas se encuentra la prueba hidrostática, en la cual se menciona que la presión que se debe aplicar debe de ser 1.5 veces la presión de operación.

Para poder comenzar con el análisis estático se debe definir el material de trabajo en la biblioteca de materiales de SolidWorks© donde se muestran las propiedades del material como Para este análisis el material de trabajo es el acero AISI 4140T que en la biblioteca de materiales de SolidWorks© aparece como acero no aleado DIN 1.7225 [17]. La Tabla 2 muestra las propiedades.

TABLA 2.  
 PROPIEDADES DEL ACERO AISI 4140T DE ACUERDO CON EL PROGRAMA SOLIDWORKS® [17].

Propiedades	Valor	Unidades
Modulo elástico	$2.10 \times 10^{11}$	Pa
Modulo cortante	$7.9 \times 10^{10}$	Pa
Densidad de masa	7800	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	1,000,000,000	Pa
Límite elástico	750,000,000	Pa

*Ejecución de análisis estático*

Para la realización de la simulación de análisis estático se sigue una serie de pasos su ejecución. Dichos pasos se describen en el diagrama a continuación (véase Fig. 7).

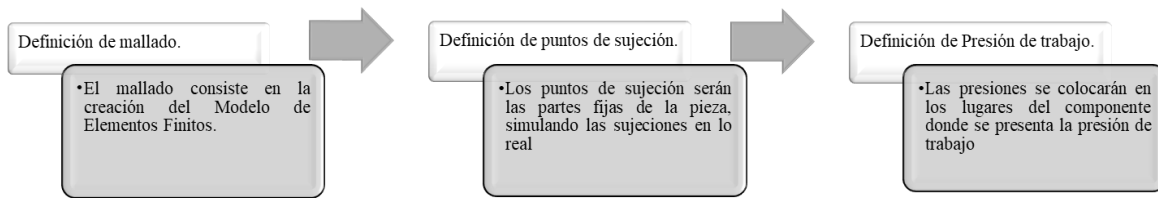


Fig. 7. Diagrama de pasos a seguir para ejecución de simulación estática.

*Definición de mallado.*

En el análisis estático el mallado se considera una de las partes más importantes debido a que está relacionada con la precisión en la simulación, si se requieren resultados de mayor precisión se le considera un mallado fino, pero si en el caso contrario, que no se requiera tanta precisión se considerará un mallado grueso o intermedio.

El mallado consiste en la creación del modelo de elementos finitos. Este es un proceso en que un “modelo continuo”, es decir, la pieza o ensamble que vamos a analizar se “divide” en un número finito de elementos individuales. Cada uno de estas “piezas” de la malla, son llamados “elementos”, e interactúan entre sí a través de “nodos”.

Es importante además que el tipo de mallado a utilizar sea el apropiado para el modelo geométrico diseñado ya que con este mallado se estarán trabajando las interacciones de los elementos, estos elementos permitirán realizar más cálculos en el modelo geométrico, y se mostraran resultados con mayor exactitud.

En la Fig. 8 se muestran el mallado del cuerpo del dispositivo y del cuerpo hidráulico con el mallado propuesto y en la Tabla 3 se muestran el componente analizado, la descripción de estos, los nodos utilizados para el análisis, el número de elementos y el tipo de mallado utilizado.

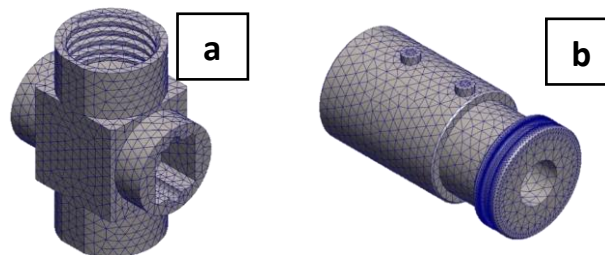


Fig. 8. Mallado para los componentes: a) cuerpo del dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

TABLA 3.  
 ESPECIFICACIONES DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.

Componente	Material utilizado para análisis estático	Número de nodos	Número de elementos	Mallado utilizado
Cuerpo de dispositivo	Acero AISI 4140/ acero no aleado DIN 1.7225.	38614	22810	Mallado fino
Cuerpo hidráulico	Acero AISI 4140/ acero no aleado DIN 1.7225.	124425	74260	Mallado fino

*Definición de puntos de sujeción*

Los puntos de sujeción serán las partes fijas de la pieza, simulando las sujeciones en lo real, para el caso de este análisis los puntos de sujeción de las piezas a simular serán las que se muestran en la Fig. 9.

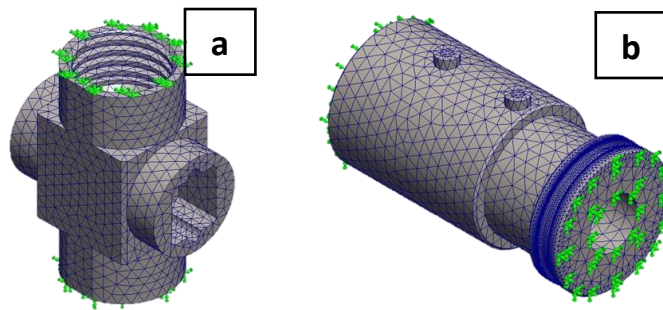


Fig. 9. Puntos de sujeción para los componentes: a) cuerpo del dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

*Definición de presión de trabajo*

Las presiones se aplicarán en los puntos del componente donde se experimenta la presión de trabajo. Es fundamental seleccionar adecuadamente el lugar de aplicación para poder observar el comportamiento del componente de manera precisa.

Además, es importante determinar si la presión de trabajo será uniforme o no. En este caso, se aplicará de forma uniforme en el interior de estos. La Fig. 10 ilustra la presión ejercida en el interior del cuerpo del dispositivo.

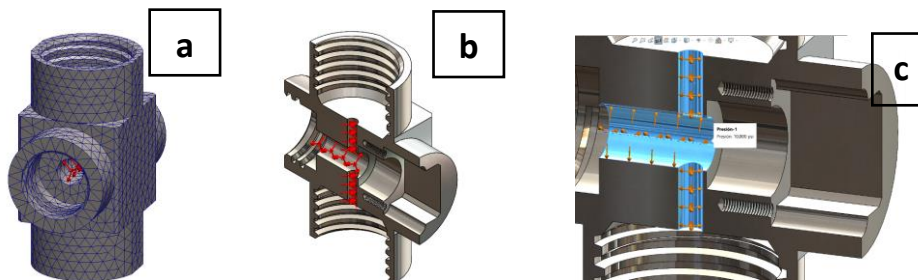
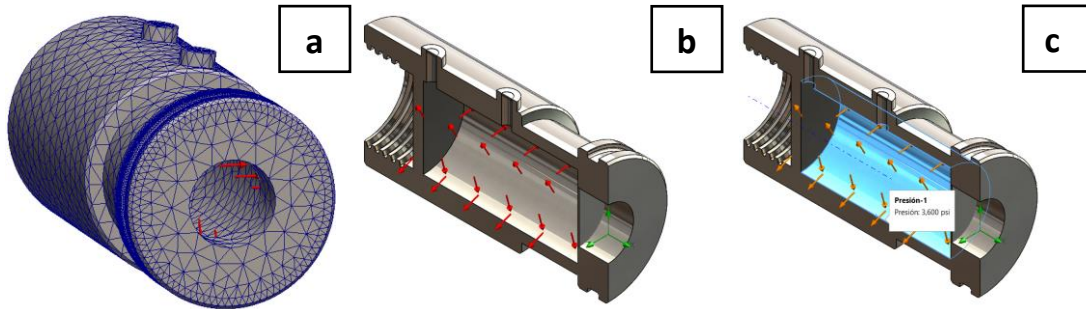


Fig. 10. Presión de trabajo aplicada en cuerpo de dispositivo: a) Interior del cuerpo de dispositivo con mallado, b) Corte transversal, c) Acercamiento del cuerpo con vista de corte transversal.

En la Fig. 11 se muestra la presión aplicada en la parte interna del cuerpo hidráulico.



**Fig. 11.** Presión de trabajo aplicada en cuerpo hidráulico: a) Interior del cuerpo de dispositivo con mallado, b) Corte transversal, c) Acercamiento del cuerpo con vista de corte transversal.

Una vez definido estos pasos se procede a realizar la ejecución y análisis de la simulación. Los resultados obtenidos de la simulación del análisis estático muestran los esfuerzos de Von Mises, desplazamientos y factor de seguridad. En estos resultados se muestran gráficos los cuales presentan diferentes colores y valores mostrándose en el componente el punto máximo y mínimo. Para cada una de las características mencionadas se tienen resultados que permiten analizar el comportamiento del componente ante la presión aplicada.

## 2) Análisis de fluidos

El análisis de fluido que se ejecutará en el cuerpo hidráulico del dispositivo y tiene como fin el observar el comportamiento del aceite hidráulico 20W-50 al introducirlo en el interior del componente, para visualizar las líneas de flujo durante su funcionamiento tanto de la presión ejercida como la velocidad que tendrá dicho fluido en el interior del componente.

### a) Parámetros de simulación

Para el análisis de fluido lo primero que se debe realizar es definir el fluido de trabajo, el cual para este caso es aceite 20W-50, en la biblioteca de SolidWorks© no se tiene este fluido por lo que es requerido “diseñarlo”, buscando las propiedades mecánicas del mismo, para esto se busca la ficha técnica del aceite 20W-50 mostrada en la Tabla 4.

TABLA 4.  
 VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE 20W-50 [18].

Densidad. (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad. (Pa*s)	Calor específico. (J/kg*K)	Conductividad térmica. (w/m*K)
871.917	0.008	2428.344	0.104

Aunado a ello se colocan los datos de entrada de fluido, los cuales se obtienen del manual de usuario de la bomba hidráulica ENERPAC modelo P80, de la cual requerimos conocer el caudal o flujo volumétrico (véase los datos en la Tabla 5).



TABLA 5.  
 DATOS DE FUNCIONAMIENTO DE BOMBA ENERPARC P80 [19].

Máxima presión de funcionamiento	Flujo volumétrico
6.895x10 <sup>7</sup> Pa	4.124x10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> /s

11

Los parámetros para la simulación serán los indicados a continuación; nombre de la simulación, unidades de medidas en las que se trabajarán, el tipo simulación a realizar, el fluido de trabajo, condiciones de “pared” y las condiciones iniciales de trabajo.

En cada una de estas secciones se seleccionarán los parámetros para la simulación; comenzando por ponerle como nombre de simulación “CFD CABLE DE REGISTRO”, se continua con seleccionando las unidades de medida “SI”, para el tipo de análisis se selecciona que sea de tipo de “Fluid Flow”, el líquido de trabajo a seleccionar es “aceite 20W-50” y por último las condiciones de pared y las condiciones iniciales de trabajo se dejan por default de como las muestra el asistente de análisis véase Fig. 12.

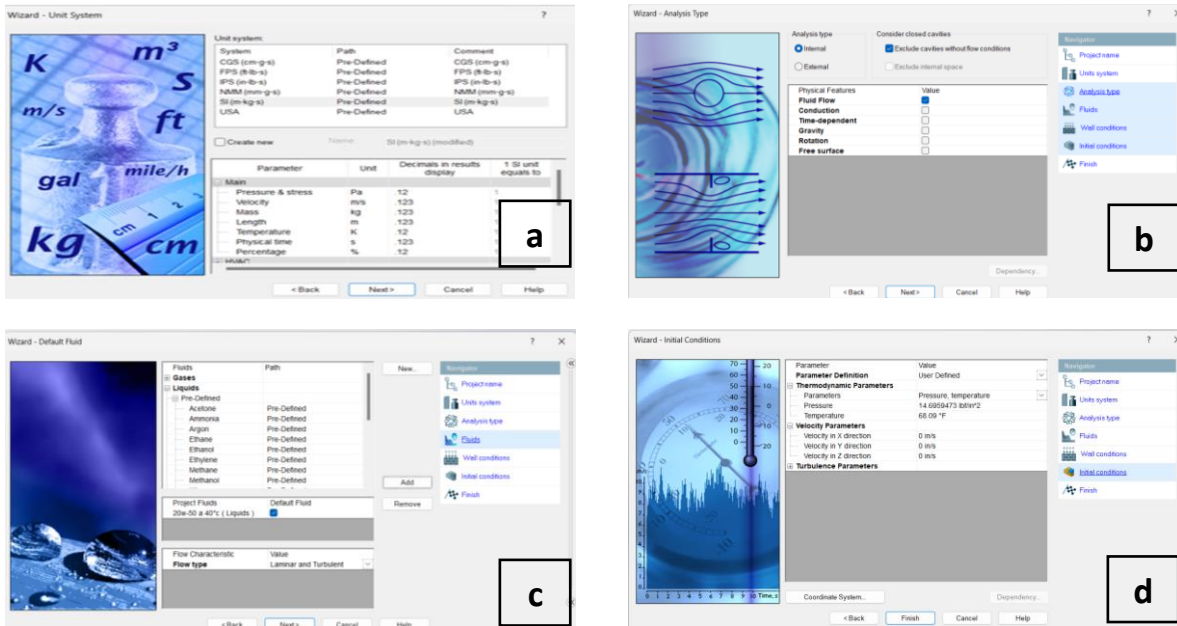


Fig. 12. Recuadros del navegador para definir los parámetros específicos de simulación de fluidos: a) unidades, b) tipo de análisis, c) tipo de fluido, d) condiciones.

*Dominio computacional*

Posteriormente a definir todos los parámetros iniciales para el análisis se continúa por definir el dominio computacional en el componente a analizar, este es el que define la región “espacial” que es de interés estudiar y establece las condiciones iniciales y de frontera en el dominio del cálculo.

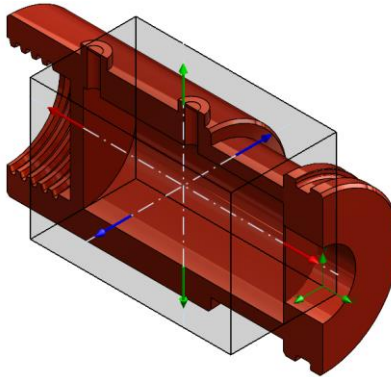


Fig. 13. Dominio computacional para cuerpo hidráulico.

### Entrada o Inlet

En la entrada de fluido o Inlet se indicará por donde iniciará la entrada del fluido, además se le indicará el caudal o flujo volumétricos de  $Q = 4.124 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$  se selecciona la cara por donde comenzará a pasar el fluido.

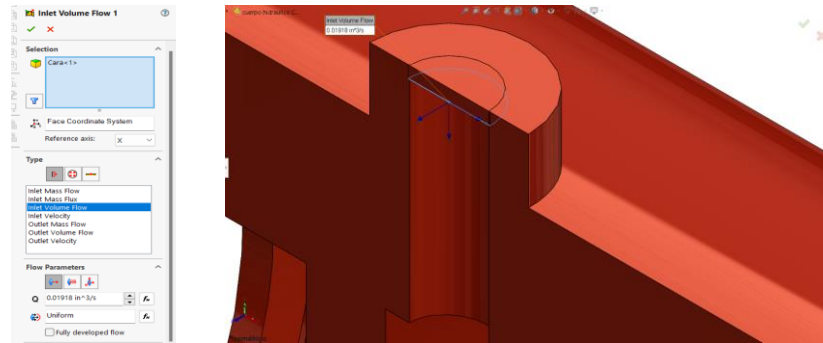


Fig. 14. Definición de entrada o Inlet de fluido en cuerpo hidráulico.

### Salida u Outlet

En la salida de fluido u outlet se realiza similar al paso anterior, pero con la diferencia que se usara otro parámetro de condición de flujo, dicha condición a usar es la presión, la cual será la misma que se utiliza en el análisis estático. Se realizarán dos análisis, primero con  $1.034 \times 10^8 \text{ Pa}$  y otro de  $3.103 \times 10^7 \text{ Pa}$ . Entonces se selecciona la cara por donde se tendrá la salida del fluido a las presiones mencionadas.

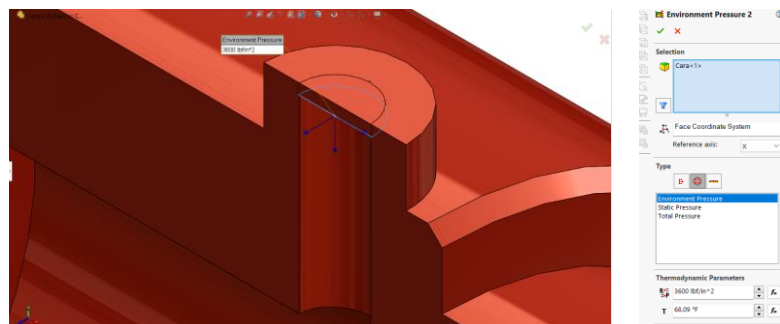


Fig. 15. Definición de salida u outlet de fluido en cuerpo hidráulico.

### Superficies solidas o Real Wall

En esta última sección se le indica cuáles serán las superficies solidas del componente a utilizar, con esto se le indican los límites de Frontera. Igualmente, que los pasos anteriores se le debe indicar cuáles serán las caras que fungirán para dicha acción, y los parámetros se le dejan por default como lo muestra el asistente de análisis.

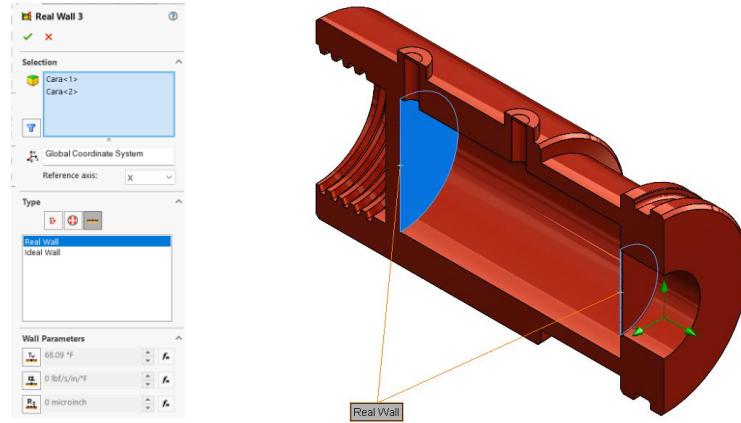


Fig. 16. Definición de superficies solidas o Real Wall en cuerpo hidráulico.

### Ejecución de análisis

Ya que se tiene todos los parámetros definidos para la entrada, salida y superficies solidas se procede a ejecutar en análisis de fluidos.

## III. RESULTADOS

El dispositivo cortador de cable de registro consta de 11 componentes mecánicos, cada uno diseñado para contribuir a la eficiencia y rendimiento del dispositivo. Una característica destacada es la cuchilla independiente del pistón. El dispositivo utiliza un sistema de accionamiento hidráulico, conocido por su fiabilidad y capacidad para generar una gran cantidad de fuerza. Este sistema es ideal para la tarea de cortar cables de registro, proporcionando la presión necesaria para realizar cortes precisos y pesa 25.28 kg y tiene unas dimensiones de 322×254×127 mm una vez ensamblado. Estas dimensiones y peso permiten que el dispositivo sea robusto y duradero, a la vez que es lo suficientemente compacto para su uso en el campo.

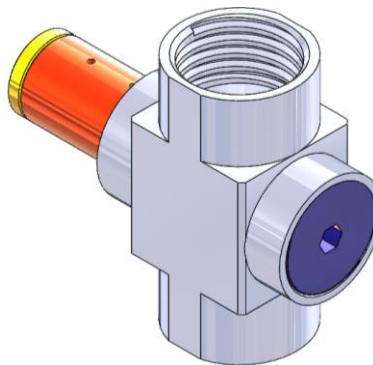


Fig. 17. Diseño propuesto de cable de registro.

A) Ecuaciones matemáticas para validación del análisis estático

Los resultados que se describirán a continuación en los resultados de análisis estáticos han sido validados utilizando las Ecuaciones 1, 2 y 3, junto con los valores definidos en la Tabla 1 y las definiciones de la presión aplicada presentadas en la Fig. 10 y Fig. 11. A partir de los datos recopilados y aplicando las ecuaciones correspondientes, se valida la precisión de los resultados obtenidos para el esfuerzo de Von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad.

Para calcular el esfuerzo de Von Mises.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{VM}$  es el esfuerzo de Von Mises.  
 $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales.

Para calcular los desplazamientos:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{L} \quad (2)$$

Donde:

$\delta$  es el desplazamiento.  
 $\varepsilon$  es la deformación.  
 $L$  es la longitud para analizar.

Y para el factor calcular el factor de seguridad:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}} \quad (3)$$

Donde

$FS$  es el factor de seguridad.  
 $\sigma_y$  es el límite elástico del material  
 $\sigma_{VM}$  es el esfuerzo de Von Mises.

B) Resultados de análisis estático

Se realizan dos análisis para cada uno de los componentes mencionados, para el cuerpo del dispositivo se le aplicará una presión de  $6.895 \times 10^7$  Pa y  $1.034 \times 10^8$  Pa y para el cuerpo hidráulico se le aplica  $2.068 \times 10^7$  Pa y  $3.103 \times 10^7$  Pa.

a) Presiones hidráulicas máximas de operación

Los valores obtenidos en los dos análisis estáticos para las presiones máximas de operación se describen en los gráficos mostrados en la Fig. 18, indicando que para los esfuerzos de Von Mises para el cuerpo del dispositivo se tiene un esfuerzo máximo de **339,378,688 Pa** que es inferior al límite elástico del componente con un valor de 750,000,000 Pa y para el cuerpo del dispositivo su esfuerzo máximo es de **171,346,432 Pa** que es inferior a su límite elástico del componente con un valor de 750,000,000 Pa.

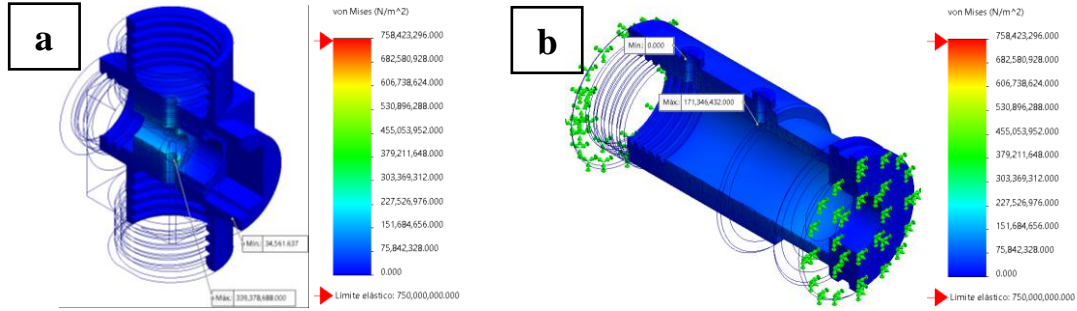


Fig. 18. Von Mises para presión máxima de operación: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

Para los desplazamientos en el cuerpo del dispositivo se tiene un valor de **0.009 mm** para el cuerpo hidráulico se tienen valores igualmente de **0.012 mm**, indicando que para ambos casos no tendrá desplazamientos con la presión máxima de trabajo indicados en la Fig. 19.

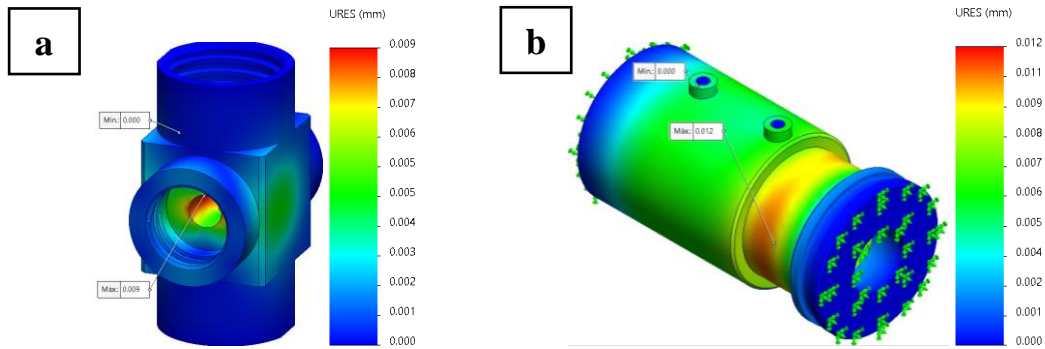


Fig. 19. Desplazamientos para presión máxima de operación: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

Por último, el factor de seguridad en el cuerpo del dispositivo tiene un valor de **2.21** y el cuerpo hidráulico **4.38** denotando que ambos componentes son aceptables para su implementación en la industria (véase Fig. 20).

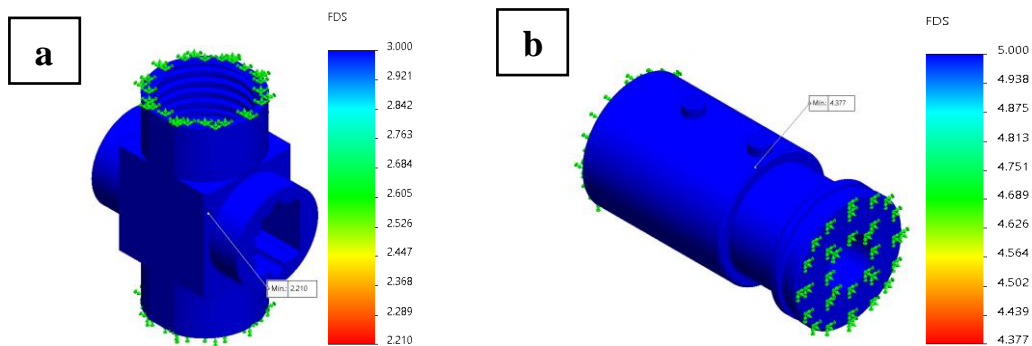


Fig. 20. Factor de seguridad para presión máxima de operación: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

b) Presiones hidráulicas de prueba hidrostática

Los valores obtenidos en los dos análisis estáticos para las pruebas hidrostáticas se describen en los gráficos mostrados en la Fig. 21, indicando que para los esfuerzos de Von Mises para el cuerpo del dispositivo se tiene un esfuerzo máximo de **475,130,208 Pa** que es inferior al límite elástico del componente con un valor de 750,000,000 Pa y para el cuerpo del dispositivo su esfuerzo máximo es de **257,019,664 Pa** que es inferior a su límite elástico del componente con un valor de 750,000,000 Pa.

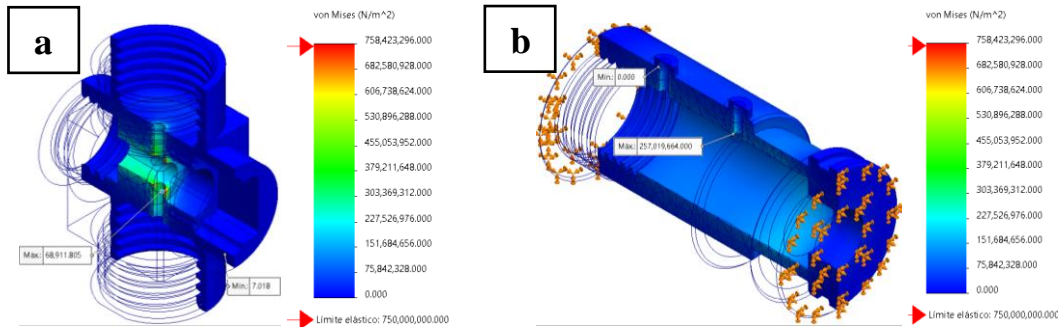


Fig. 21. Esfuerzos de Von Mises para presiones de prueba hidrostática: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

Para los desplazamientos en el cuerpo del dispositivo se tienen un valor de **0.013 mm** y para el cuerpo hidráulico se tienen valores de **0.018 mm** (véase Fig. 22), indicando que para el caso del cuerpo del dispositivo no tendrá desplazamientos considerables y para el caso del cuerpo hidráulico tendrá desplazamientos mínimos.

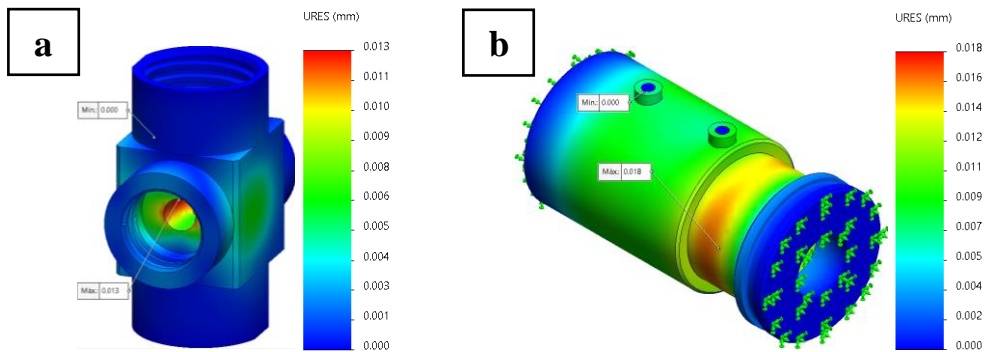


Fig. 22. Desplazamientos para presiones de prueba hidrostática: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

Por último, el factor de seguridad en el cuerpo del dispositivo tiene un valor de **1.50** y el cuerpo hidráulico **2.92** mostrados en la Fig. 23. Verificando con estos resultados que los componentes resistirán la prueba hidrostática.



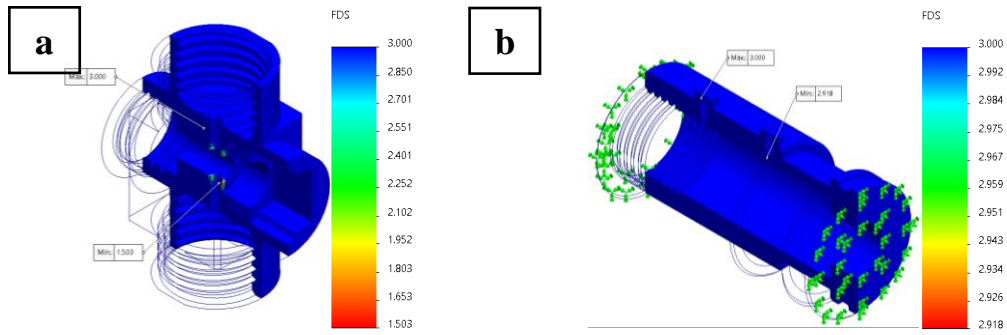


Fig. 23. Factor de seguridad para presiones de prueba hidrostática: a) cuerpo de dispositivo, b) cuerpo hidráulico.

C) Resultados de análisis de fluidos

Una vez que se realizó el análisis de fluidos, se muestran los resultados de este, con ellos se puede comenzar a interpretar los datos obtenidos, estos vendrán indicados por las líneas de flujo, mostrando el tipo de comportamiento que tengan indicando si se tendrán turbulencias o vórtices dentro del componente analizado, si tendrá incremento de presión y mostrara además un gráfico en la cual se observa el valor que se quiera conocer la unidad de dicho valor.

En este análisis también se toma a consideración la norma API Spect 6A, y al igual que en el análisis estático se realizarán dos análisis el primero será con la presión de operación de  $2.068 \times 10^7$  Pa y el segundo será a 1.5 veces la presión de trabajo, es decir,  $3.103 \times 10^7$  Pa simulando la prueba hidrostática, para asegurar que el componente sea adecuado para su funcionamiento.

a) Análisis de fluido a  $2.068 \times 10^7$  Pa

En esta prueba se utiliza la presión de operación, en esta se muestra el flujo del aceite en el cual no se tiene pérdida de presión denotado por las líneas verdes y por los valores indicados en el gráfico que se encuentran en un rango de  $2.07 \times 10^7$ , además que se tiene una mayor concentración del fluido en la salida del componente como se observa en la Fig. 24-a. Por otro lado, se percibe que la velocidad se mantiene constante en toda su trayectoria en el interior del componente denotado igualmente por las líneas de flujo y por los valores indicados en el gráfico, estos valores de la velocidad están en un rango de 0 a 0.072 m/s mostrado en la Fig. 24-b.

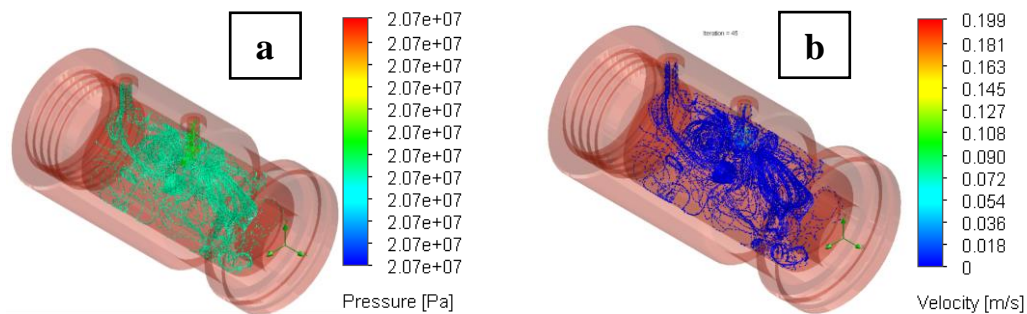


Fig. 24. Resultados de análisis de fluidos a  $2.068 \times 10^7$  Pa: a) Presión de fluido en cuerpo hidráulico, b) Velocidad del fluido en cuerpo hidráulico.

b) Análisis de fluido a  $3.103 \times 10^7$  Pa

En esta prueba se utiliza la presión máxima de trabajo con la cual se simula la prueba hidrostática, igualmente en esta prueba se puede apreciar que el flujo del aceite no tiene pérdida de presión denotado por las líneas verdes y por los valores indicados en el gráfico que rondan en un valor de  $3.10 \times 10^7$  Pa (véase Fig. 25-a). Y por parte de la velocidad se aprecia que también se mantiene constante en su trayectoria en el interior del componente con la diferencia de que ahora ha aumentado su velocidad, esto indicado por las líneas de flujo y por el gráfico mostrando unos valores en un rango de 0 a 0.051 m/s como se muestra en Fig. 25-b.

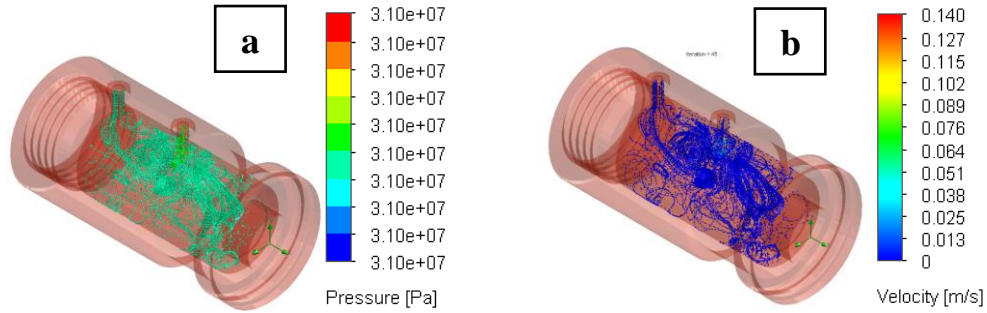


Fig. 25. Resultados de análisis de fluidos a  $3.103 \times 10^7$  Pa: a) Presión de fluido en cuerpo hidráulico, b) Velocidad del fluido en cuerpo hidráulico.

#### IV. DISCUSIÓN

Con base a los resultados obtenidos a través de los análisis realizados, se puede concluir que el diseño propuesto para el dispositivo cortador de cable de registro ha demostrado un rendimiento satisfactorio. Los análisis estáticos realizados no sobrepasaron los esfuerzos de Von Mises, lo que indica que el dispositivo es capaz de soportar las presiones máximas aplicadas de  $1.034 \times 10^8$  Pa y  $3.103 \times 10^7$  Pa sin experimentar una deformación plástica significativa. Además, no se observaron desplazamientos considerables mostrando valores en el cuerpo de dispositivo de 0.013 mm y en el cuerpo hidráulico de 0.018 mm, lo que sugiere que el dispositivo mantendrá su integridad estructural bajo las condiciones de operación previstas. Además de que ambos componentes cuerpo del dispositivo y cuerpo hidráulico tuvieron factores de seguridad de 1.50 y 2.92 respectivamente, dentro del rango de aceptación para su fabricación.

Los análisis de fluidos también arrojaron resultados favorables tanto en presiones de trabajo como en la velocidad del fluido, lo que indica que el dispositivo puede funcionar eficientemente en el entorno de fluidos en el que se espera que opere. Esto es especialmente relevante en la industria petrolera, donde los dispositivos frecuentemente deben funcionar en condiciones de alta presión.

La industria petrolera se beneficia significativamente con el nuevo diseño del dispositivo cortador de cable de registro en varios aspectos clave. En primer lugar, al ser un dispositivo nacional, se elimina la dependencia de tecnología extranjera, lo que fortalece la capacidad local y fomenta la economía nacional.

El diseño innovador del mecanismo de corte, que opera de manera independiente del pistón, simplifica el mantenimiento al eliminar la necesidad de reajustes manuales tras cada uso. Esto reduce el tiempo de inactividad, permitiendo a los operadores aumentar la productividad en el campo. Además, el sistema hidráulico de doble efecto facilita el retorno automático del mecanismo de corte a su posición inicial, lo que mejora aún más la eficiencia operativa.

Las conexiones rápidas permiten una integración sencilla con equipos existentes, acelerando su implementación en operaciones. Su capacidad para operar bajo altas presiones y velocidades de fluido asegura un rendimiento confiable en condiciones exigentes, lo cual es crucial en la industria.

Desde una perspectiva de costos, el diseño ofrece una solución más económica al reducir los gastos en adquisición, mantenimiento y refacciones, lo que resulta en un impacto positivo en el presupuesto operativo de las empresas.

## V. CONCLUSIONES

Se presentó el diseño funcional y ajustado a las especificaciones requeridas de un dispositivo cortador de cable de registro de carácter nacional para la industria petrolera. Este diseño no solo es innovador, sino que también cumple con las especificaciones de la norma API Spect 6A. Se realizó análisis estático y de fluidos para validar el rendimiento del dispositivo.

El análisis estático reveló los componentes críticos del dispositivo. El cuerpo del dispositivo exhibió un esfuerzo de Von Mises de 339,378,688 Pa bajo la presión máxima de trabajo y 475,130,208 Pa durante la prueba de presión hidrostática. En contraste, el cuerpo hidráulico registró esfuerzos de Von Mises de 171,346,432 Pa y 257,019,664 Pa para las mismas condiciones, respectivamente. En términos de desplazamientos, el cuerpo del dispositivo alcanzó valores de 0.009 mm y 0.013 mm para la presión máxima de trabajo y la prueba de presión hidrostática, respectivamente. El cuerpo hidráulico, por otro lado, registró valores de 0.012 mm y 0.018 mm en las mismas condiciones. El factor de seguridad del cuerpo del dispositivo mostró valores de 2.21 y 1.50 para la presión máxima de trabajo y la prueba de presión hidrostática, respectivamente. El cuerpo hidráulico, en cambio, indicó valores de 4.64 y 2.92 bajo las mismas condiciones. El análisis de fluidos se centró exclusivamente en el cuerpo hidráulico. Se simuló la presión máxima de trabajo y la prueba de presión hidrostática, obteniendo valores de presión y velocidad del fluido dentro del componente. Para la presión máxima de trabajo, se obtuvieron valores de presión de  $2.07 \times 10^7$  Pa y una velocidad del fluido de 0 a 0.072 m/s. Para la prueba de presión hidrostática, se registraron valores de presión de  $3.10 \times 10^7$  Pa y una velocidad del fluido de 0 a 0.051 m/s. Estos resultados validan el rendimiento del dispositivo y corroboran su eficiencia y cumplimiento con la norma establecida. Este trabajo contribuye a la industria petrolera al proporcionar una solución eficiente y conforme a la norma para el corte de cable de registro. Además, los métodos de análisis empleados podrían aplicarse a otros dispositivos similares, ampliando aún más el alcance de la contribución. El diseño propuesto para el dispositivo cortador de cable de registro se destaca por su enfoque innovador y sostenible, orientado a satisfacer las necesidades específicas de la industria petrolera. En primer lugar, al ser un dispositivo completamente nacional, se elimina la dependencia de tecnología extranjera, fortaleciendo así la capacidad tecnológica local y fomentando la economía nacional.

Una de las características más innovadoras del dispositivo es su mecanismo de corte de tipo cizalla, que opera de manera independiente del pistón de accionamiento. Esta independencia no solo simplifica el mantenimiento, sino que también mejora la eficiencia operativa, ya que elimina la necesidad de reajustes manuales después de cada uso. Esto se traduce en menos tiempo de inactividad y una mayor productividad en el campo.

Además, el diseño incorpora un sistema hidráulico de doble efecto que permite que el mecanismo de corte regrese automáticamente a su posición inicial tras su uso. Esta característica es fundamental, ya que reduce el tiempo que los operadores deben invertir en ajustes, lo que a su vez mejora la fluidez de las operaciones.

El dispositivo está equipado con conexiones rápidas de 6.350 mm NPT, lo que facilita su integración con equipos existentes en la industria. Esta adaptabilidad permite una implementación más ágil, lo que es crucial en un entorno donde la eficiencia y la rapidez son vitales.

La capacidad del dispositivo para operar bajo condiciones de alta presión y con velocidades de fluido elevadas es otro de sus puntos fuertes, asegurando su rendimiento en el entorno exigente de la industria petrolera. Además, se ha prestado especial atención a la seguridad, con factores de seguridad adecuadamente incorporados en su diseño, lo que garantiza que los operadores puedan trabajar con confianza y tranquilidad.

Por último, el diseño no solo promete un rendimiento técnico superior, sino que también presenta un impacto económico positivo. Al reducir los costos asociados con la adquisición, el mantenimiento y las refacciones, el dispositivo ofrece una solución más accesible y viable para las empresas, transformando así la economía de las operaciones en la industria petrolera.

En conjunto, estas innovaciones hacen del diseño propuesto una solución integral que no solo mejora la eficiencia y la seguridad, sino que también contribuye al desarrollo sostenible de la industria petrolera.

## VI. RECOMENDACIONES

Para trabajos de investigación futuros y mejoras en el diseño del dispositivo cortador de cable de registro se sugiere realizar los siguientes puntos:

- 1) Investigación en Materiales Avanzados: Explorar el uso de materiales compuestos o aleaciones de alta resistencia que puedan mejorar aún más la durabilidad y la resistencia a la corrosión del dispositivo. Esto puede aumentar su vida útil y reducir la necesidad de mantenimiento.
- 2) Optimización del Diseño Hidráulico: Realizar estudios adicionales para optimizar el sistema hidráulico del dispositivo. Esto podría incluir simulaciones de flujo para mejorar la eficiencia del mecanismo de corte y minimizar el consumo de energía.
- 3) Desarrollo de Sensores Integrados: Considerar la incorporación de sensores de presión en el diseño. Estos sensores pueden proporcionar datos en tiempo real sobre las condiciones operativas, permitiendo un ajuste dinámico del dispositivo para maximizar su rendimiento y seguridad.
- 4) Pruebas en Condiciones Reales: Llevar a cabo pruebas de campo en condiciones reales de operación para validar el rendimiento del dispositivo. Esto ayudará a identificar áreas de mejora que podrían no ser evidentes en análisis de laboratorio.
- 5) Capacitación y Manuales de Uso: Desarrollar programas de capacitación y manuales detallados para los operadores. Esto asegurará que el personal esté bien preparado para utilizar el dispositivo de manera segura y eficiente, maximizando su potencial.
- 6) Investigación en Eficiencia Energética: Investigar formas de hacer el dispositivo más eficiente energéticamente. Esto podría incluir el uso de sistemas de control más avanzados que optimicen el consumo de energía durante la operación.
- 7) Evaluación de Costos a Largo Plazo: Realizar estudios económicos que evalúen el costo total de propiedad del dispositivo a lo largo de su vida útil en comparación con métodos tradicionales. Esto proporcionará una perspectiva más clara de los beneficios económicos en un horizonte temporal más amplio.
- 8) Feedback de Usuarios y Mejoras Iterativas: Establecer un canal de comunicación con los usuarios finales para obtener retroalimentación sobre el rendimiento del dispositivo en el campo. Esta información puede ser valiosa para realizar mejoras iterativas en el diseño.

## REFERENCIAS

- [1] A. de La Vega Navarro, “La industria petrolera mexicana en el marco de las tendencias globales del cambio institucional, organizacional y tecnológico,” Unam.mx. [Online], 2024. Available: <https://www.depfe.unam.mx/p-cientifica/coloquio-erdal/06BAngdelavegaLt.pdf> [Accessed: 09-Sep-2024].
- [2] Y. Reyes., “plataformas petrolíferas: Innovaciones y desafíos extremos,” Inspenet, 29 Apr. 2023.
- [3] M. Rodríguez., “Técnicas de Perforación Actuales en la Extracción Petrolera,” Inspenet, 10 Apr. 2024.
- [4] P. Punto, “Nuevas Tecnologías en la Extracción de Petróleo: Un Vistazo al Futuro,” Medium, 04 Mar. 2024. [Online]. Available: <https://medium.com/@petropunto/nuevas-tecnolog%C3%ADas-en-la-extracci%C3%B3n-de-petr%C3%B3leo-un-vistazo-al-futuro-33ca04e86eb8> [Accessed: 27-Ago-2024].
- [5] Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment ISO 10423:2009 (Modified), Petroleum and natural gas industries-Drilling and production equipment-Wellhead and christmas tree equipment”. 2010.
- [6] Huntingplc.com. [Online], 2024. Available: <https://media.huntingplc.com/products-and-services/well-intervention-equipment/pressure-control-equipment/wireline-pressure-control-equipment/hunting-hydraulic-grease-head-cable-cutter-datasheet.pdf> [Accessed: 27-Ago-2024].
- [7] Nov.com. [Online], 2024. Available: <https://www.nov.com/-/media/nov/files/brands/elmar/elmar-product-catalog.pdf>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [8] Phueloiltools.com. [Online], 2024. Available: <https://phueloiltools.com/datasheets/Phuel-Oil-Tools-PCE-Catalogue.pdf>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [9] Phueloiltools.com. [Online], 2024. Available: <https://phueloiltools.com/datasheets/Phuel-Cable-Cutter.pdf>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [10] P. M. V. Huertas, “Evaluación de los riesgos ambientales originados en pozos petroleros: con énfasis en aguas subterráneas y superficiales,” Edu.co. [Online], 2024. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7135/1/374788-2018-I-GA.pdf> [Accessed: 27-Ago-2024].
- [11] “Cable Cutter Sub,” WINCENT. [Online], 2024. Available: <https://win-cent.com/products/cable-cutter-sub/>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [12] “4140 (T y R),” Serviacerero. [Online], 2024. Available: <https://www.serviacero.com/especiales/aceros-baja-aleacion-grado-maquinaria/4140-t-y-r/>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [13] Serviacerero.com. [Online], 2024. Available: <https://www.serviacero.com/wp-content/uploads/2024/03/AISI-4140.pdf> [Accessed: 27-Ago-2024].
- [14] J. Arias, M. Cabeza, G. Castro, I. Feijoo, P. Merino, and G. Pena, “Modificación de los aceros rápidos de herramientas AISI M2 por fusión superficial con láser bajo diferentes condiciones de operación,” *Rev. Metal.*, vol. 46, no. 3, pp. 206–218, 2010.
- [15] Serviacerero.com. [Online], 2024. Available: <https://serviacero.com/wp-content/uploads/2024/03/AISI-M2.pdf>. [Accessed: 27-Ago-2024].
- [16] “SolidWorks,” Dassault Systèmes, 23-Jan-2023. [Online], 2024. Available: <https://www.3ds.com/products/solidworks> [Accessed: 10-Sep-2024].
- [17] Api Sl, “Niveles de calidad,” Repsol.com. [Online], 2024. Available: [https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/productos-y-servicios/lubricantes-documentos/rp\\_performance\\_20w50\\_tcm13-189319.pdf](https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/productos-y-servicios/lubricantes-documentos/rp_performance_20w50_tcm13-189319.pdf) [Accessed: 27-Ago-2024].
- [18] “P80,” Enerpac.com. [Online], 2024. Available: <https://www.enerpac.com/es/bombas-manuales-de-acero/bomba-manual-dos-velocidades/P80> [Accessed: 27-Ago-2024].

## Aprendizaje de conceptos básicos de electrónica: estrategia tecnopedagógica y aplicación de una prueba objetiva

Learning basic concepts of electronics: techno-pedagogical strategy and application of an objective test

Caroleny Eloiza Villalba Hernández<sup>1</sup>, Daniel Mocencahua Mora<sup>2</sup>, Luis Abraham Sánchez Gaspariano<sup>3</sup>

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, MÉXICO

<sup>1</sup> orcid: 0000-0002-2639-3733 | carolenyeloiza.villalbahernandez@viep.com.mx

<sup>2</sup> orcid: 0000-0003-4718-7442 | daniel.mocencahuamora@viep.com.mx

<sup>3</sup> orcid: 0000-0002-3899-0746 | luis.sanchezgaspariano@viep.com.mx

Recibido 02-09-2024, aceptado 18-10-2024.

### Resumen

Este artículo presenta las distintas fases de una estrategia tecnopedagógica y la aplicación de una prueba objetiva centrada en el aprendizaje de conceptos básicos de electrónica para estudiantes de ingeniería en una institución pública de educación superior. La investigación se centró en un enfoque cuantitativo y se basó en una propuesta didáctica apoyada en el modelo ADDIE (análisis, diseño, desarrollo, implementación, evaluación). Se aplicó una prueba objetiva de selección simple. Se trabajó con un pretest y postest aplicado a dos grupos control y experimental. Los resultados muestran una mejora notable en las calificaciones de los estudiantes lo que subraya la efectividad de la estrategia tecnopedagógica en fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje en contextos de educación superior. En conclusión, este estudio aporta a la comunidad interesada en la educación en ingeniería, ya que detalla las etapas de un diseño instruccional específico para esta área, centrado en tres procesos cognitivos por sus siglas FOS (fijo mi atención, organizo mis conceptos, simulo y aprendo).

**Palabras clave:** estrategia tecnopedagógica, prueba objetiva, aprendizaje de conceptos, contenidos conceptuales, educación en ingeniería.

### Abstract

This article presents the different phases of a technopedagogical strategy and the application of an objective test focused on the learning of basic concepts of electronics for engineering students in a public institution of higher education. The research focused on a quantitative approach and was based on a didactic proposal supported by the ADDIE model (analysis, design, development, implementation, evaluation). An objective test of simple selection was applied. A pre-test and post-test were applied to two control and experimental groups. The results show a notable improvement in students' grades, which underscores the effectiveness of the technopedagogical strategy in strengthening the teaching-learning process in higher education contexts. In conclusion, this study contributes to the community interested in engineering education, since it details the stages of a specific instructional design for this area, focused on three cognitive processes by their acronym F.O.S (I fix my attention, I organize my concepts, I simulate and I learn).

**Index terms:** technopedagogical strategy, objective test, concept learning, conceptual content, engineering education.



## I. INTRODUCCIÓN

El abordaje de los contenidos conceptuales en este estudio surge, considerando que estos constituyen la base teórica sobre la cual se desarrollan las habilidades prácticas y técnicas de los ingenieros. Estos contenidos permiten a los estudiantes comprender los principios y fundamentos que rigen las diferentes áreas de la ingeniería, desde las matemáticas y la física hasta la química y la mecánica. Al dominar estos conceptos, los ingenieros pueden analizar problemas de manera crítica, diseñar soluciones innovadoras y aplicar los conocimientos de manera efectiva en situaciones reales. Además, los contenidos conceptuales facilitan la capacidad de adaptación a nuevas tecnologías y métodos, ya que proporcionan una comprensión profunda de los fundamentos que subyacen a los avances tecnológicos.

En este sentido, al hablar de avances tecnológicos en un contexto educativo es importante atender a las competencias digitales como ese conjunto de habilidades que permiten el empleo de la tecnología en las aulas. Los docentes desempeñan un rol crucial en la preparación de los estudiantes en entornos digitales, razón por la cual es importante se desarrollen profesionalmente en esta área con el propósito de utilizar efectivamente las herramientas digitales en su práctica docente y pueda existir un avance significativo en el aprendizaje de los estudiantes [1].

De acuerdo con lo expuesto, este trabajo abona al ámbito tecnológico en educación superior dado que, presenta el diseño instruccional de una estrategia tecnopedagógica, orientada en mejorar el desempeño académico en contenidos conceptuales básicos de electrónica en estudiantes de ingeniería. Este trabajo atiende a la necesidad de la incorporación de competencias digitales en Educación Superior, no solo en términos de elaboración de material didáctico y empleo de plataformas digitales sino también en lo que respecta a llevar a cabo investigaciones que aborden la capacitación de los docentes en un mundo digitalmente dinámico [2].

En este estudio se comparte la fase de valoración de una estrategia tecnopedagógica, derivada de una investigación más extensa realizada en el marco de estudios doctorales. En este sentido, solo nos enfocaremos en presentar los resultados de la aplicación de una prueba objetiva de selección simple, comparando la media aritmética de las calificaciones de dos grupos, uno control y otro experimental después de la implementación de una estrategia tecnopedagógica, cuyo objetivo fue brindar al estudiante de la asignatura de Metrología Eléctrica e Instrumentación en Electrónica (MEIE) un espacio autogestivo para el aprendizaje de conceptos básicos de electrónica.

Este estudio constituye una valiosa contribución para la comunidad interesada en la educación en ingeniería, al describir las etapas de un diseño instruccional específico para esta área. Se centra en tres procesos cognitivos, conocidos por las siglas F.O.S (fijo mi atención, organizo mis conceptos, simulo y aprendo), y también aborda aspectos vinculados a las competencias digitales, lo que permite a los estudiantes utilizar esta herramienta tecnológica en su proceso de aprendizaje.

## II. ARTICULACIÓN TEÓRICO- CONCEPTUAL

El proceso para definir el marco teórico conceptual se inicia con la identificación de los objetivos del estudio, estos sirven como punto de partida para establecer los conceptos fundamentales, que en este caso son: la estrategia tecnopedagógica y la aplicación de una prueba de conocimiento. El primer término principal, la estrategia tecnopedagógica, abarca tres dimensiones: la tecnológica, la pedagógica y las prácticas de uso. Por otro lado, el segundo término principal, la prueba objetiva de contenidos de naturaleza conceptual la cual se enfoca específicamente en el área de ingeniería. A continuación, se establece la conceptualización que integra los elementos del tema de investigación:

### A. Estrategia tecnopedagógica

Se considera a la serie de planteamientos que se basan en tres dimensiones para su diseño:

- 1) *Dimensión tecnológica*: se relaciona con el potencial de los recursos informáticos.
- 2) *Dimensión psicopedagógica*, que se orienta hacia recursos de diseño instruccional en relación con las actividades para la enseñanza, el aprendizaje y la evaluación.
- 3) *Prácticas de uso*: se orientan hacia la aplicación real de tecnologías de información en contextos específicos [3].

3

Para fines de la investigación se realizó un ajuste a las definiciones que presentan los autores y como producto de los procesos de reflexión en el diseño y desarrollo de la estrategia tecnopedagógica para el área ingenieril se proponen las siguientes dimensiones: dimensión tecnológica, psicopedagógica e instruccional. En la figura 1 se pueden observar los elementos que conforman cada una de ellas.

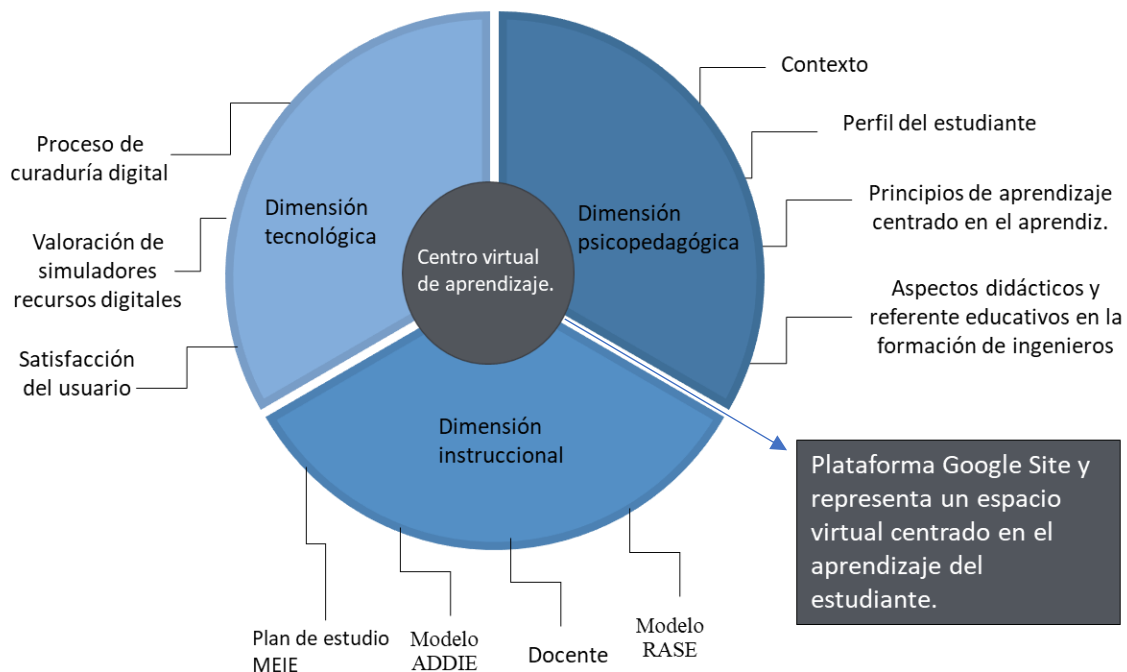


Fig. 1. Esquemático de la estrategia tecnopedagógica.

Ahora bien, la investigación se enfoca en el ámbito ingenieril específicamente en el área de la MEIE en semestres básicos de ingeniería. Dentro de la estrategia se incorporan recursos digitales que fueron seleccionados a partir de un proceso de curaduría digital y además se incorpora un recurso tecnológico mediador de aprendizaje como lo es un simulador denominado Tinkercad. Además, se atiende el modelo RASE que contempla el diseño e implementación de recursos, actividades y evaluación, los cuatro componentes del modelo (Recursos, Actividades, Soporte y Evaluación) los cuales deben integrarse a la práctica del docente [4].

- a) *Contenidos de aprendizaje*: son el conjunto de saberes relacionados con lo cultural, lo social, lo político, lo económico, lo científico, lo tecnológico, que conforman las distintas áreas académicas y asignaturas, cuya asimilación y apropiación por los alumnos es considerada esencial para su desarrollo

y socialización. Lo más importante es que los alumnos puedan construir significados y atribuir sentido a lo que aprenden [5].

- b) *Contenidos conceptuales*: es el saber qué y está vinculado a la competencia referida al conocimiento de datos (información, hechos, sucesos, acontecimientos) y conceptos [5].
- c) *Diferenciación conceptual*: se refiere a que el proceso de enseñanza debe fundamentarse en el aprendizaje de los conocimientos teóricos básicos [6].

Tomando en cuenta las perspectivas pedagógicas y tecnológicas que abonan a esta investigación se espera que la integración de la disciplina que se enseña, con la pedagogía y la tecnología permitan constituir una estrategia tecnopedagógica en el área de ingeniería que incida en el aprendizaje de conceptos básicos de electrónica, por lo que se trabajará con una prueba objetiva de naturaleza conceptual (véase anexo 1), para valorar la consolidación del aprendizaje.

### III. METODOLOGÍA

#### A. Diseño de investigación

El diseño de este estudio es cuantitativo dado que se observa la realidad objetiva y ordenada lógicamente [7] por lo que se recurrió a la estadística desde una perspectiva hipotético-deductiva, buscando la verificación de hipótesis mediante procesos estadísticos después de la aplicación de la prueba objetiva con la finalidad de valorar la consolidación de los contenidos conceptuales en los estudiantes de ingeniería. La hipótesis de este estudio corresponde a: el diseño de una estrategia tecnopedagógica mejora el desempeño académico en contenidos conceptuales básicos de electrónica en estudiantes de ingeniería. Las variables que se desprenden de la hipótesis son: (1) Variable independiente: estrategia tecnopedagógica y (2) Variable dependiente: desempeño académico de los estudiantes.

Es importante mencionar que la valoración del desempeño académico de los estudiantes se obtuvo a partir de la media de las calificaciones, una vez aplicada la prueba objetiva, ver anexo 1, comparando los resultados entre los dos grupos uno control y otro grupo experimental. Esta prueba fue de opción múltiple y se compone de un conjunto de declaraciones precisas que requieren por parte del alumno, una respuesta breve, en general limitadas a la elección de una opción ya proporcionada, fue de selección simple por presentar una sola respuesta correcta y una serie de distractores [8]. La prueba objetiva presentó 35 declaraciones vinculadas con: (1) Introducción a los sistemas de medida (2) Instrumentos de medición (3) Sensores y acondicionamiento de señal para sensores resistivos.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la preprueba y posprueba a ambos grupos (control y experimental) fueron analizados mediante:

1. *Prueba estadística t de Student*, al respecto Ñaupás [9] establece:  
Es también llamada Prueba de Diferencia de Medias es otra prueba muy usada para contrastar hipótesis. Cuando los investigadores adoptan estrategias de prueba de hipótesis como consecuencia de las cuales se obtienen dos promedios en cada uno de los grupos, ya sean estos experimental o de control, lo que deben hacer es determinar si la diferencia entre tales promedios hallados se debe a hechos fortuitos, o si tal diferencia se ha producido como efecto de la influencia de la variable independiente que se está estudiando (p. 314).
2. *Prueba de hipótesis*, de acuerdo con Ñaupás [9] es “someter a prueba las hipótesis consiste en recolectar datos de la realidad para disponer de evidencia empírica que confirme o contradiga la hipótesis planteada” (p. 285).

## B. Escenario

En este estudio participaron 64 estudiantes, de los cuales 11 eran mujeres y 53 hombres. Las edades promedio de los participantes se situaban entre los 19 y 21 años. La intervención se llevó a cabo en la asignatura de Metrología Eléctrica e Instrumentación Electrónica (MEIE) la cual está incorporada en el plan de estudios de las carreras de Ingeniería en Energías Renovables (IER), Ingeniería en Sistemas Automotrices (ISA) y Licenciatura en Ciencias de la Electrónica (LCE) de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de una universidad pública ubicada en el estado de Puebla. Las diferentes etapas del estudio se realizaron durante un periodo académico comprendido entre los años 2020-2023. La selección de la muestra se realizó mediante una técnica de muestreo no probabilístico intencional, puesto que los grupos se encontraban establecidos por secciones, se tomó el criterio de grupos conformados, al respecto Hurtado [10] argumenta lo siguiente “la muestra se escoge en términos de criterios establecidos por el investigador que de alguna manera sugiere que ciertas unidades son convenientes para acceder a la información que se requiere

## C. Diseño Instruccional de la Estrategia Tecnopedagógica

En esta sección se describen las etapas que se siguieron para el diagnóstico, diseño, desarrollo, implementación y finalmente la evaluación de un centro de aprendizaje en el área ingenieril, mediante la aplicación del modelo ADDIE (análisis, diseño, desarrollo, implementación, evaluación) [11], sus siglas representan los diferentes momentos que debe llevar a cabo un diseñador instruccional al momento de realizar una propuesta didáctica.

A continuación, se describen cada una de las etapas seguidas en el diseño instruccional aplicadas en este estudio, con el propósito de crear una estrategia tecnopedagógica, que corresponde a un centro virtual de aprendizaje para estudiantes de los primeros semestres de ingeniería, enfocada en el aprendizaje de contenidos conceptuales.

1. *Análisis*: la primera etapa del diseño instruccional fue el análisis, durante el cual se elaboró una matriz para identificar las necesidades académicas, específicamente para la asignatura de MEIE. Esta matriz facilitó la identificación de las necesidades formativas del grupo objetivo. Además, se realizó una exploración inicial desde la perspectiva tanto de los docentes como de los estudiantes, considerando las necesidades específicas de la asignatura relacionadas a aspectos tecnológicos y pedagógicos.
2. *Diseño*: para esta etapa se definieron los objetivos de aprendizaje alineados al plan de estudios y ejes transversales de la asignatura, se establecieron las unidades temáticas y se trabajó en el proceso de planeación con el modelo RASE [2] vinculando el aspecto tecnológico y lo pedagógico, por lo tanto, se logró diseñar una secuencia didáctica que presentó elementos como: recursos, actividades, soporte y evaluación. Asimismo, como se muestra en la figura 2, se diseñaron tres macroactividades para cada módulo, denominadas F.O.S (fijo mi atención, organizo mis conceptos, simulo y aprendo), con el objetivo de alcanzar los siguientes procesos cognitivos: atención sostenida, codificación semántica y recuperación de lo aprendido.



Fig. 2. Constitución de las macroactividades.

3. *Desarrollo*: para esta fase se seleccionaron los recursos digitales a partir de un proceso de curación digital de contenidos siguiendo los procesos de colección, categorización, crítica, conceptualización y

circulación [12] (véase figura 3). Una vez realizado este proceso de curación de contenidos los materiales de aprendizaje se ubicaron por módulos de acuerdo a las unidades temáticas de la asignatura como se muestra en la figura 4.

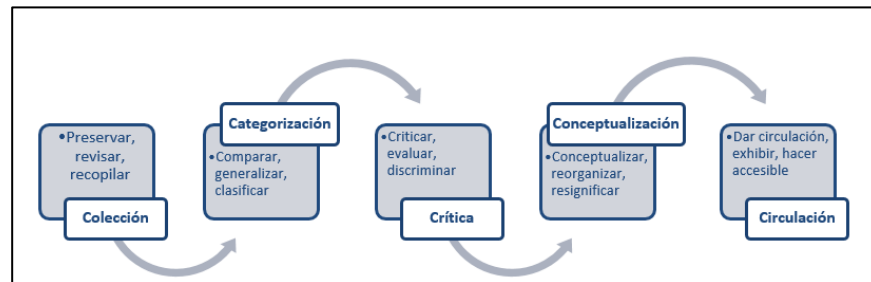


Fig 3. Proceso de las 5 Cs de la curación digital [12].

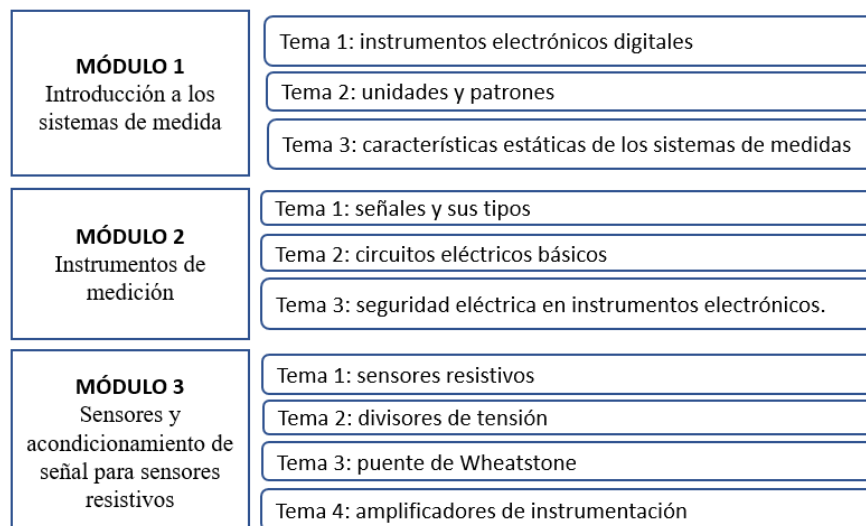


Fig. 4. Módulos y temas de la estrategia tecnopedagógica.

4. *Implementación:* para esta fase de implementación se comprobó que el diseño del curso fuese efectivo y además fue una oportunidad para realizar mejoras inmediatas antes de pasar a la fase de evaluación. Con el propósito de mediar la satisfacción del usuario frente a la estrategia tecnopedagógica se aplicó un cuestionario de usabilidad de sistemas informáticos (CSUQ) [13].

El proceso completo de la implementación tuvo una duración de 4 semanas, organizándose cada etapa de la secuencia instruccional y su temporalidad de la siguiente forma:

- a) *Gestión de la estrategia tecnopedagógica,* esta se realizó en una primera sesión, en donde se presentó la estrategia tecnopedagógica a los docentes y estudiantes de la asignatura de MEIE, explicando el propósito del estudio y revisando el consentimiento informado (ver anexo 2) esta etapa tuvo una duración de 45 minutos.

b) *Implementación de la estrategia tecnopedagógica*, se llevó a cabo en 3 sesiones, consistiendo cada una en una hora presencial y una hora y media de trabajo autogestivo, con un día asignado por semana.

Esto representa un tiempo total de intervención, considerando todas las etapas, de 8 horas con 15 minutos.

5. *Evaluación*: en esta etapa final se realizó un Focus Group con la finalidad de observar la participación de los estudiantes y la efectividad del proceso de enseñanza y aprendizaje a través de la estrategia tecnopedagógica. Esto implicó la recolección de datos cualitativos que permitieron realizar ajustes inmediatos y mejorar la calidad del material, la metodología instruccional e identificar áreas de mejora. Sin embargo, los resultados de la fase 4 y 5 no se incluyen en este trabajo debido a la naturaleza del propósito del estudio.

Asimismo, se aplicó una prueba objetiva, ver anexo 1, alineada a los módulos y temáticas indicados en la figura 4. Esta prueba objetiva permitió identificar el promedio de calificaciones de los estudiantes después de la implementación de la estrategia tecnopedagógica.

#### D. Índices de validez y fiabilidad

En este apartado se incorporan los índices de validez y fiabilidad de los datos presentados. En este sentido, es importante destacar que la validez es el “grado en que un instrumento de medida mide aquello que realmente pretende medir o sirve para el propósito para el que ha sido construido” (p.28) [14]. Para este estudio se tomó en cuenta la validez de contenido que hace referencia a si el instrumento elaborado, y los ítems seleccionados, representan lo que se busca medir y para ello se realizó el cálculo del coeficiente V de Aiken [15].

Por otro lado, la fiabilidad “es el grado en que un instrumento mide con precisión, sin error. Indica la condición del instrumento de ser fiable, es decir, de ser capaz de ofrecer en su empleo repetido resultados veraces y constantes en condiciones similares de medición” (p.28). Una de las formas de valorar la fiabilidad de un instrumento de medida es a través de la consistencia, esta se refiere al nivel en que los diferentes ítems o preguntas de una escala están relacionados entre sí [14], la consistencia puede ser comprobada a través del coeficiente de Küder-Richardson el cual es un método estadístico que debe implementarse cuando se aplica una prueba y los ítems presentan puntuaciones dicotómicas [16].

##### 1) Coeficiente V de Aiken

El cálculo de este coeficiente constituye una técnica para cuantificar la validez de contenido o relevancia del ítem respecto a un contenido evaluado en N jueces. El coeficiente V de Aiken asume valores de 0 a 1, siendo el valor 1 la máxima magnitud posible, que indica un perfecto acuerdo entre los jueces o expertos. Puede ser utilizado sobre las valoraciones de un conjunto de jueces con respecto a un ítem. Dichas valoraciones pueden ser dicotómica (valores de 0, 1 o si, no) o politómicas (valores de 0 a 5) [15].

Para fines del estudio se seleccionaron un número de cinco expertos en el área de electrónica, mecatrónica y física, con más de 5 años de experiencia en investigación, quienes revisaron la redacción, coherencia, lógica y secuencia de los ítems. Para el cálculo de este coeficiente se empleó la ecuación (1).

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{(n(c-1))} \quad (1)$$

donde  $s_i$  representa el valor asignado por el juez  $i$ ,  $n$  el número de jueces,  $c$  el número de valores de la escala de valoración y  $v$  coeficiente de Aiken. Estos valores ( $n = 5$ ,  $\sum_{i=1}^n s_i = 4.6$  y  $c = 2$ ) fueron obtenidos a partir de las valoraciones de un grupo de 5 jueces para cada ítem de la prueba objetiva. Al sustituir los valores, el



coeficiente V de Aiken arrojó fue de 0.92 lo que indica que el instrumento puede ser utilizado como técnica confiable para la recolección de datos.

## 2) Coeficiente de Küder-Richardson

Para fines del estudio, este coeficiente permitió verificar la fiabilidad de la prueba objetiva, para ello se contó con la participación de 23 estudiantes correspondiente a una sola sección de la asignatura de Metrología Eléctrica e Instrumentación en Electrónica (MEIE). “Esta fórmula sólo es aplicable en aquellos casos en que las respuestas a cada ítem son dicotómicas y pueden calificarse como 1 o 0 (correcto-incorreto, presente-ausente, a favor - en contra)” (p. 812) [10], y se presenta a continuación:

$$r_{tt} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{St^2 - \sum p \cdot q}{St^2} \quad (2)$$

donde  $r_{tt}$  representa el coeficiente de confiabilidad,  $k$  el número de ítems del instrumento,  $p$  el porcentaje de personas que responden correctamente cada ítem,  $q$  el porcentaje de personas que responden incorrectamente cada ítem,  $St^2$  la varianza total del instrumento. Estos valores estadísticos ( $k=35$ ,  $\sum p \cdot q = 5.77$  y  $St^2 = 18.52$ ) fueron obtenidos a partir de la implementación de la prueba objetiva y al sustituirlos en la ecuación 2 se obtuvo un coeficiente de 0.71, considerado de alta confiabilidad [17].

## IV. RESULTADOS

### A. Aplicación de la prueba de conocimiento al grupo control y experimental

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la prueba objetiva (véase anexo 1), para verificar el rendimiento académico en contenidos de naturaleza conceptual antes y después de la intervención, es decir de la implementación de la estrategia tecnopedagógica. En esta fase cuantitativa de la investigación se considera como variable independiente a la estrategia tecnopedagógica, la cual corresponde al centro virtual de aprendizaje; y la variable dependiente corresponde al desempeño académico en contenidos de naturaleza conceptual en los estudiantes de Metrología Eléctrica e Instrumentación e Electrónica. Ahora bien, las hipótesis sujetas a comprobación son:

$H_0$ : El diseño de una estrategia tecnopedagógica no mejora el desempeño académico de los conceptos básicos de electrónica en estudiantes de ingeniería.

$H_1$ : El diseño de una estrategia tecnopedagógica mejora el desempeño académico de los conceptos básicos de electrónica en estudiantes de ingeniería.

En este sentido, para realizar la comprobación de hipótesis fue requerido: (1) realizar el levantamiento y análisis de los datos obtenidos para la preprueba y postprueba de ambos grupos (control y experimental) y (2) una vez obtenidos los resultados de ambos grupos realizar la verificación de la normalidad de los datos. Finalmente efectuar la aplicación de la prueba t de Student para la comparación de las medias de las calificaciones. De acuerdo con lo expuesto y para dar cumplimiento al primer requerimiento vinculado al levantamiento y análisis de los datos se presentan a continuación los resultados del pretest y postest para ambos grupos de estudio.

### 1. Resultados de las calificaciones del Pretest y Postest

En esta sección se presentan los resultados de las calificaciones tanto del grupo control como del experimental antes y después de la implementación de la estrategia tecnopedagógica la cual abordó contenidos de naturaleza conceptual. De acuerdo con el número de respuestas correctas y para una escala del 1 al 10 se obtuvieron los siguientes resultados:

9  
TABLA 1  
CALIFICACIONES OBTENIDAS EN LOS GRUPOS CONTROL Y EXPERIMENTAL EN EL PRETEST Y POSTEST.

Sujetos	Pretest		Postest	
	Grupo control	Grupo experimental	Grupo control	Grupo experimental
1	6.6	6.9	8.6	7.1
2	8.3	4.3	8.6	8.6
3	4.3	6.3	6.6	8.9
4	7.7	7.1	5.7	8.0
5	6.9	6.3	5.1	7.4
6	5.4	7.4	7.4	8.0
7	5.1	3.4	5.4	6.3
8	5.7	4.6	2.9	8.6
9	5.7	5.4	6.9	7.7
10	5.7	5.4	6.6	8.6
11	5.7	6.3	6.6	7.7
12	6.0	6.6	5.7	5.7
13	5.7	3.7	6.3	7.7
14	6.6	7.1	6.6	7.1
15	8.0	3.1	5.7	6.0
16	6.3	5.7	5.7	7.7
17	4.0	6.9	6.9	8.0
18	6.3	7.4	5.7	7.7
19	5.1	6.0	6.3	7.1
20	6.3	6.3	7.7	7.1
21	6.3	3.7	6.0	8.0
22	7.1	7.1	6.6	4.0
23	4.3	7.1	8.0	8.3
24	7.4	5.7	7.1	6.3
25	6.6	5.7	6.0	5.4
26	5.7	5.1	6.6	6.3
27	6.3	4.6	6.3	4.6
28	6.6	6.0	4.9	6.3
29	5.7	4.6	7.1	6.9
30	6.3	5.7	7.7	6.3
31	6.6	5.7	6.0	5.7
32	5.4	5.4	6.3	6.6
<b>Calificaciones promedio</b>	6.12	5.71	6.42	7.05

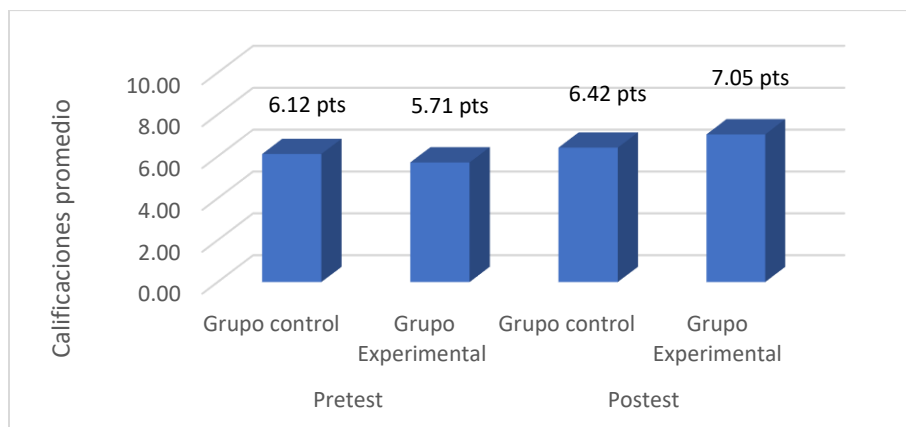


Fig. 5. Promedio de las calificaciones del pretest y posttest para grupo control y experimental.

En la figura 5 se presenta el promedio de las calificaciones de los estudiantes antes y después de implementar la estrategia tecnopedagógica. Durante la aplicación de la prueba objetiva antes de la intervención (pretest), los promedios de calificaciones de los grupos control y experimental eran casi idénticos. Sin embargo, tras aplicar la misma prueba después de la estrategia (posttest), se observan mejoras significativas en comparación con los resultados del pretest. Este hecho es relevante ya que evidencia un cambio en el rendimiento de los estudiantes después de la implementación de la estrategia tecnopedagógica, reflejado en el aumento del promedio de calificaciones, cumpliendo así con el objetivo de la propuesta para los estudiantes de los primeros semestres de ingeniería, centrada en el aprendizaje de contenidos conceptuales.

## 2. Resultados de la Prueba de normalidad

La aplicación de las pruebas de normalidad de los datos pretende garantizar la robustez de los análisis estadísticos. En este sentido, para realizar una comprobación de la hipótesis y tomar decisiones de cual prueba paramétrica o no paramétrica emplear es necesario primero verificar si los datos cumplen o no con una distribución normal, esta afirmación se respalda en [19] cuando indica que todos los test paramétricos requieren el cumplimiento de una distribución normal y la aplicación de test no paramétricos, a su vez, necesitan que las observaciones no procedan de una distribución normal.

En esta investigación se verificó el supuesto de normalidad aplicando la prueba de Shapiro- Wilk debido a que  $n \leq 50$  [18], este test se emplea para contrastar normalidad cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 observaciones. En este sentido, utilizando RStudio se realizó el contraste de las hipótesis para la prueba señalada anteriormente, considerando:

$H_0$ : Los datos siguen una distribución normal.

$H_1$ : Los datos no siguen una distribución normal.

Se empleó el método del valor P (valor p o valor de probabilidad) es la probabilidad de obtener un valor del estadístico de prueba que sea al menos tan extremo como el que representa a los datos muestrales, suponiendo que la hipótesis nula es verdadera. La hipótesis nula se rechaza si el valor P es muy pequeño, tanto como 0.05 o menos [19].

Por lo tanto,

Se acepta  $H_0$ , si  $p > (\alpha)$   
Se rechaza  $H_0$ , si  $p \leq (\alpha)$

Los valores de probabilidad aplicando la prueba de Shapiro- Wilk obtenidos con RStudio para un nivel de significación de  $\alpha=0,05$  para un intervalo de confianza al 95%, se muestran a continuación.

11

TABLA 2  
VALOR DE PROBABILIDAD APLICANDO LA PRUEBA DE SHAPIRO- WILK.

Pretest	
Grupos	p-value
Control	0.43
Experimental	0.08139
Postest	
Grupos	p-value
Control	0.06905
Experimental	0.1936

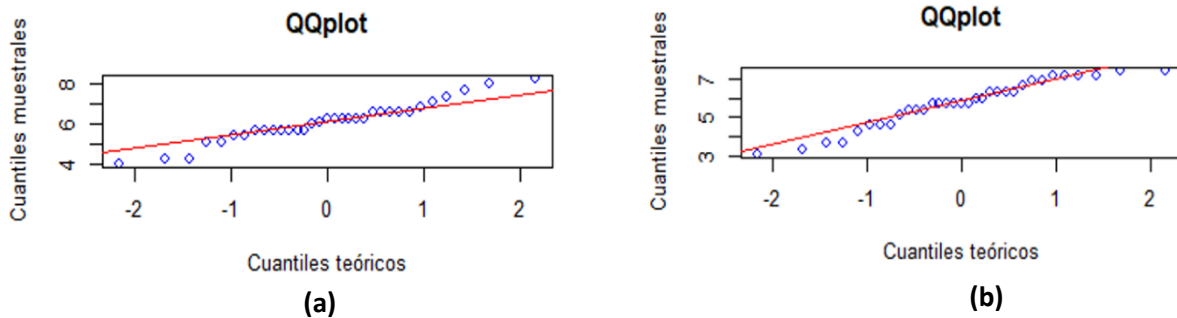


Fig. 6. Q-Q del pretest para (a) grupo control y (b) grupo experimental.

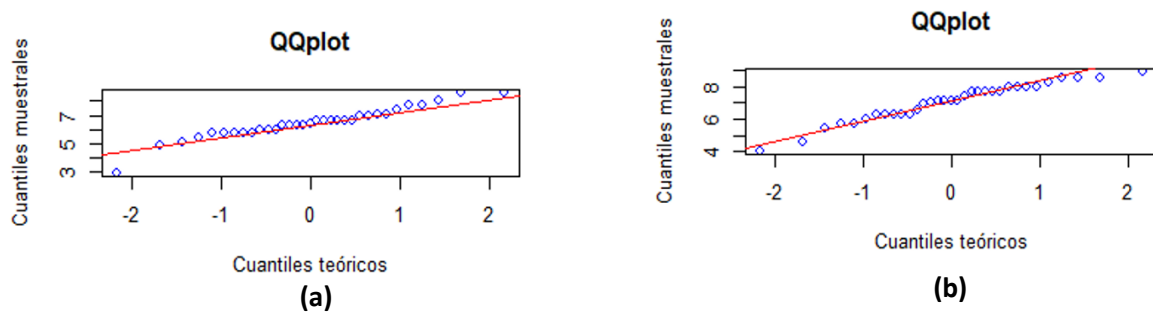


Fig. 7. Q-Q del postest para (a) grupo control y (b) grupo experimental.

Como se observa en la tabla 2 la prueba de normalidad de Shapiro- Wilk tanto para el grupo control como para el grupo experimental aplicadas en el pretest y postest, el p- value  $> 0.05$  por lo que se acepta la hipótesis nula es decir, se verifica el supuesto de normalidad de los datos y se corrobora al observar las figuras 6 y 7 las cuales muestran un gráfico Q-Q que representa los cuantiles de la distribución de una variable respecto a los cuantiles de cualquiera de las integrantes en una serie de distribuciones de contraste. Este gráfico se construye con pares de valores, donde a cada valor observado se le empareja con su valor esperado, procedente éste último de una distribución normal. Si la muestra es extraída de una población normal ambos valores se encontrarán en la misma línea recta [19].

Se evidencia que en las figuras 6 y 7, prácticamente todos los puntos representados coinciden sobre la línea recta y, en consecuencia, podemos afirmar que los datos siguen una distribución normal [19]. Por lo que es posible aplicar la prueba paramétrica t-student a este conjunto de datos para comprobar la hipótesis de la investigación.

### 3. Resultados de la Prueba de hipótesis de investigación

Para fines de la investigación se persigue en primer momento comparar las calificaciones obtenidas en el pretest de los grupos control y experimental con la finalidad de apreciar las condiciones iniciales de ambos, los cuales representan grupos independientes, establece Hurtado [10]: “Dos grupos son independientes cuando la pertenencia de cada caso a uno de los grupos no está determinada por la pertenencia al otro grupo” (p.996). Esta prueba de hipótesis se consideró un nivel de significación de  $\alpha=0,05$  para un intervalo de confianza al 95%. A continuación, en la tabla 3 se puede apreciar el p-valor calculado con RStudio permitiendo comprobar la hipótesis de la investigación, considerando:

$H_0$ : no hay diferencia o cambio entre las medias de las calificaciones.

$H_1$ : considera que el valor real de la media es mayor, menor o distinto del valor que establece la  $H_0$ .

Por lo tanto:

Se acepta  $H_0$ , si  $p > \alpha$   
Se rechaza  $H_0$ , si  $p \leq \alpha$

TABLA 3.  
CÁLCULO DE P-VALOR EMPLEANDO RSTUDIO.

Pretest	
p-value	0.1322
Postest	
p-value	0.02793

En la tabla 3 del pretest, se observa que el valor p es 0.13, lo que supera el nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, se concluye que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Esto indica que, antes de la intervención, no se detectan diferencias significativas en la media de las calificaciones entre el grupo control y el experimental.

Ahora bien, en la tabla 3 se evidencia que para el postest dado que el valor p es menor que el nivel de significancia de 0.05, la hipótesis nula es rechazada, y se acepta la hipótesis alternativa. Esto sugiere que, en el postest, se observaron cambios significativos entre los grupos control y experimental, lo que indica que la media de las calificaciones entre ambos grupos después de la intervención fue distinta.

## V. DISCUSIONES

El interés de la aplicación de la prueba objetiva fue verificar si después de la implementación de la estrategia tecnopedagógica surgía algún cambio en cuando al desempeño académico de los contenidos conceptuales. En este sentido, fue necesario una comparación de los resultados obtenidos por los estudiantes que participaron en la estrategia tecnopedagógica con los que no lo hicieron, razón por la cual se estableció un grupo control y otro experimental. Este estudio es un aporte valioso para la comunidad interesada en la educación en ingeniería, ya que detalla las etapas de un diseño instruccional específico para esta área, centrado en tres procesos cognitivos conocidos por sus siglas FOS (fijo mi atención, organizo mis conceptos, simulo y aprendo).

Estos tres procesos son cruciales para el aprendizaje efectivo, especialmente en áreas técnicas como la ingeniería. (1) Fijo mi atención: la atención es la puerta de entrada al aprendizaje. Concentrarse en la información relevante permite a los estudiantes procesar y retener los conceptos clave, lo que es esencial para construir una base sólida de conocimiento. (2) Organizo mis conceptos: la organización del conocimiento implica estructurar y relacionar la información nueva con lo que ya se conoce. Este proceso facilita la comprensión profunda y la aplicación de los conceptos en contextos variados, lo que es vital para resolver problemas complejos en ingeniería. (3) Simulo y aprendo: la simulación permite a los estudiantes aplicar sus conocimientos en entornos controlados, donde pueden experimentar, analizar resultados y corregir errores. Este proceso fortalece la comprensión de los conceptos y prepara a los estudiantes para enfrentar situaciones reales con mayor confianza y habilidad. En conjunto, estos procesos apoyan un aprendizaje integral, permitiendo a los estudiantes no solo memorizar información, sino también entenderla, organizarla y aplicarla de manera efectiva en su campo de estudio.

Desde la perspectiva de la enseñanza como lo señala Paz [20] el profesor combina la exposición del tema con el planteamiento de un ejercicio/problema de aplicación de los conceptos, con el fin de afianzar la teoría explicada o incluso como instrumento para evaluar la comprensión de esta. Tales actuaciones didácticas aparecen regularmente en el contexto de los temas que se trabajan en el aula y el laboratorio. Debido a esto, las actividades realizadas por los estudiantes cuando resuelven problemas, principalmente en las asignaturas de los núcleos básicos de ingeniería y en menor medida en las de ingeniería aplicada, enfatizan en los procedimientos para la resolución correcta del problema.

Además, conviene resaltar lo establecido por Paz [21], algunas veces los estudiantes demuestran poco desarrollo de las habilidades para la representación gráfica, el monitoreo y control de las estrategias seguidas para su resolución, que dificultan la apropiación de conceptos y la toma de conciencia de los procesos, al menos en la medida esperada. Sin embargo, cuando los conceptos alcanzan sus verdaderos significados conectan con los procedimientos; además ejercitan al ingeniero a acotar problemas, identificar variables relevantes, diseñar modelos, adoptar esquemas de abordaje alternativo, tomar decisiones y analizar los alcances de los resultados obtenidos [22], en este sentido, aunque la asignatura que se aborda es de naturaleza práctica dado que hace énfasis en la parte experimental lo que se espera es que la estrategia tecnopedagógica incida en los contenidos conceptuales y al momento de la práctica los estudiantes se hayan apropiado de estos.

## VI. CONCLUSIONES

El diseño e implementación de una estrategia tecnopedagógica tiene un impacto significativo en el desempeño académico de los estudiantes de ingeniería en los conceptos básicos de electrónica. La estrategia no solo facilita



una mejor comprensión de los contenidos conceptuales, sino que también promueve un aprendizaje más activo y centrado en el estudiante. Los resultados muestran una mejora notable en las calificaciones y en la capacidad de los estudiantes para aplicar conocimientos fundamentales en electrónica, lo que subraya la efectividad de la estrategia tecnopedagógica en fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje en contextos de educación superior.

#### LIMITACIONES

Una de las principales limitaciones de este estudio es el tamaño de la muestra. Aunque los datos obtenidos aportan información valiosa, la muestra relativamente pequeña limita la capacidad de generalizar los resultados. Por lo que se recomienda a futuras líneas de investigación ampliar el tamaño de la muestra para mejorar la generalización de los resultados que exploren la replicación del estudio en otros contextos educativos y disciplinas.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca con número de apoyo 775434 para realizar esta contribución.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Palacios-Rodríguez, C. Llorente-Cejudo, M. Lucas, P. Bem-haja, "Macroevaluación de la competencia digital docente. Estudio DigCompEdu en España y Portugal," *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, vol. 28, no. 1, 2025, doi: <https://doi.org/10.5944/ried.28.1.41379>
- [2] F. D. Guillén-Gámez, M. Gómez-García, J. Ruiz-Palmero, "Competencia digital en labores de Investigación: predictores que influyen en función del tipo de universidad y género del profesorado de Educación Superior," *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, no. 69, pp: 7-34, 2024. <https://doi.org/10.12795/pixelbit.99992>
- [3] V. Quijada, M. García, "El Aula invertida y otras estrategias con uso de TIC. Experiencia de aprendizaje con docentes," *XXX Simposio Internacional de TIC En Educación*. SOMECE, 2015.
- [4] D. Churchill, M. King, B. Webster, B. Fox, "Integrating learning design, interactivity, and technology," In *ASCILITE-Australian Society for Computers in Learning in Tertiary Education Annual Conference* (pp. 139-143). Australasian Society for Computers in Learning in Tertiary Education, 2013.
- [5] C. Coll, "Psicología de la Educación y prácticas educativas mediadas por las tecnologías de la información y la comunicación: Una mirada constructivista", *Sinéctica*, no. 25, 2004, México, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente [Accessed: 10 -Mar. 2021]. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99815899016>
- [6] S. A. Games, J. M. Mercado, J. A. Parra, "Dificultades en el aprendizaje de la electricidad, Un estudio en el Colegio Técnico Industrial Don Bosco Salesianos Antofagasta", Tesis licenciatura, Licenciatura en Educación, Universidad Católica del Norte, Chile, 2012.
- [7] E. R. Babbie, *Fundamentos de la investigación social*, México: Cengage Learning, 2000.
- [8] E. Soubirón, S. Camarano, *Diseño de pruebas objetivas*. Montevideo: Unidad académica de Educación Química, 2006. Available: <https://ice.ua.es/de/documentos/recursos/materiales/ev-pruebas-objetivas.pdf>
- [9] H. Ñaupas Paitán, M. R. Valdivia Dueñas, J. J. Palacios Vilela, H. E. Romero Delgado, *Metodología de la investigación: cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*, 5ª ed., Bogotá, Ediciones de la U, 2014.
- [10] J. Hurtado, *Metodología de la Investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia*, Colombia: Quirón Ediciones, 2010, pp. 411-834.
- [11] I. Saza, D. Mora, M. Agudelo, "El diseño instruccional ADDIE en la facultad de ingeniería de UNIMINUTO," *Hamut'ay*, vol. 6, no. 3, 2019, pp: 126-137, doi: <http://dx.doi.org/10.21503/hamu.v6i3.1851>
- [12] D. Juárez Popoca, C. A. Torres Gastelú, L. E. Herrera Díaz, "Las posibilidades educativas de la curación de contenidos: una revisión de literatura," *Apertura*, vol. 9, no. 2, pp. 116-131, 2017.
- [13] M. Hedlefs, A. de la Garza, M. Sánchez, A. Garza, "Adaptación al español del Cuestionario de Usabilidad de Sistemas Informáticos CSUQ," *RECI Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, vol. 4, no. 8, 2015. <https://www.reci.org.mx/index.php/reci/article/view/35>
- [14] M. Martín Arribas, "Diseño y validación de cuestionarios," *Matronas profesión*, vol. 5, no. 17, pp. 23-29, 2004. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6125935>

- [15] B. F. Robles Pastor, “Índice de validez de contenido: Coeficiente V de Aiken,” *Pueblo Continente*, vol. 29, no. 1, pp. 193-197, 2018. <https://journal.upao.edu.pe/index.php/PuebloContinente/article/view/991>
- [16] D. A. Uyanah, U. I. Nsikhe, “The theoretical and empirical equivalence of Cronbach alpha and Kuder-Richardson formular-20 reliability coefficients,” *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 17, 2023. <https://doi.org/10.47001/IRJIET/2023.705003>
- [17] C. Ruiz, *Instrumentos de investigación educativa. Procedimientos para su diseño y validación*. 2ª ed., Venezuela: CIDEG, 2002.
- [18] C. A. Flores Tapia, K. L. Flores Cevallos, “Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-darling, ryan-joiner, shapiro-wilk y kolmogórov-smirnov,” *Societas*, vol. 23, no. 2, pp. 83-106, 2021. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9534175>
- [19] M. R. Saldaña, “Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal,” *Revista Enfermería del Trabajo*, vol. 6, no. 3, pp. 114, 2016. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>
- [20] H. Paz Penagos, “Aprendizaje autónomo y estilo cognitivo: diseño didáctico, metodología y evaluación,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 9, no. 17, pp. 53-65, 2014. <https://doi.org/10.26507/rei.v9n17.421>
- [21] H. Paz Penagos, “Análisis comparado de las tendencias didácticas basadas en resolución de problemas en ingeniería,” *Argos*, vol. 29, no. 57, pp. 126-149, 2012. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0254-16372012000200007&lng=pt&nrm=iso](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0254-16372012000200007&lng=pt&nrm=iso)
- [22] J. Mitchell, B. Canavan, J. Smith, “Problem based learning in communication systems: Student perceptions and achievement,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 53, no. 4, pp. 587-594, 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5353647>

## ANEXO I

### Instrumento: Prueba Objetiva

#### Técnica: Encuesta

**Instrucciones:** la prueba consta de 35 declaraciones de corte conceptual con varias opciones donde solo una es la correcta. La duración de la prueba es de 35 min. Se te pide contestar todas las preguntas con total honestidad. Para las siguientes declaraciones marca con una equis (x) la respuesta que consideres correcta.

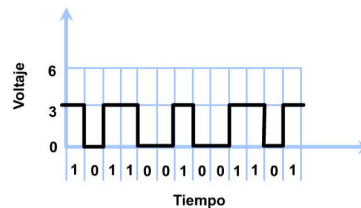
16

#### Declaraciones:

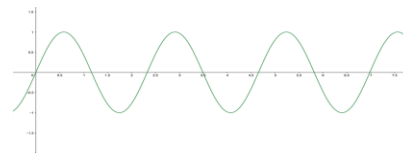
1. Dispositivo capaz de realizar mediciones de carácter electrónico como medir resistencia, voltaje, corriente, continuidad entre otras.
  - a) Capacitometro.
  - b) Multímetro
  - c) Amperímetro
  - d) Óhmetro
  
2. Clases de Multímetros
  - a) Digital y octal
  - b) Analógicos y binarios
  - c) Digital y analógicos
  - d) Unarios y digital
  
3. Es un instrumento que se utiliza para medir resistencia eléctrica (la oposición a una corriente eléctrica).
  - a) Óhmetro
  - b) Amperímetro
  - c) Galvanómetro
  - d) Voltímetro
  
4. Son aparatos que se emplean para indicar el paso de corriente eléctrica por un circuito y para la medida precisa de su intensidad. Suelen estar basados en los efectos magnéticos o térmicos causados por el paso de la corriente.
  - a) Óhmetro
  - b) Osciloscopio
  - c) Galvanómetro
  - d) Multímetro
  
5. Instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo, que permite visualizar fenómenos transitorios, así como formas de ondas en circuitos eléctricos y electrónicos y mediante su análisis se puede diagnosticar con facilidad cuáles son los problemas del funcionamiento de un determinado circuito.
  - a) Frecuencímetro
  - b) Wattmetro
  - c) Multímetro
  - d) Osciloscopio

6. Es un resistor eléctrico con un valor de resistencia variable y generalmente ajustable manualmente.
- Potenciómetro
  - Resistencias de carbón
  - Resistencia SMD
  - Resistencias fijas
7. ¿Qué aparato de medición se usa para medir la tensión eléctrica?
- Amperímetro
  - Óhmetro
  - Voltímetro
  - Telurímetro
8. Para medir resistencias ¿cómo se deben de colocar las puntas de prueba del multímetro?
- En serie con el elemento a medir
  - En paralelo con el elemento a medir, sin sacarlo del circuito
  - En paralelo con el elemento a medir y desconectado del circuito
  - No indicará nada porque se habrá fundido el fusible de protección.
9. ¿Qué es un circuito en serie?
- Circuito en el que la corriente eléctrica se bifurca en cada nodo
  - Circuito eléctrico que tiene una combinación de elementos tanto en serie como en paralelos
  - Circuito en el que la corriente eléctrica solo tiene un solo camino para llegar al punto de partida, sin importar los elementos intermedios.
  - Es un circuito abierto que debemos siempre evitar
10. Cuando hablamos de conversión de unidades nos referimos a:
- El sistema de unidades mundialmente más usado
  - El cambio de instrumentos y equipos de medición y verificación
  - Las primeras formas en que se realizaban las medidas.
  - La transformación de un valor numérico de una magnitud en otro equivalente

11. Identifique la siguiente señal :
- Señal digital
  - Señal analógica
  - Señal óptica monomodo
  - Señal eléctrica pulsante

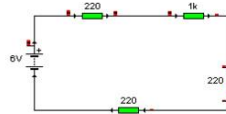


12. Identifique la siguiente señal :
- Señal analógica
  - Señal óptica monomodo
  - Señal eléctrica pulsante
  - Señal digital



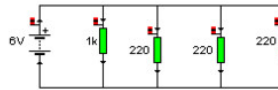
13. ¿De qué tipo es el circuito?

- a) mixto
- b) en serie
- c) paralelo
- d) ninguno de los anteriores



14. ¿De qué tipo es el circuito?

- a) mixto
- b) en serie
- c) ninguno
- d) paralelo



15. Dos elementos están conectados en PARALELO cuando:

- a) Comparten solamente dos NODOS
- b) Comparten al menos dos NODOS
- c) Comparten solamente un nodo
- d) Comparten al menos un nodo

16. Dos elementos están conectados en SERIE cuando:

- a) Comparten solamente dos NODOS
- b) Comparten al menos dos NODOS
- c) Comparten solamente un nodo
- d) Comparten al menos un nodo

17. El enunciado: "En cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen", es la base de:

- a) La ley de las Mallas
- b) Ley de los Voltajes
- c) Ley de las corrientes
- d) Ninguna de las anteriores

18. Es un camino cerrado formado por elementos de circuitos:

- a) Nodo
- b) Malla
- c) Corriente
- d) Voltaje

19. Su enunciado establece que: "En un circuito cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada"

- a) Ley de las Corrientes
- b) Ley de las Mallas
- c) Leyes de Kirchhoff
- d) Ninguna de las Anteriores

20. ¿Cuál es la ley que: afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia siempre y cuando su temperatura se mantenga constante?

- a) Ley de Faraday
- b) Ley de Ohm
- c) Ley de Kirchoff
- d) Ley de Poisson

21. ¿Cuál es la fuerza electromotriz con la cual los electrones son movidos a través de un medio conductor o semiconductor?

- a) Masa
- b) Resistencia
- c) Voltaje
- d) Corriente eléctrica

22. Es la magnitud eléctrica que relaciona la oposición al flujo de corriente eléctrica:

- a) Voltaje
- b) Corriente eléctrica
- c) Resistencia eléctrica
- d) Vatios

23. Es un arreglo de cuatro resistencias para determinar el valor de una resistencia desconocida.

- a) Transformada de Laplace
- b) Puente de Wheatstone
- c) Acondicionamiento de señal
- d) Transformación de señal

24. El potenciómetro es un tipo de sensor que varía su conductividad por:

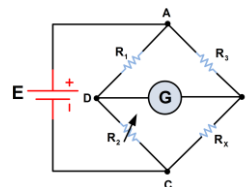
- a) Fuerza electromotriz
- b) Accionamiento mecánico
- c) Campo electromagnético
- d) Accionamiento neumático

25. El proceso de transformación de una señal analógica a digital en el vehículo es llamado:

- a) Transformada de Laplace
- b) Transformación binaria
- c) Acondicionamiento de señal
- d) Transformación de señal

26. Esta configuración representa:

- a) Transformada de Laplace
- b) Puente de Wheatstone
- c) Acondicionamiento de señal
- d) Transformación de señal



27. Para recibir información del proceso y analizarla en la unidad de control, utilizamos

- a) Sensores
- b) Transductores
- c) Actuadores
- d) Botoneras



28. Para entregar enviar ordenes al proceso, que se definen en la unidad de control, utilizamos:
- Sensores
  - Transductores
  - Actuadores
  - Botoneras
29. El sensor de temperatura funciona:
- Son resistencias que asciende con la temperatura, si aumenta se denomina termistor PTC, si disminuye se denomina termistor NTC
  - Un conductor de corriente induce el flujo de corriente en otro conductor
  - Genera un campo eléctrico, cuando un objeto entra al campo cambia la distancia entre las dos placas y esto se puede medir.
  - Necesita un emisor que mande una señal en forma de luz, un receptor que reciba la señal.
30. El sensor capacitivo funciona:
- Son resistencias que asciende con la temperatura, si aumenta se denomina termistor PTC, si disminuye se denomina termistor NTC
  - Un conductor de corriente induce el flujo de corriente en otro conductor
  - Genera un campo eléctrico, cuando un objeto entra al campo cambia la distancia entre las dos placas y esto se puede medir.
  - Necesita un emisor que mande una señal en forma de luz, un receptor que reciba la señal.
31. El sensor inductivo funciona:
- Son resistencias que asciende con la temperatura, si aumenta se denomina termistor PTC, si disminuye se denomina termistor NTC
  - Un conductor de corriente induce el flujo de corriente en otro conductor
  - Genera un campo eléctrico, cuando un objeto entra al campo cambia la distancia entre las dos placas y esto se puede medir.
  - Necesita un emisor que mande una señal en forma de luz, un receptor que reciba la señal.
32. ¿Cómo funcionan los sensores piezoeléctricos en la medición de presión?
- El nivel del fluido incrementa la presión.
  - El material se deforma y eso produce una diferencia de voltaje.
  - Tienen un elemento elástico que varía la resistencia de un potenciómetro en función de la presión.
  - Ninguna de las anteriores.
33. ¿Cómo funcionan los sensores capacitivos en la medición de presión?
- El nivel del fluido incrementa la presión.
  - El material se deforma y eso produce una diferencia de voltaje.
  - La presión se mide mediante el cambio en la capacitancia de un elemento del sensor.
  - Ninguna de las anteriores.

34. ¿Cómo funcionan los sensores resistivos en la medición de presión?
- a) El nivel del fluido incrementa la presión.
  - b) El material se deforma y eso produce una diferencia de voltaje.
  - c) Tienen un elemento elástico que varía la resistencia de un potenciómetro en función de la presión.
  - d) Ninguna de las anteriores.
35. El sensor óptico funciona:
- a) Son resistencias que asciende con la temperatura, si aumenta se denomina termistor PTC.
  - b) Un conductor de corriente induce el flujo de corriente en otro conductor
  - c) Genera un campo eléctrico, cuando un objeto entra al campo cambia la distancia entre las dos placas y esto se puede medir.
  - d) Necesita un emisor que mande una señal en forma de luz, un receptor que reciba la señal.

## ANEXO 2

### Consentimiento informado

#### 1. Información previa

Estimado estudiante, se le está solicitando participar en un estudio de investigación, por lo que es necesario pasar por un proceso de consentimiento informado, en el que establece lo que necesita saber para decidir si participar o no. Este consentimiento es para la implementación de una prueba objetiva, que forma parte de los instrumentos de recogida de datos de un trabajo de investigación titulado: "Aprendizaje de conceptos básicos de electrónica: estrategia tecnopedagógica y aplicación de una prueba objetiva"

Has sido invitado a formar parte de las personas que responderán la prueba objetiva, debido a que formas parte de los alumnos matriculados en la materia Metrología Eléctrica e Instrumentación en Electrónica (MEIE), en este sentido te pedimos que leas y consultes cualquier duda que te surja antes de participar.

#### 2. Beneficios

Este estudio puede proporcionar información valiosa para los docentes interesados en optimizar sus estrategias de enseñanza y brindar un apoyo pedagógico más eficiente a sus estudiantes.

#### 3. Participación en el estudio

Si usted autoriza la participación en este estudio, se le administrará un cuestionario en el que se le harán algunas preguntas relacionadas con el propósito de este estudio. La información que nos facilite es totalmente confidencial y le será útil para alcanzar los objetivos planteados; Por lo tanto, se agradece su colaboración y sinceridad. La información proporcionada en este cuestionario será transcrita respetando sus comentarios y contribuciones.

#### 3. Aclaraciones

- Su decisión de participar en el estudio es completamente voluntaria.
- No habrá consecuencias desfavorables para usted si no acepta la invitación.
- Si decide participar en el estudio, puede retirarse en cualquier momento que lo desee, incluso si el investigador responsable no lo solicita, y puede o no informarle de las razones de su decisión, lo cual será respetado en su totalidad.
- No tendrás que realizar ningún gasto durante el estudio.
- No recibirás pago por tu participación.
- Durante el transcurso del estudio, podrá solicitar información actualizada sobre el mismo al investigador responsable.
- La información obtenida en este estudio será mantenida con estricta confidencialidad por el grupo de investigadores.

#### 4. Aspectos éticos

Debido a que la investigación tiene un enfoque social, se presentan algunos criterios éticos como: participación voluntaria, en la que se incluirá el consentimiento informado, en este sentido, al momento de la aplicación de cualquier instrumento de recolección de información, se entregará este documento informativo, en el que los sujetos autorizarán que acepten participar en el estudio, considerando que la información recopilada puede ser utilizada para el análisis y comunicación de los resultados. Otro criterio ético es la confidencialidad con el propósito de proteger los intereses y el bienestar de los participantes. Para ello, en las identidades de los sujetos no se expondrán los nombres al presentar la información recopilada.

## Aplicación del modelo de sistemas viables para el crecimiento y desarrollo sustentable en las organizaciones: una revisión de literatura

Application of viable systems model for growth and development sustainable in organizations: a literature review

Eric Daniel **Gonzalez Herrera**<sup>1</sup>, Mario **Aguilar Fernández**<sup>2</sup>

Instituto Politécnico Nacional,  
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas,  
Ciudad de México, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0009-0005-5772-1794 | egonzalez2300@alumno.ipn.mx

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-2621-8692 | maguilarfer@ipn.mx

Recibido 20-08-2024, aceptado 20-10-2024.

### Resumen

Las organizaciones, independientemente de su tamaño o sector, enfrentan desafíos que limitan su crecimiento y desarrollo sostenible, tales como el acceso restringido a financiamiento, apoyo gubernamental insuficiente, carencia de capacitación, estrategias ineficaces de marketing y producción, y baja inversión en tecnología. Para comprender estos desafíos, se lleva a cabo una revisión de literatura sobre las aplicaciones del Modelo de Sistemas Viables (VSM) de Stafford Beer en un contexto global, que promueve una gestión organizacional eficiente y adaptable, fomentando la innovación y el desarrollo tecnológico, así como fomentar una visión sistémica. Mediante una revisión sistemática de literatura basada en el método PRISMA, se identificaron estudios que evidencian la efectividad del VSM en distintos sectores y regiones, destacando su capacidad para mejorar la resiliencia organizacional, optimizar procesos y gestionar la complejidad. El VSM se posiciona como una herramienta clave para las organizaciones nacionales o internacionales en su búsqueda de sostenibilidad y competitividad a largo plazo.

**Palabras clave:** pensamiento sistémico, modelo de sistemas viables, desarrollo y crecimiento sustentable, cibernética organizacional.

### Abstract

Organizations, regardless of their size or sector, face challenges that limit their growth and sustainable development, such as restricted access to financing, insufficient government support, lack of training, ineffective marketing and production strategies, and low investment in technology. To understand these challenges, a literature review is carried out on the applications of Stafford Beer's Viable Systems Model (VSM) in a global context, which promotes efficient and adaptable organizational management, fostering innovation and technological development, as well as promoting a systemic vision. Through a systematic literature review based on the PRISMA method, studies were identified that demonstrate the effectiveness of the VSM in different sectors and regions, highlighting its ability to improve organizational resilience, optimize processes and manage complexity. The VSM is positioned as a key tool for national or international organizations in their search for long-term sustainability and competitiveness.

**Index terms:** system thinking; viable system model, sustainable growth and development, organizational cybernetics.

## I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de México, las organizaciones juegan un papel crucial en la estructura económica del país. Las PyMEs (pequeñas y medianas empresas) representan el 99.8% del total nacional, y el 0.2% las grandes empresas (GE) y transnacionales (ETN), según datos del INEGI [1], además de que generan el 68.4% del empleo total, contra el 31.6% que representa la generación de empleos por las GE y ETN, respectivamente. Los principales sectores económicos en los que se encuentran estas empresas abarcan los establecimientos productores de bienes y comercializadores de mercancías, así como los prestadores de servicios y el sector de la construcción [2].

Sin embargo, principalmente, las empresas mexicanas enfrentan problemáticas que dificultan un crecimiento y desarrollo sustentable, afectando directamente en los sistemas operacionales y la toma de decisiones, aunque es importante mencionar que dichas problemáticas no son discriminatorias por tamaño de la organización, ubicación geográfica, sector o actividad económica.

Existen diversas causas que contribuyen a las problemáticas mencionadas en las organizaciones [1]. Algunas de estas causas incluyen desde la dificultad de acceso a financiamiento y altas tasas de interés por parte de las instituciones financieras [4], poco apoyo gubernamental enfocado en el fortalecimiento y crecimiento de estas empresas o atracciones de inversiones [5] la falta de capacitación y profesionalización [6], la falta de estrategias de marketing y producción eficientes y la falta de inversión en tecnología e innovación [7]. Creando la necesidad de implementar métodos en las organizaciones, para abordar de manera eficiente y sostenible dichos desafíos.

Una alternativa inicial es la visión integradora para abordar desafíos complejos y multifacéticos, al considerar todos los componentes y sus interacciones dentro de un sistema en su totalidad. A diferencia de los enfoques tradicionales que tienden a analizar los problemas de manera aislada [8].

Dicho enfoque esta atribuido al pensamiento sistémico, que promueve una perspectiva holística, reconociendo que las empresas son sistemas dinámicos compuestos por diversas partes interrelacionadas con su entorno [9]. El VSM (Modelo de Sistemas Viables o Viable System Model) es un enfoque desarrollado por Stafford Beer en el ámbito de la cibernética organizacional, que busca entender cómo las organizaciones pueden mantener su viabilidad en entornos complejos y cambiantes [8], [9]. Este modelo permite a las empresas u organizaciones mejorar sus procesos internos, optimizar la toma de decisiones, gestionar eficientemente los recursos disponibles y adaptarse rápidamente a los cambios del mercado [10]. Además, el VSM fomenta la innovación y el desarrollo tecnológico, lo que brinda a las organizaciones una ventaja competitiva y les permite mantenerse a la vanguardia en su sector [10], [11]. Asimismo, la implementación del VSM en las organizaciones fomenta una cultura de mejora continua y aprendizaje organizacional, promoviendo la adaptabilidad y la capacidad de respuesta ante los desafíos y oportunidades que se presenten, identificando cinco funciones clave dentro de cualquier sistema viable: 1) Implementación; 2) Coordinación; 3) Control o dirección; 4) Inteligencia y 5) Gobernanza o política [9], [12].

La aplicación del Modelo de Sistemas Viables (VSM) se ha sustentado por varias razones, principalmente, relacionadas con su capacidad para gestionar la complejidad y fomentar la adaptación dentro de organizaciones y sistemas. Aquí se detallan las razones clave por las que el VSM se ha destacado y su comparación con otros modelos (véase en Tabla 1).

TABLA 1.  
DIFERENCIAS PRINCIPALES DEL VSM CON LOS MODELOS ORGANIZACIONALES TRADICIONALES.  
(ELABORADA CON BASE EN [9]).

⊞	Criterio	Modelo de Sistemas Viables (VSM)	Modelo(s) tradicional(es)
	<b>Enfoque cibernético</b>	Se centra en la comunicación, el control y la retroalimentación y la autorregulación de los sistemas.	Suelen enfocarse en estructuras jerárquicas o en la optimización de procesos.
	<b>Viabilidad y adaptación</b>	Asegura la viabilidad de las organizaciones en entornos cambiantes.	Solo se centran en la eficiencia operativa o la reducción de costos.
	<b>Estructura no jerárquica</b>	Permite responder de manera más ágil a los cambios y fomenta la colaboración entre diferentes niveles y funciones en las organizaciones.	Los modelos organizativos convencionales cuentan con estructuras jerárquicas.
	<b>Enfoque en la resiliencia</b>	La capacidad de anticipar y adaptarse a los cambios.	Modelos tradicionales no cuentan con la visión del entorno cambiante para la detección y adaptación de cambios.
	<b>Enfoque en la retroalimentación y el aprendizaje</b>	Enfatiza la importancia de la retroalimentación y el aprendizaje continuo como mecanismos para mejorar el desempeño organizacional.	Por las estructuras, conceptos y prácticas, se limita la capacidad de la organización para adaptarse y evolucionar.

A diferencia de otros modelos que pueden ser más rígidos o especializados, el VSM ofrece un enfoque integral que asegura la viabilidad del sistema en su conjunto. Este modelo permite a las organizaciones adaptarse a cambios, entender y manejar la complejidad, y mantener la resiliencia a largo plazo. Su versatilidad lo hace aplicable en diversos contextos, desde empresas hasta organizaciones no lucrativas y sistemas sociales, proporcionando una estructura flexible y efectiva para enfrentar desafíos complejos y dinámicos [8], [9].

Este análisis literario se enfoca en la pregunta: ¿Qué aplicaciones del modelo de los sistemas viables existen o se proponen para el crecimiento y desarrollo sustentable de las organizaciones? Así como el objetivo de dar a conocer el VSM, que son aplicados en las empresas a nivel global independientemente su tamaño y actividad económica, para su crecimiento y desarrollo sustentable (económico, social y ambiental), con base en el método PRISMA.

## II. METODOLOGÍA

La investigación se define como documental y descriptiva, con un enfoque cualitativo [13]. La búsqueda se basa en la revisión sistemática de literatura, según PRISMA [14] ampliamente utilizada en la revisión sistemática de literatura, debido a varias ventajas que ofrece, como la estandarización y transparencia, permitiendo a otros investigadores seguir y evaluar el proceso de revisión. Además de ayudar a identificar y minimizar el sesgo en las revisiones sistemáticas al exigir una descripción detallada de los métodos utilizados para la selección de estudios y la evaluación de su calidad. Por lo que dicha metodología es ampliamente recomendada y aceptada en la comunidad científica para la publicación de revisiones sistemáticas, lo que puede facilitar el proceso de publicación en revistas de alto impacto, constando en cuatro fases desglosadas conforme al proceso de selección de exclusión aplicado al tema de interés:

- i) Identificación de publicaciones (artículos científicos, capítulos de libros, estudios de caso y repositorios de congresos o conferencias) en idioma español e inglés, en la que implica la búsqueda en base de datos de Scopus y Web of Science (WoS), justificada por su reconocimiento



4

- internacional sobre modelo de sistemas viables aplicados en las organizaciones, así como propuestas de aplicaciones en las mismas, sin distinción de sector económico o tamaño. Dicha búsqueda inicial, contempla todos los campos (como título, abstract o resumen, keywords, etc.) contengan las palabras "viable system", "sustainable development", "organization" or "organisation" o "small and médium enterprises", generando como resultado 270 publicaciones. Se priorizó la relevancia, posteriormente el número de la citación, quitando la importancia a la fecha de publicación, por los escasos en el tema de "modelo de sistemas viables" y "sustentabilidad en las organizaciones".
- ii) "Cribado" o primera exclusión: documentación científica que, por motivos externos o no concernientes, a la calidad de la información, la accesibilidad al documento o al ser publicado en un idioma diferente al español o inglés fueron excluidos.
  - iii) Idoneidad: revisión de manera individual y registro para determinar por su relevancia, utilizando criterios de inclusión, como correlación temática a la investigación documental predefinidos para ser seleccionados.
  - iv) Inclusión: donde se concentraron los artículos, ordenándose de manera descendente, en los que se identificó el autor y año de publicación, país de origen y título del documento, para su posterior análisis (véase en Fig. 1).

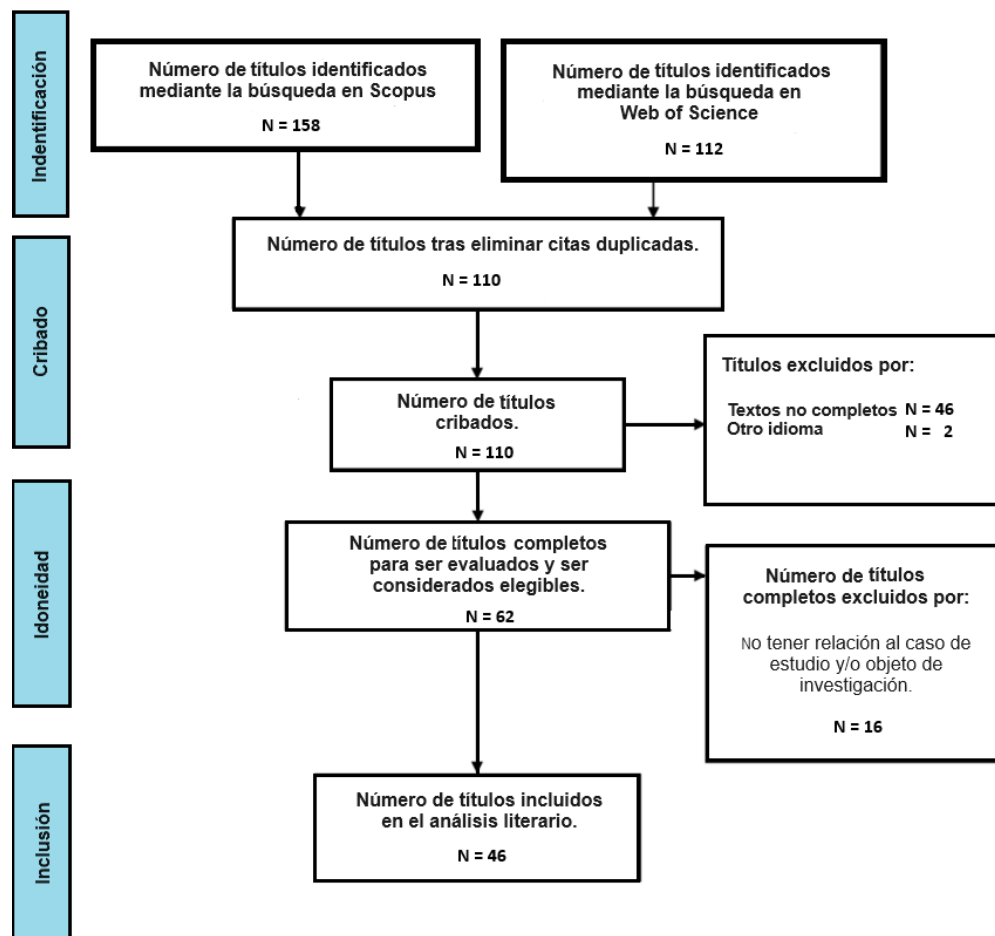


Fig. 1. Diagrama de flujo para la revisión sistemática de literatura.  
Elaboración propia con base en [14].

### III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos y análisis de la revisión sistemática de la literatura considerada como relevante.

#### A. Análisis descriptivo

De acuerdo con la búsqueda inicial con los criterios de inclusión por la base de datos Scopus y las tres fases de una revisión sistemática de literatura, basada en PRISMA [14] se obtuvo como resultado la selección de 46 publicaciones (véase en Tabla 2) de grado científico que se muestran en orden descendente.

TABLA 2  
PUBLICACIONES LITERARIAS SELECCIONADAS.

Núm.	Título	Autor y año	País o región
1	Application of the Viable System Model to analyse communications structures: A case study of disaster response in Japan	Preece, G.; Shaw D. y Hayashi, H., 2015	European Union
2	Enhancing organisational resilience: application of viable system model and MCDA in a small Hong Kong company	Chan, J. W. K., 2011	China
3	Management of a viable enterprise on the basis of the approach to management of a «living» organization and the concept of viable systems.	Fedotova, I.; Shersheniuk, O.; Prokopenko, M.; Britchenko, I. y Vazov, R., 2021	Ukraine
4	Modelo viable de empresa creativa para pequeñas y medianas empresas artesanales	Macías-Barreto C. y Aguilar-Fernández, M., 2021	Mexico
5	Complexity management and multi-scale governance: A case study in an Amazonian indigenous association.	Espinosa, A. y Duque, C., 2018	European Union
6	Design and Simulation of an Integrated Model for Organisational Sustainability Applying the Viable System Model and System Dynamics.	Gallego-García, S. y García-García, M., 2019	Spain
7	Design of Equipment Procurement Project Organization Based on Viable Systems Model.	Jun-Feng, S. y Wo-Ye, L., 2011	China
8	Development of sustainable key performance indicator (KPI) monitoring and control system using viable system model	Isah, S. S. y Sodangi, L. S., 2013	Nigeria
9	Human capital management innovation for Mexican lodging through autopoiesis and self-organisation.	Núñez-Ríos, J. E.; Sánchez-García, J. Y.; Tejeida-Padilla, R. y Coria-Páez, A. L., 2018	Mexico
10	Organisational cybernetics: A systems thinking method used for small and medium enterprises	Bugwandin, V. y Bayat, M. S., 2023	South Africa
11	Soft Systems Methodology Applied to Design Processes in an Artisan Enterprise	Macías-Barreto, C. y Aguilar-Fernández, M., 2021	Mexico
12	Supporting the design of competitive organizations by a domain-specific application framework for the viable system model	Sadi, T.; Wilberg, J.; Tommelein, I. D. y Lindemann, U., 2016	Brazil
13	Sustainability management: Insights from the Viable System Model	Panagiotakopoulos, P. D.; Espinosa, A. y Walker, J., 2016	No information.
14	Sustainable performance in tourism SMEs: a soft modeling approach.	Núñez-Ríos, J. E.; Sánchez-García, J. Y. y Ramirez-Nafarrate, A., 2023	Mexico
15	Systemic Model for Diagnosis of the Micro, Small and Medium Enterprises from Two Cities from the Countryside of the State of Sao Paulo in Brazil	Donaires, O. S.; Pinheiro, M. G.; Cezarino, L. O.; Ostanel, L. H. y Martinelli, D. P., 2010	Brazil
16	Systems Thinking Approach to Sustainable Performance in RAMSAR Sites.	Sánchez-García, J. Y.; Ramírez-Gutiérrez, A. G.; Núñez-Ríos, J. E.; Cardoso-Castro, P. P. y G. Rojas, O., 2019	Switzerland
17	The applicability of the Viable Systems Model as a diagnostic for small to medium sized enterprises.	Burgess, N. y Wake, N., 2012	United Kingdom
18	The enterprise complexity model: An extension of the viable system model for emerging organizational forms.	Espejo, R., 2021	United Kingdom

6

19	The financial gap for women in the MENA region: a systemic perspective.	Saviano, M.; Nenci, L. y Caputo, F., 2017	Italy
20	The viability and sustainability approach to support organizational resilience: Learning in a recent case study in the health sector.	Espinosa, A. M.; Walker, J.; Grover, K. y Vachkova, K. V., 2023.	United Kingdom
21	Determining the Factors to Improve Sustainable Performance in a Medium-Sized Organization	Núñez-Ríos, J. E. y Sánchez-García, J. Y., 2024	Switzerland
22	An integrated systems thinking approach for achieving sustainability in project-based organizations	Singh, A. K.; Pathak, D. K. y Patra, S, 2023	India
23	New Zealand Pae Ora Healthcare Reforms 2022: Viable by Design? A Qualitative Study Using the Viable System Model	Akmal, A.; Podgorodnichenko, N.; Gauld, R. y Stokes, T., 2023	New Zeland
24	Sustainable self-governance in businesses and society: The viable system model in action	Espinosa, A., 2022	United Kingdom
25	Enabling Sustainable Management Through Kalman Filtering in glossaLAB: A Case Study on Cyber-Subsidiarity	Díaz-Nafría, J. M.; Cañizares-Espada, M.; Seoane-Pujol, I.; Montaña-Gómez, J. A. y Guarda, T., 2022	Collaboration (different countries)
26	Understanding the Action-based Research for Strategic Change from Systemic Perspectives	Yu, J.E., 2021	Korea
27	Governance for intelligent organizations: a cybernetic contribution	Schwaninger, M., 2019	Switzerland
28	Cyber-subsidiarity: Toward a global sustainable information society	Díaz-Nafría, J. M., 2018	Collaboration (different countries)
29	Systemic design for sustainability	Schwaninger, M., 2018	Switzerland
30	Governance for sustainability: learning from VSM practice	Espinosa, A., 2015	Collaboration (different countries)
31	Organizing for sustainability: a cybernetic concept for sustainable renewal	Schwaninger, M., 2015	Switzerland
32	Integrated sustainability management for organizations	Panagiotakopoulos, P.; Espinosa, A. y Walker, J., 2015	Collaboration (different countries)
33	Synthesizing systemic intervention approaches: Combining viable system model, knowledge management, and Toyota production system for a sustainable holistic management model	Moore, B.; Calvo-Amodio, J. y Junker, J.F., 2015	United States of America
34	Contractual governance for public service value networks	Enquist, B.; Camén, C. y Johnson, M., 2011	Sweden
35	Sustainability, complexity and learning: Insights from complex systems approaches	Espinosa, A. y Porter, T., 2011	Collaboration (different countries)
36	A cybernetic view of environmental management: the implications for business organizations	Lewis, G. J., 1997	United Kingdom
37	Sustainable supply chains - Designing a requisite holistic model	Perko, I.; del Gaudio, G. y Potocan, V., 2024	Slovenia
38	Governance, cooperation and coordination in large inter-organisational project networks: a viable system perspective	Tannir, M.; Mills, G.; Krystallis, I.; Kalra, J., 2024	United Kingdom
39	Exploring Digital Multisided Platforms: A Systems Thinking Approach	Dutta, K., 2023	India
40	Overcoming critical failure factors in enterprise information systems implementation: A viable system model framework for manufacturing firms	Panagiotidis, K.; Tsolakis, N. y Tsigkas, A., 2022	Collaboration (different countries)
41	Creating a 'sustainability sublime' to enable megaprojects to meet the United Nations sustainable development goals	Sankaran, S.; Müller, R. y Drouin, N., 2020	Collaboration (different countries)
42	Integration of Sustainability Indicators and the Viable System Model Towards a Systemic Sustainability Assessment Methodology	Tong, A.; Calvo, J. y Haapala, K. R., 2018	United States of America
43	A Set of Conventions, a Model: An Application of Stafford Beer's Viable Systems Model to the Strategic Planning Process	Stephens, J. y Haslett, T., 2011	Australia

### B. Tipo de publicación

La representación de la muestra documental por tipo de investigación de la información literaria seleccionada fue representada, principalmente, por artículos de revista, capítulos de libro y repositorios o actas de congresos, con 4, 36 y 6, respectivamente, representando un 78% para los artículos, un 9% para las publicaciones provenientes de capítulos de libro y 13% para los repositorios de conferencias (véase en Fig. 2).

7

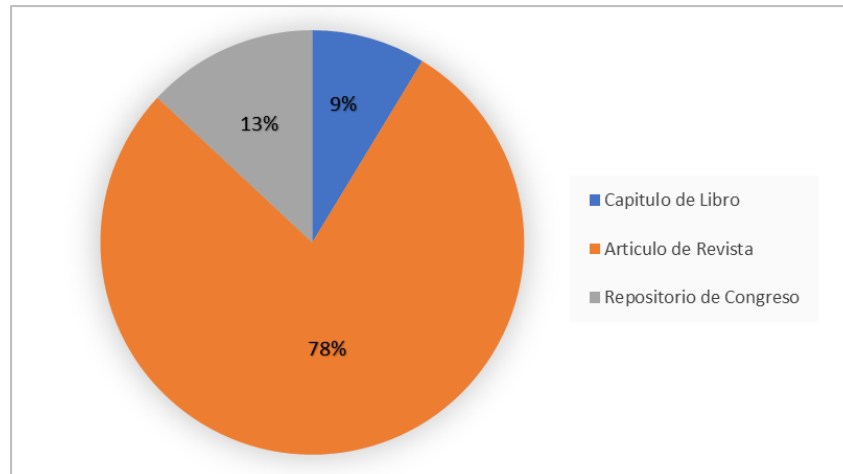


Fig. 2. Distribución por tipo de publicación.

Respecto a la tendencia por fecha de publicación (véase en Fig. 3) de los documentos de investigación, el intervalo muestra una brecha de trece años, respecto la publicación más antigua (1997), contra la más reciente (2024), debido a como se mencionó en la sección metodológica, la relevancia de la publicación fue prioridad antes que la antigüedad.



Fig. 3. Dispersión de publicaciones científicas (por año).

Respecto al país o región de procedencia (véase Fig. 4), la distribución está determinada, principalmente, por la región latinoamericana, fundamentalmente, de México, seguido de Europa, como el Reino Unido respecto a la región, la relevancia de las investigaciones, se localizaron dos artículos científicos en idiomas ingles que se pueden localizar en la Tabla 1. descrita en el presente documento.

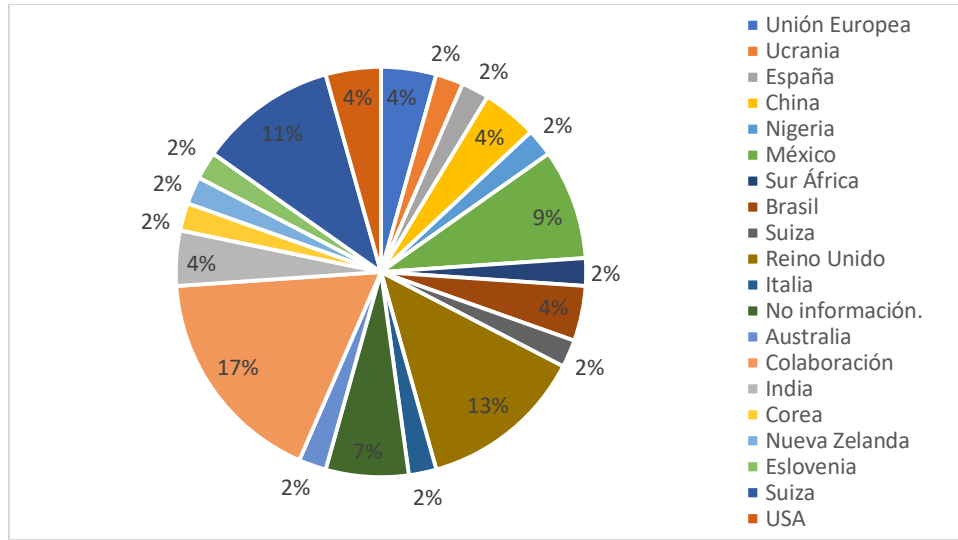


Fig. 4. Distribución regional de las publicaciones científicas.

#### IV. DISCUSIÓN

Es destacable mencionar que los estudios enfatizan la efectividad del VSM bajo el enfoque del pensamiento sistémico. Este modelo puede ser aplicado de manera transdisciplinaria para una mejora sostenible y sustentable de las empresas, generado por un diagnóstico de variables empíricas o medibles (KPI) dependientes del sector y entorno. El VSM proporciona una visualización clara de la viabilidad empresarial, abordando cuestiones complejas mediante la verificación de interconexiones e interdependencias dentro del sistema, así como la gestión [15]. Además, destaca la efectividad positiva de los mecanismos de colaboración en parámetros clave como son la viabilidad o la adaptación en un entorno cambiante, la retroalimentación y el aprendizaje continuo, diferenciadores clave ya destacado con los modelos tradicionales, para enfrentar nuevos retos ambientales, sociales y económicos [16].

Dicho lo anterior y con base en los hallazgos de las investigaciones seleccionadas, se identificaron seis temáticas integradoras e interrelacionadas al VSM en las organizaciones, las cuales se muestran en la Fig. 5.



Fig. 5. Temáticas de los hallazgos.

Es importante mencionar que para el desarrollo o implementación del VSM, la consideración de variables medibles como lo son; el desempeño, capacidades de servicio, la satisfacción del cliente, aprendizaje o adaptación, autopoiesis y otros, son centrales para una comprensión integral de los sistemas y los subsistemas, así como las repercusiones e interacciones con el entorno en la toma de decisiones para una gestión empresarial más eficiente [16].

#### A. Gestión de organizaciones viables

9

La importancia del enfoque de viabilidad y sostenibilidad para apoyar la resiliencia organizacional, destacando la autogestión y la capacidad de adaptación [17], [18], [19]. El VSM, desarrollado por Stafford Beer, es un marco teórico clave para la gestión de la complejidad organizacional, permitiendo mejorar la capacidad de respuesta y eficiencia [20], [21], [22], [23]. Este modelo se ha aplicado en diversos contextos, como las PyMEs artesanales y empresas en sectores de alta incertidumbre, mejorando la adaptabilidad y sostenibilidad [24], [25], [26]. Además, el VSM se utiliza como herramienta de diagnóstico para identificar problemas de viabilidad y mejorar operaciones, como en el monitoreo de indicadores clave de desempeño en instituciones educativas [27]. La literatura destaca la eficacia del VSM para mejorar la adaptabilidad y eficiencia organizacional, facilitando la implementación de prácticas sustentables [28], [29], [30], [31], [32], [33]. También, el VSM puede integrarse con estándares internacionales [34] para promover prácticas empresariales, organizativas y sectoriales como la salud que sean responsables y éticas [29], [35]. Estos modelos son fundamentales para entender y gestionar la complejidad organizacional, permitiendo a las empresas prosperar en entornos dinámicos y competitivos [36].

#### B. Innovación en la gestión del capital humano

La innovación en la gestión del recurso humano es crucial para el éxito y la sostenibilidad de las organizaciones en un entorno dinámico, el VSM proporciona un marco conceptual robusto para mejorar la eficiencia y la capacidad de adaptación organizacional, abordando la complejidad y promoviendo la autogestión [15]. En el sector hotelero mexicano, la aplicación de conceptos como la autopoiesis y la autoorganización junto con el VSM permite gestionar el personal de manera más efectiva, fomentando la autonomía y el aprendizaje continuo, esenciales para adaptarse a los cambios del mercado [37]. Asimismo, la gestión del capital humano se vuelve fundamental en la implementación del VSM y el Modelo de Complejidad Empresarial (ECM), ya que estos modelos requieren que los empleados se adapten rápidamente, colaboren de manera efectiva y contribuyan al logro de los objetivos organizacionales [23]. La interdependencia de los subsistemas funcionales, incluida la gestión del capital humano, es enfatizada en la transformación de las organizaciones en sistemas "vivos" que se autoorganizan, y se adaptan continuamente mediante enfoques innovadores basados en el VSM [20]. Además, el desarrollo de sistemas de monitoreo y control de KPI sostenibles permite mejorar el rendimiento del personal académico en instituciones educativas, proporcionando datos precisos para la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua del desempeño organizacional [26], [38]. En conjunto, estos enfoques permiten a las empresas enfrentar con éxito los desafíos de un entorno empresarial en constante evolución, asegurando su viabilidad y éxito a largo plazo.

#### C. Diseño de organizaciones competitivas

El diseño de organizaciones competitivas implica la creación de estructuras eficientes que permiten la adaptación rápida a entornos cambiantes. Como ejemplo, sobre la respuesta a desastres, utiliza el VSM para mejorar las estructuras de comunicación, destacando la importancia de corregir debilidades para aumentar la competitividad organizacional [39], [40]. La resiliencia organizacional se fortalece mediante el este modelo, mejorando la capacidad de adaptación en una empresa [24]. En la gestión de proyectos de adquisición de equipos, el VSM optimiza la estructura organizativa, aumentando la eficiencia en entornos inciertos [41].



Además, un sistema de monitoreo de KPI basado en el VSM mejora la eficiencia en instituciones educativas [26]. La innovación en la gestión del capital humano en variedad de sectores, como el hotelero se logra mediante autopoiesis y autoorganización, facilitando la adaptación y eficiencia organizativa [37]. El VSM también se aplica como herramienta de diagnóstico en PyMEs para mejorar la coordinación interna y adaptación [27]. La gestión de la complejidad organizacional se aborda con el Modelo de Complejidad Empresarial, una extensión del VSM, que fomenta la innovación y sostenibilidad [23]. Finalmente, el VSM, brinda un enfoque de viabilidad y sostenibilidad mejorando la resiliencia organizacional [42], [17].

#### 10 D. Diagnóstico sistémico de las organizaciones

El diagnóstico sistémico es esencial para identificar fortalezas, debilidades y áreas de mejora que permitan incrementar su competitividad y sostenibilidad [43]. El uso del VSM y el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) en una pequeña empresa, mejora su resiliencia organizativa al identificar criterios cibernéticos clave y evaluar diferentes arreglos estructurales [24]. Un enfoque similar basado en el VSM y la metodología de Sistemas Suaves se aplica a pequeñas organizaciones artesanales, enfatizando la adaptación a un entorno globalizado [21], [44]. Mediante el VSM, se analiza cómo la gestión innovadora de las empresas, a través de la autopoiesis y autoorganización puede adaptarse para su sostenibilidad a largo plazo [37], [45], [46]. La cibernética organizacional permite analizar y mejorar la sostenibilidad y productividad mediante el diagnóstico de estructura, procesos y relaciones internas [28], [47]. La sostenibilidad en el sector turístico se aborda con herramientas de análisis de redes sociales y metodologías de sistemas blandos para identificar factores críticos y mejorar el rendimiento [45]. Un caso de estudio en Brasil demostró que el VSM y Heurísticas de Sistemas Críticos, optimiza la estructura organizativa y flujos operativos en PyMEs en dicha región [30]. Así como herramienta de diagnóstico en organizaciones, ayuda a identificar problemas de viabilidad y a mejorar sus operaciones [27], [48], [49], [50]. De igual manera propone un marco holístico [51], [52] para la sostenibilidad, abarcando todos los niveles organizativos, con el objetivo de lograr una renovación sostenible [53]. Finalmente, el Modelo de Complejidad Empresarial, una extensión del VSM, proporciona herramientas para gestionar la complejidad y promover la adaptabilidad y autogestión [18], [23].

#### E. Diseño de proyectos de adquisición de equipos

Utilizando los conceptos de viabilidad, los autores demuestran cómo se pueden optimizar los procesos de adquisición, así como de comunicación para mejorar la eficiencia y efectividad de los proyectos. Este enfoque no solo asegura la viabilidad de los proyectos individuales, sino que también contribuye al crecimiento sostenible de la organización en su conjunto [41], como la gobernanza contractual y la medición del desempeño orientado a la sostenibilidad [54], [55].

#### F. Gestión de la información

La idea central es que las organizaciones y sociedades deben procesar y gestionar la información de manera eficiente desde los niveles más bajos hacia los más altos (subsidiaridad), minimizando el flujo innecesario de datos y facilitando la toma de decisiones descentralizadas [56], sustituyendo grandes cantidades de datos con información sintética [57].

## V. CONCLUSIONES

Las aplicaciones del VSM son diversas y demuestran su potencial para contribuir al crecimiento y desarrollo sustentable de las organizaciones. Identificando seis temáticas principales que reflejan su aplicabilidad en la mejora de la viabilidad organizacional. En primer lugar, el VSM favorece la gestión de organizaciones viables al fomentar la autogestión, la adaptación y la resiliencia organizacional. En segundo lugar, el VSM promueve la innovación en la gestión del capital humano, a través de enfoques como la autopoiesis y la autoorganización.

En tercer lugar, el VSM es una herramienta poderosa para el diseño de organizaciones competitivas con su enfoque en la flexibilidad y la descentralización, permitiendo una mejor estructura organizativa y optimización. La cuarta temática, el diagnóstico sistémico de las organizaciones, es otro pilar destacado del VSM, dicho modelo permite una evaluación exhaustiva de las fortalezas y debilidades organizacionales. En quinto lugar, el diseño de proyectos de adquisición de equipos se ve optimizado con el uso del VSM, ya que facilita la coordinación y mejora la eficiencia en procesos clave como la adquisición de recursos y la comunicación interorganizacional. Por último, la gestión de la información dentro del VSM subraya la importancia de procesar y gestionar los datos de manera eficiente a lo largo de los diferentes niveles organizacionales.

Estas aplicaciones destacan cómo el modelo propuesto por Stafford Beer facilita la alineación entre las estructuras internas y las demandas externas, promoviendo así un crecimiento continuo y sustentable.

En la revisión de la literatura sobre la aplicación del VSM en las empresas, se han identificado varias brechas significativas. Entre ellas, se destaca la necesidad de profundizar en la gestión del capital humano más allá de sectores específicos, como ejemplo, el hotelero y turístico. También, es crucial mejorar la resiliencia organizacional en contextos de alta incertidumbre y superar las barreras para la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas innovadoras. Además, se recomienda explorar cómo las políticas públicas podrían fomentar la adopción del VSM en pequeñas y medianas empresas (PyMEs), dado que estas empresas se benefician considerablemente de modelos que mejoren su adaptabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

Finalmente, el desarrollo de estudios de caso más detallados y análisis comparativos que examinen la interacción entre el VSM y otras metodologías de gestión organizacional permitiría un entendimiento más profundo de sus ventajas y limitaciones, proporcionando una base sólida para su implementación en diversos entornos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo al Instituto Politécnico Nacional, a la Secretaría de Investigación y Posgrado, y a la Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Asimismo, al Sistema Nacional de Investigadores del CONAHACYT, al Programa de Estímulo al Desempeño Docente, y al programa de becas nacionales para estudios de posgrado del CONAHACYT, así como a los participantes en esta investigación por su colaboración y disposición.

#### REFERENCIAS

- [1] INEGI, “Censos Económicos 2019. Micro, pequeña, mediana y gran empresa: Estratificación de los establecimientos,” 2020. Accessed: Nov. 01, 2023. [Online]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198657.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198657.pdf)
- [2] INEGI, “Comunicado de Prensa Num. 448/19: Resultados de la Encuesta Nacional sobre Productividad y Competitividad de las MiPyMEs (ENAPROCE) 2018.” [Online]. Available: [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
- [3] G. Pérez-Elizundia, J. A. Delgado-Guzmán, J. F. Lampón, “Commercial banking as a key factor for SMEs development in Mexico through factoring: A qualitative approach,” *European Research on Management and Business Economics*, vol. 26, no. 3, pp. 155-163, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iiedeen.2020.06.001>
- [4] E. Becerra, E. Cortes, “Factores de permanencia empresarial de las microempresas del sector comercio de Puerto Vallarta, Jalisco,” 2018. doi: <https://doi.org/10.23913/ride.v9i17.412>
- [5] A. Jiménez-Rico, K. Galván-Zavala, R. Navarrete-Reynoso, “Financiamiento de las Mipymes en México y su impacto en su esperanza de vida,” *Revista de Desarrollo Económico*, pp. 1-13, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.35429/JED.2020.23.7.1.13>
- [6] A. Fernández, “Red de Aprendizaje en Autotransporte de Carga,” Mexico City, 2018. Accessed: Dec. 02, 2023. [Online]. Available: <https://redesdeaprendizaje.org/Download/Factsheet%20transporte.pdf>

- [7] D. C. Mendez, M. Lehman, "Technology and innovation in Mexico: a perspective from small and medium-sized enterprises (SMEs)," in *Proceedings 2005 IEEE International Engineering Management Conference*, 2005, pp. 160-164. doi: <https://doi.org/10.1109/IEMC.2005.1559110>
- [8] M. Reynolds, S. Holwell, *Systems Approaches to Managing Change: A Practical Guide*, 1st ed., Springer London, 2010. Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84882-809-4>
- [9] M. C. Jackson, *Systems Thinking: Creative Holism for Managers*, 1st ed., USA, 2003.
- [10] S. Vadari, S. R. Parandker, "A systems approach to business excellence to improve the sustainability of an organization," in *2011 Annual IEEE India Conference*, 2011, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/INDCON.2011.6139622>
- [11] S. Gallego, M. García, "Design of a conceptual model for manufacturing companies within the 4th industrial revolution applying the Viable System model," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1193, no. 1, p. 12115, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1193/1/012115>
- [12] R. Espejo, A. Reyes, *Organizational Systems Managing Complexity with the Viable System Model*, USA: Springer, 2011.
- [13] A. Pacheco, M. C. Cruz, *Metodología Crítica de la Investigación. Lógica, procedimiento y técnicas*, México: Grupo Patria, 2006.
- [14] M. J. Page *et al.*, "PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews," *BMJ*, p. n160, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- [15] A. Espinosa, C. Duque, "Complexity management and multi-scale governance: A case study in an Amazonian indigenous association," *Eur J Oper Res*, vol. 268, no. 3, pp. 1006-1020, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.049>
- [16] M. Saviano, L. Nenci, F. Caputo, "The financial gap for women in the MENA region: a systemic perspective," *Gender in Management: An International Journal*, vol. 32, no. 3, pp. 203-217, May 2017, doi: <https://doi.org/10.1108/GM-07-2016-0138>
- [17] A. M. Espinosa, J. Walker, K. Grover, M. V. Vachkova, "The viability and sustainability approach to support organisational resilience: Learning in a recent case study in the health sector," *Syst Res Behav Sci*, vol. 40, no. 4, pp. 689-700, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2951>
- [18] A. Espinosa, *Sustainable self-governance in businesses and society: The viable system model in action*, 2022. doi: <https://doi.org/10.4324/9780429490835>
- [19] K. Dutta, "Exploring Digital Multisided Platforms: A Systems Thinking Approach," *Syst Pract Action Res*, vol. 36, no. 6, pp. 851-876, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11213-023-09631-5>
- [20] I. Fedotova, O. Shersheniuk, M. Prokopenko, I. Britchenko, R. Vazov, "Management of a viable enterprise on the basis of the approach to management of a «living» organization and the concept of viable systems," in *Problems and prospects of development of the road transport complex: financing, management, innovation, quality, safety – integrated approach*, Kharkiv, Ukraine: Privat Company Technology Center, 2021, pp. 63-80. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-45-9.ch5>
- [21] C. Macías Barreto, M. Aguilar Fernández, "Modelo viable de empresa creativa para pequeñas y medianas empresas artesanales," *Nexo Revista Científica*, vol. 34, no. 04, pp. 1129-1139, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i04.12637>
- [22] T. Sadi, J. Wilberg, I. D. Tommelein, U. Lindemann, "Supporting the design of competitive organizations by a domain-specific application framework for the viable system model," in *Sustainability in Modern Project Management - Proceedings of the 18th International DSM Conference*, DSM 2016, 2016, pp. 77-87.
- [23] R. Espejo, "The enterprise complexity model: An extension of the viable system model for emerging organizational forms," *Syst Res Behav Sci*, vol. 38, no. 6, pp. 721-737, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2735>
- [24] J. W. K. Chan, "Enhancing organisational resilience: application of viable system model and MCDA in a small Hong Kong company," *Int J Prod Res*, vol. 49, no. 18, pp. 5545-5563, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.563829>
- [25] S. Gallego-García, M. García-García, "Design and Simulation of an Integrated Model for Organisational Sustainability Applying the Viable System," *Model and System Dynamics*, vol. 567, 2019. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29996-5\\_64](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29996-5_64)
- [26] S. S. Isah, L. S. Sodangi, "Development of sustainable key performance indicator (KPI) monitoring and control system using viable system model," in *3rd International Conference on Digital Information Processing and Communications*, ICDIPC 2013, 2013, pp. 593-599.

- [27] N. Burgess, N. Wake, “The applicability of the Viable Systems Model as a diagnostic for small to medium sized enterprises,” *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 62, no. 1, pp. 29-46, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.1108/17410401311285282>
- [28] V. Bugwandin, M. S. Bayat, “Organisational cybernetics: A systems thinking methoused for small and medium enterprises,” *Acta Commercii*, vol. 23, no. 1, 2023, doi: <https://doi.org/10.4102/ac.v23i1.1092>
- [29] P. D. Panagiotakopoulos, A. Espinosa, J. Walker, “Sustainability management: Insights from the Viable System Model,” *J Clean Prod*, vol. 113, pp. 792-806, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.035>
- [30] O. S. Donaires, M. G. Pinheiro, L. O. Cezarino, L. H. Ostanel, D. P. Martinelli, “Systemic Model for Diagnosis of the Micro, Small and Medium Enterprises from Two Cities from the Countryside of the State of São Paulo in Brazil,” *Systems Pract Action Res*, vol. 23, no. 3, pp. 221-236, Jun. 2010, doi: <https://doi.org/10.1007/s11213-009-9157-5>
- [31] A. Espinosa, “Governance for sustainability: learning from VSM practice,” *Kybernetes*, vol. 44, no. 6-7, pp. 955-969, 2015, doi: <https://doi.org/10.1108/K-02-2015-0043>
- [32] G. J. Lewis, “A cybernetic view of environmental management: the implications for business organizations,” *Bus Strategy Environ*, vol. 6, no. 5, pp. 264-275, 1997, doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-0836\(199711\)6:5<264::aid-bse122>3.0.co;2-k](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-0836(199711)6:5<264::aid-bse122>3.0.co;2-k)
- [33] S. Sankaran, R. Müller, N. Drouin, “Creating a ‘sustainability sublime’ to enable megaprojects to meet the United Nations sustainable development goals,” *Syst Res Behav Sci*, vol. 37, no. 5, pp. 813-826, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2744>
- [34] P. Panagiotakopoulos, A. Espinosa, J. Walker, “Integrated sustainability management for organizations,” *Kybernetes*, vol. 44, no. 6-7, pp. 984-1004, 2015, doi: <https://doi.org/10.1108/K-12-2014-0291>
- [35] A. Akmal, N. Podgorodnichenko, R. Gauld, T. Stokes, “New Zealand Pae Ora Healthcare Reforms 2022: Viable by Design? A Qualitative Study Using the Viable System Model,” *Int J Health Policy Manag*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: <https://doi.org/10.34172/ijhpm.2023.7906>
- [36] J. Stephens, T. Haslett, “A Set of Conventions, a Model: An Application of Stafford Beer’s Viable Systems Model to the Strategic Planning Process,” *Syst Pract Action Res*, vol. 24, no. 5, pp. 429-452, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s11213-011-9194-8>
- [37] J. E. Núñez-Ríos, J. Y. Sánchez-García, R. Tejeida-Padilla, A. L. Coria-Páez, “Human capital management innovation for Mexican lodging through autopoiesis and self-organisation,” in *62nd Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences, ISSS 2018: Innovation and Optimization in Nature and Design*, 2018, pp. 125-140.
- [38] J. E. Yu, “Understanding the Action-based Research for Strategic Change from Systemic Perspectives,” *Global Business and Finance Review*, vol. 26, no. 4, pp. 1-13, 2021, doi: <https://doi.org/10.17549/gbfr.2021.26.4.1>
- [39] G. Preece, D. Shaw, and H. Hayashi, “Application of the Viable System Model to analyse communications structures: A case study of disaster response in Japan,” *Eur J Oper Res*, vol. 243, no. 1, pp. 312-322, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.026>
- [40] M. Schwaninger, “Governance for intelligent organizations: a cybernetic contribution,” *Kybernetes*, vol. 48, no. 1, pp. 35-57, 2019, doi: <https://doi.org/10.1108/K-01-2018-0019>
- [41] S. Jun-Feng, L. Wo-Ye, “Design of Equipment Procurement Project Organization Based on Viable Systems Model,” *Procedia Eng*, vol. 24, pp. 809-815, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2742>
- [42] J. Y. Sánchez-García, A. G. Ramírez-Gutiérrez, J. E. Núñez-Ríos, P. P. Cardoso-Castro, O. G. Rojas, “Systems Thinking Approach to Sustainable Performance in RAMSAR Sites,” *Sustainability*, vol. 11, no. 22, p. 6469, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/su11226469>
- [43] M. Schwaninger, “Systemic design for sustainability,” *Sustain Sci*, vol. 13, no. 5, pp. 1225-1234, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0538-5>
- [44] C. Macías-Barreto, M. Aguilar-Fernández, “Soft Systems Methodology Applied to Design Processes in an Artisan Enterprise,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 28, no. 2, pp. 308-322, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.29>
- [45] J. E. Núñez-Ríos, J. Y. Sánchez-García, A. Ramirez-Nafarrate, “Sustainable performance in tourism SMEs: a soft modeling approach,” *Journal of Modelling in Management*, vol. 18, no. 6, pp. 1717-1739, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2021-0136>
- [46] A. Espinosa, T. Porter, “Sustainability, complexity and learning: Insights from complex systems approaches,” *Learning Organization*, vol. 18, no. 1, pp. 54-72, 2011, doi: <https://doi.org/10.1108/09696471111096000>
- [47] M. Tannir, G. Mills, I. Krystallis, J. Kalra, “Governance, cooperation and coordination in large inter-organisational project networks: a viable system perspective,” *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 44, no. 3, pp. 617-642, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2022-0485>

- [48] J. E. Núñez-Ríos, J. Y. Sánchez-García, “Determining the Factors to Improve Sustainable Performance in a Medium-Sized Organization,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 16, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16166937>
- [49] A. K. Singh, D. K. Pathak, S. Patra, “An integrated systems thinking approach for achieving sustainability in project-based organizations,” *Syst Res Behav Sci*, vol. 40, no. 3, pp. 501-535, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2892>
- [50] A. Tong, J. Calvo, K. R. Haapala, “Integration of Sustainability Indicators and the Viable System Model Towards a Systemic Sustainability Assessment Methodology,” *Syst Res Behav Sci*, vol. 35, no. 5, pp. 564-587, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/sres.2553>
- [51] B. Moore, J. Calvo-Amodio, J. F. Junker, “Synthesizing systemic intervention approaches: Combining viable system model, knowledge management, and Toyota production system for a sustainable holistic management model,” in *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences*, 2015.
- [52] I. Perko, G. del Gaudio, V. Potocan, “Sustainable supply chains – Designing a requisite holistic model,” *Business Ethics, the Environment & Responsibility*, Jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.1111/beer.12707>
- [53] M. Schwaninger, “Organizing for sustainability: a cybernetic concept for sustainable renewal,” *Kybernetes*, vol. 44, no. 6-7, pp. 935-954, 2015, doi: <https://doi.org/10.1108/K-01-2015-0008>
- [54] B. Enquist, C. Camén, M. Johnson, “Contractual governance for public service value networks,” *Journal of Service Management*, vol. 22, no. 2, pp. 217–240, 2011, doi: <https://doi.org/10.1108/09564231111124235>
- [55] K. Panagiotidis, N. Tsolakis, A. Tsigkas, “Overcoming critical failure factors in enterprise information systems implementation: A viable system model framework for manufacturing firms,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 74, no. 7, pp. 1670-1689, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2108734>
- [56] J. M. Díaz-Nafría, *Cyber-subsidiarity: Toward a global sustainable information society*, 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09069-6\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09069-6_39)
- [57] J. M. Díaz-Nafría, M. Cañizares-Espada, I. Seoane-Pujol, J. A. Montaña-Gómez, T. Guarda, *Enabling Sustainable Management Through Kalman Filtering in glossaLAB: A Case Study on Cyber-Subsidiarity*, Springer, 2022. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4884-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4884-7_5)



## Sistema de detección de insuficiencia cardíaca congestiva en señales de ECG a través de aprendizaje máquina

Detection system of congestive heart failure in ECG signals through machine learning

Aldair Ascencio Salazar<sup>1</sup>, Ángel Humberto Corral Domínguez<sup>2</sup>  
Fortunato Ramírez Arzate<sup>3</sup>, José Ricardo Cárdenas Valdez<sup>4</sup>

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0009-0003-2082-8518 | aldair.ascencio193@tectijuana.edu.mx

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-2009-6161 | angel.corral@tectijuana.edu.mx

<sup>3</sup>ORCID: 0009-0009-6107-1826 | fortunato.ramirez@tectijuana.edu.mx

<sup>4</sup>ORCID: 0000-0002-5437-8215 | jose.cardenas@tectijuana.edu.mx

Recibido 09-09-2024, aceptado 29-10-2024.

### Resumen

Las enfermedades cardiovasculares, como la insuficiencia cardíaca congestiva, son una de las principales causas de mortalidad global y deterioran la calidad de vida. El electrocardiograma, eficiente y no invasivo, es esencial para detectar la insuficiencia cardíaca congestiva mediante el análisis de la actividad eléctrica del corazón. Este trabajo integra el aprendizaje automático supervisado en el análisis del electrocardiograma, utilizando modelos de clasificación para distinguir entre señales normales y aquellas afectadas por la insuficiencia cardíaca congestiva. Se desarrolla una plataforma web para apoyar la investigación y el desarrollo de sistemas de telemedicina, facilitando la clasificación de señales de electrocardiograma de manera automática y contribuyendo al diagnóstico médico a distancia, el registro de datos, y las consultas médicas. El presente trabajo demuestra que los modelos utilizados alcanzan una precisión de hasta el 99%, con solo cinco errores en 720 muestras de prueba. No obstante, la generalización del sistema puede verse limitada por la variabilidad en las señales y las condiciones de adquisición. La principal contribución de este trabajo es la investigación de rasgos específicos del electrocardiograma para entrenar modelos de clasificación, ofreciendo técnicas de utilidad para futuras investigaciones en entornos clínicos.

**Palabras clave:** Análisis de señales, aprendizaje máquina, clasificación, electrocardiograma, plataforma web.

### Abstract

Cardiovascular diseases, such as congestive heart failure, are leading causes of global mortality and deteriorate quality of life. The electrocardiogram, efficient and non-invasive, is essential for detecting congestive heart failure by analyzing the heart's electrical activity. This work integrates supervised machine learning into electrocardiogram analysis, using classification models to distinguish between normal signals and those affected by congestive heart failure. A web platform is developed to support research and the development of Telemedicine systems, facilitating the automated classification of electrocardiogram signals and contributing to remote medical diagnosis, data recording, and medical consultations. The present study demonstrates that the models used achieve up to 99% accuracy, with only five errors in 720 test samples. However, the system's generalization may be limited by signal variability and acquisition conditions. The main contribution of this work is the investigation of specific electrocardiogram features to train classification models, offering useful techniques for future research in clinical settings.

**Index terms:** Classification, electrocardiogram, signal analysis, machine learning, web platform.



## GLOSARIO

- CSV: Valores Separados por Comas (*Comma-Separated Values*).
- ECG: Electrocardiograma.
- HTTP: Protocolo de Transferencia de Hipertexto (*Hypertext Transfer Protocol*).
- ICC: Insuficiencia Cardíaca Congestiva.
- K-NN: K-Vecinos más cercanos (*K-Nearest Neighbors*).
- PDF: Función de Densidad de Probabilidad (*Probability Density Function*).
- ResNet: Redes Neuronales Residuales.
- RN: Redes Neuronales.
- SFTP: Protocolo Seguro de Transferencia de Archivos (*Secure File Transfer Protocol*).
- SVM: Máquinas de Vectores de Soporte (*Support Vector Machines*).
- VM: Máquina Virtual.
- VPP: Valor Predictivo Positivo.
- WFDB: *Python Waveform-Database*.

## I. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares, incluida la ICC, son una de las principales causas de mortalidad y afectan significativamente la calidad de vida. El ECG, eficiente y no invasivo, es esencial para detectar la ICC mediante el análisis de la actividad eléctrica del corazón [1]. Ante las limitaciones del diagnóstico empírico, el cual depende de la interpretación subjetiva del médico, la incorporación del aprendizaje automático en el diagnóstico de la ICC mediante señales de ECG surge como una solución innovadora. El presente trabajo aplica técnicas de aprendizaje automático supervisado para analizar patrones en señales de ECG, ofreciendo un sistema de detección que puede asistir tanto en el diagnóstico como en la formación de especialistas y médicos en entrenamiento.

Es importante señalar que este trabajo representa una prueba de concepto y no ha sido evaluado en un entorno clínico real, por lo que no se puede afirmar que optimice el proceso de diagnóstico. Los resultados obtenidos muestran el potencial del sistema, pero se requieren evaluaciones adicionales para validar su efectividad en entornos clínicos.

La problemática central que aborda este trabajo es la falta de procesos automáticos y métodos tecnológicos para interpretar señales de ECG en el diagnóstico de ICC. Desde una perspectiva de ingeniería, es crucial aplicar métodos estadísticos y de análisis de datos para descubrir patrones y características significativas en las señales de ECG, adaptándose a la variabilidad individual de los pacientes y a las condiciones de adquisición de las señales. La solución propuesta es un sistema que identifica características de la ICC mediante aprendizaje automático, con el objetivo de ofrecer mediciones y análisis más objetivos para la detección de la enfermedad y proporcionar soporte tecnológico en la toma de decisiones de estudiantes y médicos generales.

En este artículo, el contenido se estructura de la siguiente manera: en la sección II, "Estado del Arte y Comparación con Otros Métodos", se discuten investigaciones previas y las metodologías empleadas para el análisis de señales de ECG, destacando las diferencias y similitudes con el presente trabajo. La sección III, "Teoría de Respaldo", ofrece una explicación detallada de las señales de ECG, la ICC y las técnicas de aprendizaje automático utilizadas en este trabajo, incluyendo SVM, K-NN y RN. En la sección IV, "Desarrollo", se describe el proceso técnico de extracción de características de las señales de ECG y la creación de la plataforma web para la interacción con el sistema de clasificación. La sección V, "Resultados", presenta las

métricas de desempeño de los modelos propuestos y la evaluación de los rasgos extraídos. Finalmente, en la sección VI, "Conclusiones", se resumen los hallazgos principales, se discuten las limitaciones del trabajo y se sugieren direcciones futuras para la investigación.

## II. ESTADO DEL ARTE Y COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

La aplicación de modelos de aprendizaje automático se ha extendido a diversos campos de la investigación científica debido a sus eficientes funciones, como la predicción de casos y el análisis de datos. Estas técnicas se han utilizado para la detección de enfermedades a través del análisis de bioseñales del cuerpo humano. Un área donde esta aplicación ha sido particularmente relevante es en el análisis de señales de ECG para la identificación de la ICC.

Dentro de esta área, el trabajo [2] destaca por la aplicación de RN recurrentes en señales de ECG con ICC. Esta investigación se enfoca en el preprocesamiento y normalización de las señales de ECG, utilizando segmentos de 1 a 4 segundos para entrenar el modelo. Los resultados muestran una notable capacidad de las RN para detectar características relevantes de la ICC en segmentos cortos, demostrando su eficiencia con muestras de tamaño limitado. A diferencia de este enfoque, el presente trabajo emplea técnicas adicionales de análisis, como la extracción de características relacionadas con la entropía, diferencias morfológicas en la señal y análisis de la energía en diferentes bandas de frecuencia. Además, se exploran y comparan múltiples modelos de aprendizaje automático, como SVM y K-NN, ampliando las estrategias para analizar segmentos de señales de ECG y evaluando su desempeño en diferentes condiciones.

Por otro lado, la investigación [3] utiliza ResNet con una arquitectura multi-escala para analizar las señales de ECG a diferentes niveles de detalle. Este enfoque permite la identificación precisa de los indicadores de ICC, resaltando la importancia de capturar una amplia variedad de características. Aunque este método resulta efectivo en la detección de ICC, el enfoque aquí presentado se diferencia al ampliar las técnicas de extracción y análisis de rasgos. Además, este trabajo propone métodos para validar la efectividad de los rasgos extraídos, no solo mediante modelos neuronales, sino también a través de otras técnicas de clasificación. Adicionalmente, se desarrolla una plataforma web que incluye un sistema de interacción con el usuario para facilitar la clasificación de señales.

En la misma línea, los trabajos [4] y [5] presentan metodologías relevantes para el desarrollo de sistemas de detección de ICC mediante el análisis de señales de ECG. Ambos estudios obtienen resultados óptimos al implementar modelos de clasificación, incluyendo SVM y K-NN, con un análisis de rasgos tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, usando técnicas como *wavelets* para obtener características como la entropía de la señal. Estos métodos sientan las bases para la identificación de rasgos distintivos en las señales de ECG, tanto en casos de ICC como en casos normales. El presente trabajo se basa en estos estudios para identificar rasgos importantes y propone nuevas formas de extracción de rasgos, como la combinación de análisis morfológico y energético. Además, se evalúa la utilidad de estos rasgos mediante pruebas controladas, demostrando su efectividad o limitaciones en la clasificación de señales de ECG con ICC.

Este proyecto se distingue de las investigaciones anteriores principalmente por la investigación de más rasgos característicos que se pueden extraer de las señales de ECG de pacientes con ICC. Esto permite clasificar, a través de modelos de aprendizaje automático, las señales como indicativas de la enfermedad o sanas, contribuyendo al campo de la medicina con nuevas perspectivas de análisis. Además, se enfoca en la implementación de una plataforma web funcional, lo que no se aborda en los trabajos citados. Mientras que las investigaciones previas se centran en el análisis técnico y procesamiento de señales de ECG, el desarrollo de la plataforma web en este trabajo permite la interacción directa de los usuarios con el sistema. Esto puede facilitar la clasificación de señales de manera práctica y abre la posibilidad de integrar la tecnología en aplicaciones clínicas y educativas, incrementando su potencial de impacto en la práctica médica real.

### III. TEORÍA DE RESPALDO

Entender el comportamiento de las señales de ECG es crucial para identificar los indicadores de ICC presentes en estas señales. Las señales de ECG constituyen la base de datos principal utilizada en este trabajo para el análisis y procesamiento necesarios para desarrollar el sistema capaz de detectar esta enfermedad.

El análisis comienza estableciendo las características normales del ECG y del ritmo sinusal, lo cual permite distinguir entre un funcionamiento cardíaco saludable y posibles anomalías. El ECG es un registro de los potenciales eléctricos originados por la actividad cardíaca. La ICC provoca cambios significativos en las señales de ECG, como alteraciones en la morfología del complejo QRS, variaciones en la onda T, y la presencia de ondas Q patológicas. Estos cambios indican condiciones como el agrandamiento ventricular y la hipertrofia, comúnmente asociadas con estados avanzados de la enfermedad [6].

Además, la presencia de arritmias, evidenciada por irregularidades en el ritmo sinusal, puede ser indicativa de ICC. La frecuencia cardíaca puede aumentar como un mecanismo compensatorio o presentar ritmos anormales que sugieren un compromiso en la capacidad del corazón para mantener una circulación adecuada [7][8].

Este trabajo utiliza registros de pacientes con ICC en clases III-IV, obtenidos del repositorio de *PhysioNet* [9][10]. Estas señales de ECG provienen de pacientes de tercera edad con severas limitaciones en su capacidad para realizar actividades físicas, experimentando síntomas como fatiga, palpitaciones y disnea incluso en reposo. También se emplean señales de ritmo sinusal normal del repositorio *PhysioNet* [11] para la distinción entre las dos clases (señales de ECG normales y afectadas por la enfermedad).

#### A. Aprendizaje máquina

El aprendizaje máquina juega un papel crucial en la identificación y clasificación de señales de ECG asociadas con la ICC, permitiendo el desarrollo de sistemas de diagnóstico avanzados. Para la integración de esta tecnología, una etapa importante es la adquisición y el preprocesamiento de las señales de ECG para eliminar ruido y estandarizarlas, preparándolas para el análisis [12]. Se realiza la extracción de características, identificando rasgos significativos que diferencian condiciones saludables como las explicadas en [6] de las patológicas, resaltando los aspectos más relevantes relacionados con la ICC.

Al aplicar los modelos predictivos de aprendizaje máquina y ser entrenados con datos históricos extraídos de las señales, estos aprenden a identificar patrones y hacer predicciones o clasificaciones sobre nuevos datos [13]. En este trabajo, los modelos se entrenan para distinguir entre señales de ECG normales y aquellas alteradas por la ICC. Los modelos seleccionados para la clasificación de la enfermedad en este trabajo son SVM, K-NN y RN.

#### B. Máquinas de Vectores de Soporte

SVM es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado en problemas de clasificación y regresión, que incluye aplicaciones en medicina, procesamiento del lenguaje natural y reconocimiento de imágenes y voz. Su objetivo es encontrar un hiperplano que separe dos clases de datos con el mayor margen posible. En problemas prácticos, SVM maximiza el margen permitiendo algunas clasificaciones erróneas, lo que ha demostrado ser eficaz en la detección de insuficiencia cardíaca a partir de señales de ECG [14].

Los vectores de soporte son un subconjunto de las observaciones de entrenamiento que determinan la ubicación del hiperplano. Aunque SVM está formulado para clasificación binaria, los problemas multiclase se abordan mediante una serie de problemas binarios, como se ha aplicado en la clasificación de arritmias mediante señales de ECG [15]. Para la detección de la ICC en este trabajo, SVM aprovecha las alteraciones características en la

señal de ECG, como la amplitud de la onda T y la longitud del complejo QRS, proporcionando parámetros necesarios para diferenciar y clasificar las señales.

### C. *K-Vecinos más cercanos*

El algoritmo KNN es un método de clasificación supervisado que no depende de parámetros específicos y se basa en la proximidad de los datos para realizar predicciones o clasificaciones. Parte de la premisa de que las observaciones con características similares tienden a estar ubicadas cerca unas de otras [16].

- ↳ En los problemas de clasificación, KNN asigna una etiqueta de clase a un nuevo punto de datos basándose en el voto mayoritario de sus  $k$  vecinos más cercanos en el conjunto de entrenamiento. La selección del valor de  $k$ , que representa el número de vecinos considerados, es crucial para la precisión del modelo. Un valor de  $k$  bajo puede hacer que el modelo sea sensible al ruido en los datos, mientras que un valor de  $k$  alto puede diluir las influencias locales importantes [17][18]. En el contexto de la detección de ICC utilizando KNN, la proximidad entre las muestras de ECG permite que el modelo distinga con precisión entre señales de ECG normales y aquellas que indican ICC [19].

### D. *Redes neuronales*

Las RN son modelos inspirados en el cerebro humano, utilizados para tareas de clasificación y regresión en el aprendizaje automático. Están compuestas por capas de neuronas interconectadas que procesan información a través de funciones de activación. Este diseño permite a las RN aprender representaciones complejas y manejar problemas no lineales eficientemente [20].

En el contexto de señales de ECG, las RN se utilizan para detectar y clasificar anomalías cardíacas, como la ICC. Al entrenar las RN con grandes volúmenes de datos de ECG, pueden identificar patrones y características relevantes que indican enfermedades cardíacas. Esta capacidad de aprender y generalizar a partir de datos complejos las hace herramientas valiosas en la mejora de diagnósticos clínicos [21].

La selección y aplicación de los tres modelos (SVM, K-NN y RN) proporcionan robustez al sistema, permitiendo interpretar y clasificar eficazmente las señales de ECG. El usuario puede elegir el modelo con el que desea clasificar la señal de entrada, asegurando un respaldo más sólido en los resultados mediante comparaciones entre los diferentes métodos de clasificación.

### E. *Tecnologías web*

En el desarrollo de este trabajo, se aprovechan las tecnologías web y los servicios en la nube de *Google Cloud* para crear una plataforma en línea accesible. Se utiliza una VM con *Ubuntu*, alojada en *Google Cloud*, que sirve como núcleo del servidor web. Esta VM gestiona la base de datos, credenciales y recursos necesarios para el sistema de clasificación, proporcionando flexibilidad en la configuración y aislamiento de procesos. Además, los servicios en la nube permiten el acceso a recursos computacionales bajo demanda, ofreciendo una solución escalable y eficiente para la gestión y actualización remota del contenido web desde cualquier ubicación.

### F. *Tecnologías de vanguardia*

Las tecnologías y modelos de aprendizaje automático utilizados en este trabajo, como SVM, K-NN, y RN, se consideran métodos avanzados y ampliamente aplicados en el análisis de señales biomédicas, incluyendo las señales de ECG. Esto se respalda con los diversos estudios realizados en este campo, como los que se mencionan en la sección II “Estado del Arte”. La implementación de una plataforma web basada en servicios en la nube de *Google Cloud* también refleja la vanguardia en la gestión y procesamiento de datos a gran escala, permitiendo un acceso remoto y eficiente a los recursos computacionales. Al combinar estas tecnologías de última generación, este proyecto ofrece un enfoque integral y moderno para la detección de la ICC, alineándose con las tendencias actuales en el campo de la bioingeniería y la medicina digital.

#### IV. DESARROLLO

En esta sección se redacta el desarrollo para la creación del sistema de detección de la ICC. Se explica el procedimiento técnico del proceso en la extracción de características de las señales de ECG de señales normales y aquellas afectadas por la enfermedad, además del desarrollo de la plataforma web para la interacción con el sistema. En la Figura 1 se ilustra el diagrama del marco de trabajo de aprendizaje automático seguido en este trabajo. A lo largo del documento se explica cada uno de los elementos que lo conforma.

6

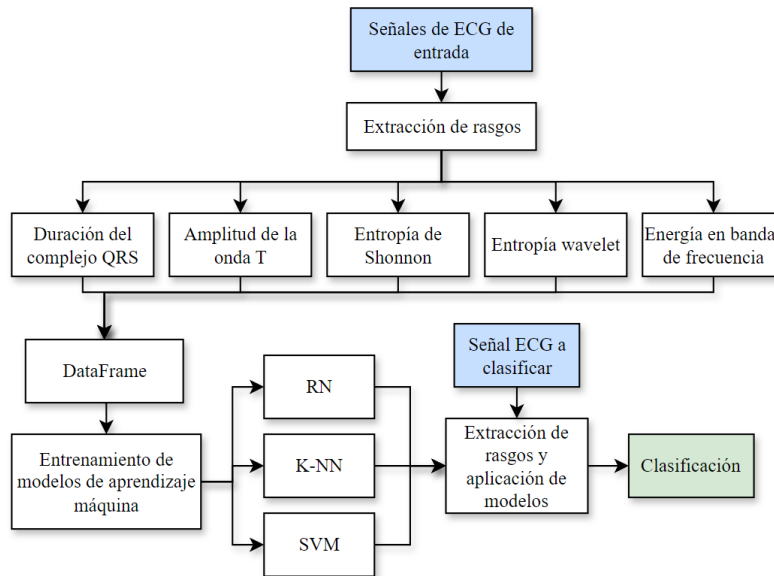


Fig. 1. Diagrama del marco de trabajo de aprendizaje automático.

##### A. Extracción de rasgos

En el desarrollo del sistema de detección, la extracción de rasgos de las señales de ECG y la implementación del aprendizaje máquina, incluyendo el entrenamiento de los modelos, se llevan a cabo utilizando el lenguaje de programación *Python*. El primer paso en el desarrollo del sistema implica la extracción de rasgos característicos de las señales de ECG. Este proceso se realiza tanto para señales de individuos sanos con ritmo sinusal normal, como para señales de pacientes diagnosticados con ICC de grado III-IV. Inicialmente, es necesario descargar estas señales desde los bancos de datos. Las señales seleccionadas, tanto patológicas como normales, se almacenan en una carpeta para facilitar el análisis posterior.

Las señales de ECG obtenidas de *PhysioNet* están codificadas en un formato binario para optimizar el almacenamiento. Para procesar y analizar estas señales, se utiliza la librería *WFDB*. Esta herramienta es esencial para la manipulación de los datos de ECG, ya que permite leer, escribir y procesar eficientemente las señales junto con sus anotaciones médicas. Tras importar la biblioteca *WFDB*, es posible obtener información de las señales contenidas en los archivos tipo *.dat*, como el número de señales disponibles, la frecuencia de muestreo, el nombre de las señales y su longitud.

Para mejorar la calidad de las señales de ECG, se aplican diversos filtros diseñados para eliminar el ruido y conservar las frecuencias relevantes para el análisis. El filtro *Notch* se utiliza específicamente para eliminar el ruido de la línea eléctrica, generalmente a 50 o 60 Hz. Los filtros pasa alta y pasa baja se configuran para mantener un rango de frecuencias útil, típicamente entre 0.5 Hz y 50 Hz, que es donde se encuentran la mayoría

de los componentes significativos de la señal de ECG. Este proceso requiere de las librerías de *scipy.signal* para aplicar los filtros *Notch*, pasa alta y pasa baja. La función *filtfilt* se utiliza específicamente para asegurar que la fase de la señal no se altere durante el filtrado. En la Figura 2, se ilustra parte de la señal de ECG de un paciente con ICC antes de aplicar los filtros seleccionados, mientras que en la Figura 3 se muestra un ejemplo del suavizado del ruido, donde las mínimas distorsiones presentes en la serie se han reducido.

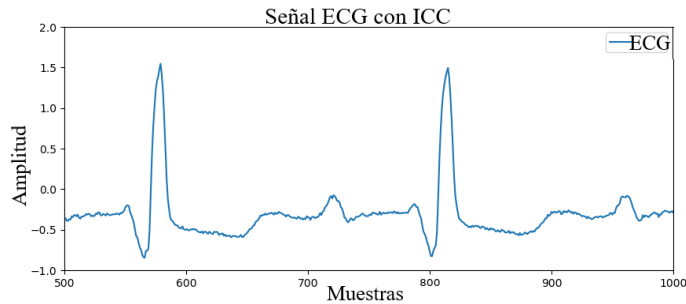


Fig. 2. Señal ECG original sin filtros.

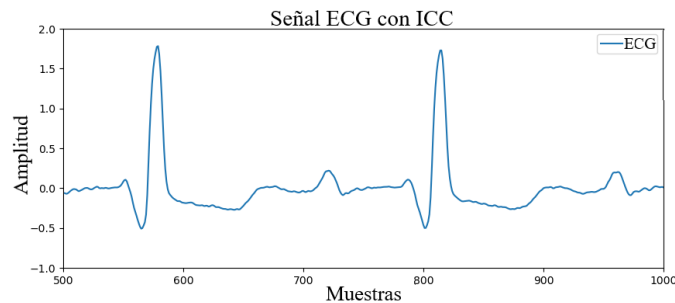


Fig. 3. Aplicación de filtros a señal ECG.

Una vez filtrada la señal de ECG, el siguiente paso consiste en procesar las anotaciones médicas asociadas a los datos. Se seleccionan las anotaciones marcadas con el símbolo *N*, que indican cada latido y están centradas en el pico R del ECG. Este enfoque permite focalizar el análisis en cada latido y en el complejo completo PQRST. Se aplica una ventana de análisis alrededor de cada anotación *N* para garantizar que se capturen todos los rasgos relevantes del latido. En la Figura 4, se ilustra un ejemplo de la aplicación de la ventana de análisis en el ECG para la extracción de rasgos, así como la ubicación de las anotaciones médicas.

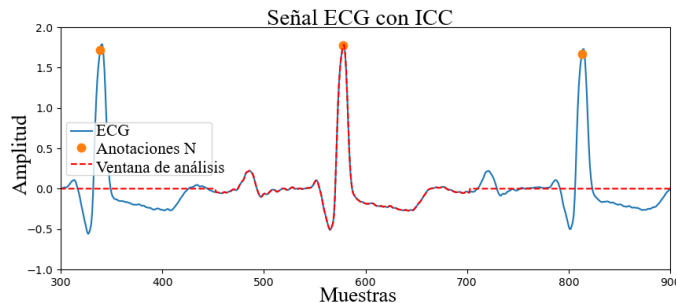


Fig. 4. ECG con ventana de análisis y anotaciones.



Con los picos R de la señal identificados gracias a las anotaciones y la aplicación de la ventana de análisis centrada en cada uno de ellos, se utilizan ciclos para iterar a través de estos puntos en la señal. Para cada pico R, se establece la ventana de análisis que define el segmento específico del latido a examinar. Este enfoque segmentado permite que el análisis se centre solo en la sección abarcada, evitando el procesamiento innecesario de toda la serie fuera de la ventana y acelerando la extracción de rasgos. Dentro de cada segmento definido, se busca confirmar la presencia del pico R, que valida el segmento. Si se detecta un pico R, se procede a extraer los rasgos característicos del latido en cuestión.

### B. Duración del complejo QRS

∞

El primer rasgo es la duración del complejo QRS. Se selecciona esta característica debido a que las señales de pacientes con ICC presentan una mayor duración y amplitud del complejo QRS en comparación con las señales normales. La diferencia en la duración del complejo QRS, medida en segundos, es un rasgo significativo para la clasificación.

Para calcular la duración del complejo QRS, se identifica la amplitud del pico R en el segmento de la señal y se define un umbral basado en el 10% de esta amplitud. Se procede a buscar hacia atrás desde el pico R para encontrar el inicio del complejo QRS y hacia adelante para encontrar el final del complejo. Por lo tanto, la duración del complejo QRS se calcula en muestras y luego se convierte a segundos. En la Figura 5 y Figura 6 se ilustra la diferencia de duración entre señales con ICC y normales.

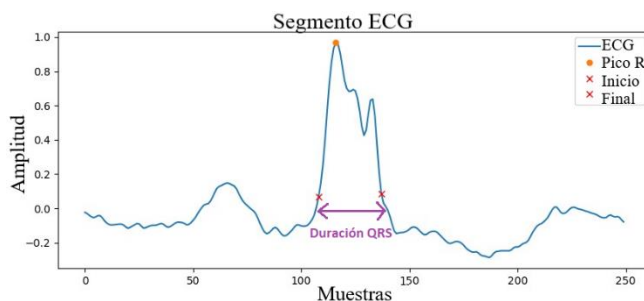


Fig. 5. Duración del complejo QRS, segmento ECG con ICC.

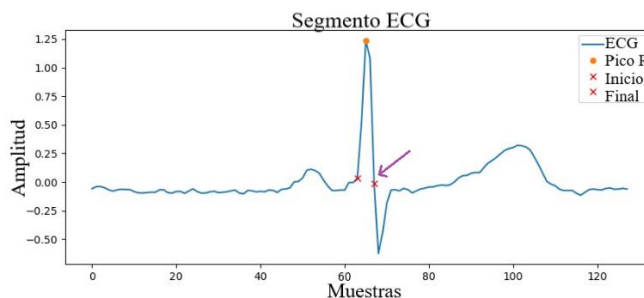


Fig. 6. Duración del complejo QRS, segmento ECG normal.

### C. Amplitud de la onda T

El siguiente rasgo es la amplitud de la onda T, que se diferencia entre señales normales y aquellas afectadas por ICC. Este rasgo se selecciona debido a que, en los registros de pacientes con ICC, la onda T presenta una amplitud negativa, mientras que en las señales normales la amplitud es positiva. La diferencia de signo entre las amplitudes permite que este rasgo sea un discriminador eficaz, especialmente en el modelo SVM, que aprovecha estas diferencias para mejorar la clasificación.

9

Para calcular la amplitud de la onda T, se define un rango de búsqueda específico después del final del complejo QRS. En el código, se establece el rango de búsqueda entre 0.2 y 0.4 segundos después del complejo QRS. Para las señales con ICC, el proceso implica invertir la señal en la ventana para detectar los valles como picos. Luego, se buscan picos en la señal invertida, que corresponden a los valles en la señal original. Se selecciona el valle más profundo, identificado como un pico en la señal invertida, para determinar la amplitud de la onda T. Para las señales normales se busca directamente el pico positivo de la onda T sin invertir la señal. Esto se hace buscando picos en la señal original dentro del mismo rango de búsqueda. Se selecciona el más prominente para determinar la amplitud de la onda T. En la Figura 7 y Figura 8 se ilustra esta diferencia entre amplitudes en cada caso.

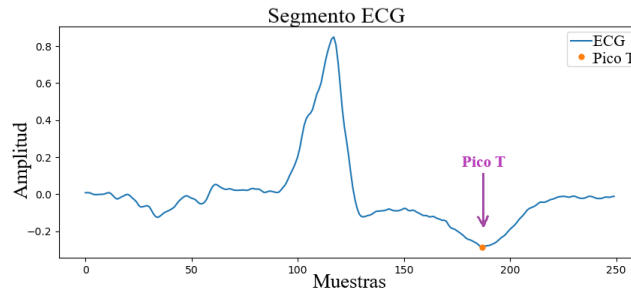


Fig. 7. Amplitud onda T, segmento ECG con ICC.

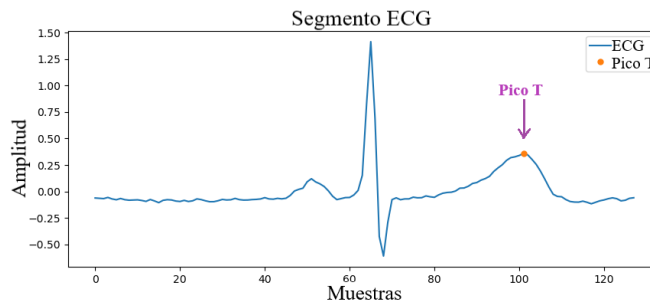


Fig. 8. Amplitud onda T, segmento ECG normal.

#### D. Entropía de Shannon

Al buscar rasgos distintivos que representen características únicas de cada tipo de señal, se exploraron diversas técnicas y métodos. Uno de los rasgos que muestra resultados significativos y una clara separación entre clases es la entropía de *Shannon*.

Para calcular la entropía de *Shannon* de la señal de ECG, primero se ajusta la señal para que todos los valores sean positivos. Después, la señal se normaliza dividiendo cada valor por la suma total de la señal, de esta manera se asegura que los valores formen una distribución de probabilidad. Finalmente, se aplica la función de entropía de *Shannon* de la biblioteca *scipy.stats*, que mide la cantidad de incertidumbre presente en la señal. La entropía de *Shannon* se define matemáticamente como la ecuación (1):

$$H(P) = - \sum_i p_i \log(p_i) \quad (1)$$

donde  $p_i$  son las probabilidades de los diferentes eventos en la distribución  $P$  [22]. Este rasgo es útil porque las señales de ECG de pacientes con ICC suelen mostrar patrones más complejos y variables, lo que se refleja en una entropía más alta en comparación con las señales de individuos sanos.

10

### E. Entropía wavelet

La entropía *wavelet* es otro de los rasgos seleccionados debido a las diferencias de resultados entre las dos clases. Para calcular la entropía *wavelet* de la señal de ECG, se descompone el segmento de la señal al utilizar la función *wavedec* de la biblioteca *PyWavelets*, que aplica la transformada *wavelet* discreta a la señal. Los coeficientes resultantes se utilizan para calcular la energía en cada nivel de detalle. Esta energía se normaliza respecto al total de energía, y se aplica la fórmula de entropía de *Shannon* a la distribución de energía para obtener la entropía *wavelet*.

La entropía resultante proporciona una medida de la complejidad de la señal de ECG, permitiendo diferenciar entre señales normales y patológicas, como se ha demostrado en trabajos previos [23]. Este rasgo es útil porque las señales de ECG de pacientes con ICC tienden a tener una distribución de energía más dispersa en los coeficientes *wavelet*, reflejando una mayor complejidad y variabilidad en comparación con las señales de individuos sanos.

### F. Cálculo de la energía en bandas de frecuencia

El quinto rasgo extraído para el sistema de clasificación es la suma de la energía en las bandas de frecuencia. Este rasgo se basa en la distribución de energía dentro de ciertas bandas de frecuencia de la señal de ECG, ya que proporciona información sobre las características de la señal y permite diferenciar entre señales sanas y aquellas con ICC. Para calcular la energía de banda, se utiliza la transformada *wavelet* continua, que permite analizar la señal en diferentes escalas y frecuencias. Esta técnica de análisis, que utiliza *wavelets* y energía, ha sido empleada en trabajos para la clasificación de señales ECG, como se demuestra en el trabajo [24].

Se define un rango de escalas de 1 a 128 y se aplica la transformada *wavelet* continua a la señal de ECG segmentada utilizando la *wavelet cmor*. Esto produce un conjunto de coeficientes y frecuencias que representan la señal en diferentes niveles de detalle. Luego, se calcula la energía de banda sumando los cuadrados de los coeficientes absolutos dentro del rango de 1 a 127. Esta suma representa la energía contenida en esas bandas de frecuencia específicas y proporciona el valor utilizado para distinguir entre señales de ECG sanas y señales con ICC.

En la Figura 9 y Figura 10 se ilustra la diferencia en la distribución de energía entre los dos tipos de señales. El segmento afectado por la enfermedad presenta una mayor distribución de energía en los rangos de frecuencia, indicado en color rojo su magnitud. En contraste, el escalograma de las señales normales muestra una distribución de energía más concentrada y de menor magnitud en los mismos rangos de frecuencia. La escala de colores representa la magnitud de la energía, donde los colores más cálidos (rojo y amarillo) indican una mayor magnitud, mientras que los colores más fríos (verde y azul) representan una menor magnitud.

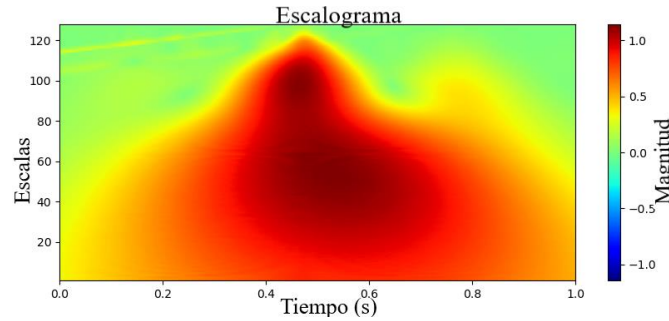


Fig. 9. Energía en bandas de frecuencia, segmento ECG con ICC.

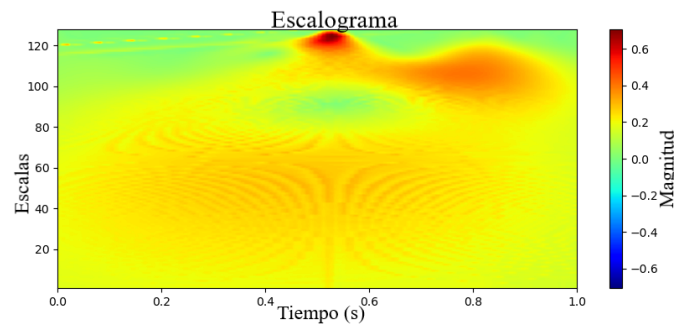


Fig. 10. Energía en bandas de frecuencia, segmento ECG normal.

### G. Preparación y etiquetado de datos

La preparación y etiquetado de datos es una fase crucial en el desarrollo de sistemas de clasificación basados en aprendizaje automático, ya que garantiza la calidad y relevancia de la información utilizada para el entrenamiento. En este trabajo, se obtuvieron un total de 2400 muestras de señales de ECG, que se dividieron equitativamente en dos categorías: el 50% corresponde a segmentos de ICC, etiquetados con el número 1, mientras que el otro 50% corresponde a señales de ECG normales, etiquetadas como 0. Este balance en las clases es fundamental para evitar sesgos en el entrenamiento de los modelos, asegurando que ambos tipos de señales sean considerados de manera justa.

Después de etiquetar los datos, estos se almacenaron en un *DataFrame* y se guardaron en un archivo CSV, un formato adecuado para el manejo y procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos. Este conjunto de datos etiquetados es esencial para el entrenamiento y validación de los modelos de aprendizaje automático utilizados en este trabajo, proporcionando la base necesaria para que los algoritmos puedan aprender a diferenciar entre señales normales y patológicas con precisión.

### H. Red neuronal

Para el desarrollo del modelo de red neuronal, se utiliza una arquitectura secuencial en la que se incorporaron varias capas densas. La entrada del modelo consiste en los rasgos extraídos de las señales de ECG. La red neuronal está compuesta por la capa de entrada que recibe estos rasgos, seguida de tres capas densas con activaciones *leaky\_relu* y tamaños de 1024, 1024 y 512 neuronas, respectivamente. La capa de salida consta de una neurona con activación *sigmoid* para realizar la clasificación binaria. La Figura 11 ilustra esta arquitectura de la red neuronal.

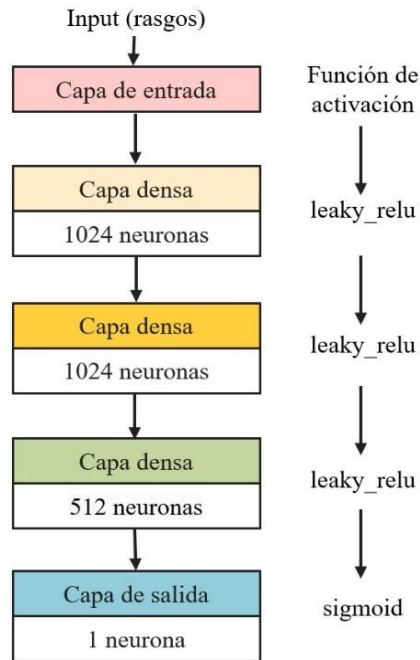


Fig. 11. Arquitectura de red neuronal.

Para el entrenamiento del modelo, se utilizó el optimizador *Adamax* con una tasa de aprendizaje inicial de 0.005 y la función de pérdida de entropía cruzada binaria. Los datos se dividieron en conjuntos de entrenamiento y prueba en una relación del 70/30. El modelo se entrenó durante 50 épocas, con un tamaño de lote de 32, utilizando *callbacks* como *EarlyStopping* y *ReduceLRonPlateau* para prevenir el sobreajuste y ajustar la tasa de aprendizaje en función del rendimiento del modelo.

### 1. Plataforma web

El desarrollo de la plataforma web facilita el acceso al sistema de detección de ICC en señales de ECG mediante una interfaz en línea. Los usuarios pueden cargar las señales a analizar y recibir los resultados sin necesidad de instalar software adicional o ejecutar códigos localmente. Para esta plataforma, se utilizan los servicios de nube y VM. El esquema general de la plataforma web se ilustra en la Figura 12, incluye la integración de servicios en la nube para la gestión de recursos esenciales como la base de datos y el servidor. Se emplea SFTP para la carga y actualización de archivos, y HTTP para la comunicación eficaz entre el servidor y el navegador, asegurando el funcionamiento adecuado de la plataforma. Los modelos entrenados y los recursos necesarios para la ejecución del sistema de clasificación se alojan en la VM, permitiendo el funcionamiento de la plataforma.

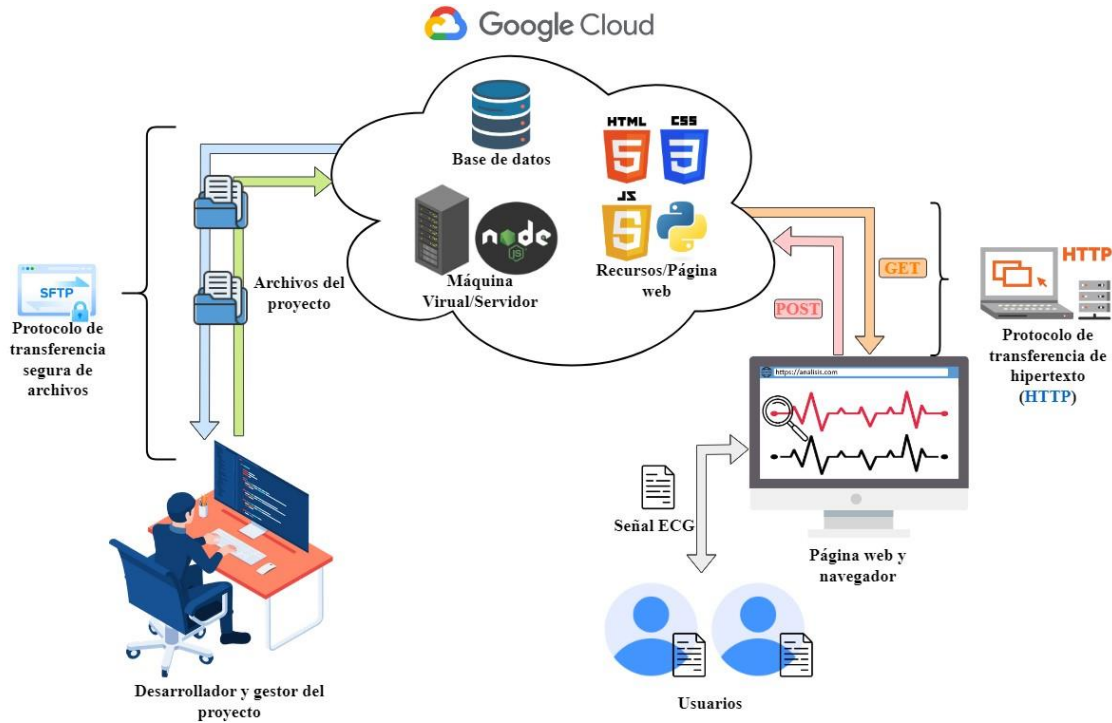


Fig. 12. Esquema general para el desarrollo de la plataforma web.

## V. RESULTADOS

Para evaluar la utilidad de los rasgos extraídos en la clasificación binaria, se utilizaron las PDF. Las gráficas de las PDF muestran la distribución de cada rasgo para las dos clases, lo que permite visualizar la separación entre ellas. De la Figura 13 a la Figura 15 se observa que los cinco rasgos presentan distribuciones distintas para cada clase. Las señales normales (clase 0) y las señales con ICC (clase 1) tienen picos de densidad en diferentes rangos, indicando diferencias significativas en las características de las señales.

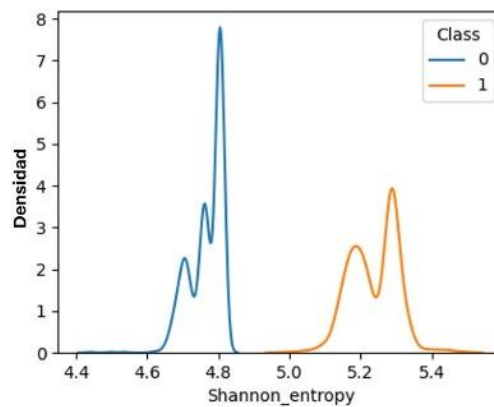


Fig. 13. Entropía de Shannon, PDF.



14

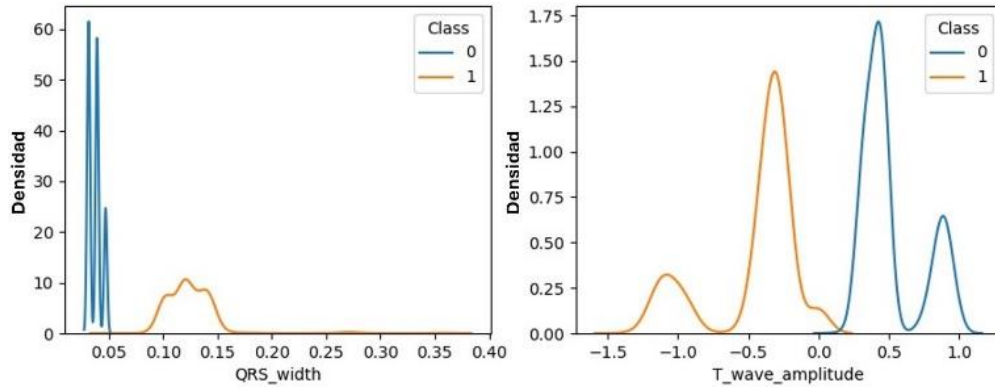


Fig. 14. Duración complejo QRS y amplitud onda T, PDFs.

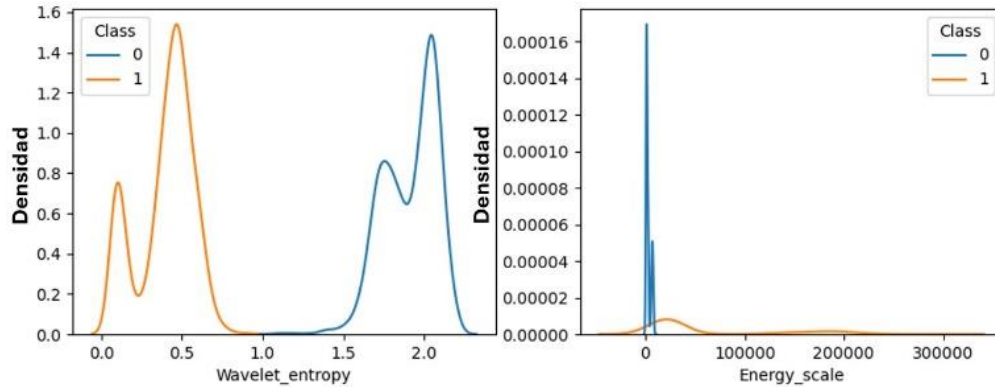


Fig. 15. Entropía wavelet y energía, PDF.

14

La longitud del complejo QRS muestra que las señales normales tienden a tener una distribución más concentrada en valores más bajos, mientras que las señales con ICC se distribuyen en un rango más amplio. La amplitud de la onda T presenta una clara separación, con las señales normales mostrando amplitudes positivas y las señales con ICC amplitudes negativas. La entropía de *Shannon* y la entropía *wavelet* también muestran diferencias en la complejidad y distribución de energía de las señales, con picos en diferentes rangos para cada clase. La suma de la energía en las bandas de frecuencia revela que las señales normales tienden a concentrarse en un rango específico de energía, mientras que las señales con ICC tienen una distribución más dispersa.

Estas diferencias en las distribuciones de los rasgos entre las dos clases demuestran que los rasgos extraídos son efectivos para separar las señales normales de las afectadas por ICC. La separación observada en las gráficas de PDF proporciona una base sólida para la clasificación binaria en los modelos de aprendizaje máquina, contribuyendo a la precisión en la detección de la ICC.

### A. Métricas de rendimiento de SMV

El entrenamiento del modelo SVM se realiza utilizando los datos extraídos de las señales de ECG, divididos en conjuntos de entrenamiento y prueba en una relación de 70/30. Este modelo muestra un elevado rendimiento en la clasificación de las señales de ECG, logrando una precisión del 100% tanto en el conjunto de prueba como en las predicciones. La matriz de confusión de la Figura 16, indica que las 720 muestras de prueba fueron clasificadas correctamente, con 367 muestras normales y 353 muestras de ICC sin errores de clasificación. El VPP que es la proporción de verdaderos positivos entre todas las muestras que el modelo clasifica como positivas da como resultado el 100%. Los índices de evaluación en la Tabla 1 revelan una sensibilidad y especificidad de 1.0 en ambas clases. Estos resultados confirman la eficacia del modelo SVM para la clasificación de señales de ECG, proporcionando un soporte para la detección de ICC.

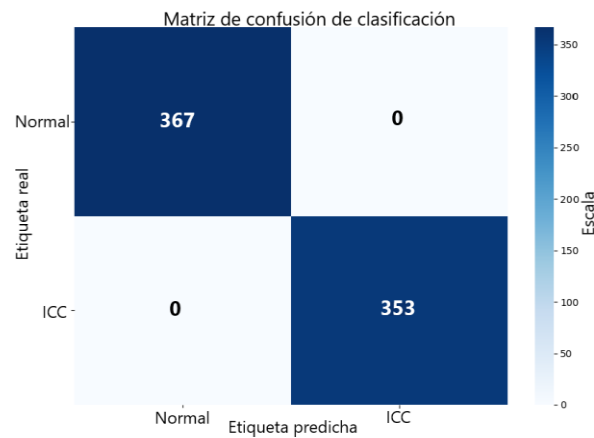


Fig. 16. Matriz de confusión SVM.

TABLA 1  
ÍNDICES DE EVALUACIÓN SVM

	Índices de clase 0 (normal)	Índices de clase 1 (ICC)
<b>Sensibilidad</b>	--	1.0
<b>Especificidad</b>	1.0	--
<b>Prevalencia</b>	0.51	0.49

### B. Métricas de rendimiento de K-NN

El modelo K-NN también demuestra una alta precisión en la clasificación, con una exactitud del 99% tanto en la prueba del modelo como en la predicción. La matriz de confusión en la Figura 17 indica que, de las 720 muestras de prueba, solo se cometieron cuatro errores de clasificación. El VPP es del 100%. Los índices de evaluación se muestran en la Tabla 2 reflejando una alta sensibilidad y especificidad en ambas clases.

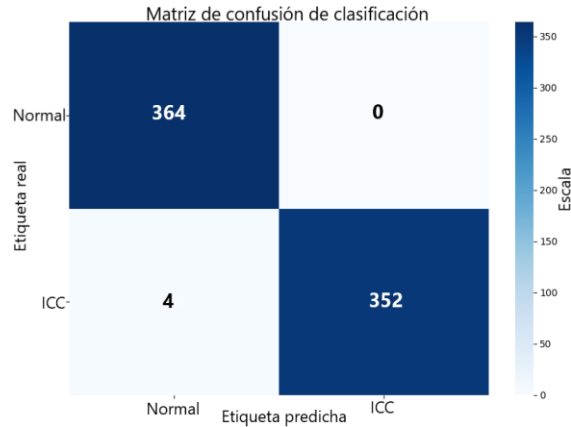


Fig. 17. Matriz de confusión K-NN.

TABLA 2  
ÍNDICES DE EVALUACIÓN SVM

	Índices de clase 0 (normal)	Índices de clase 1 (ICC)
<b>Sensibilidad</b>	--	0.98
<b>Especificidad</b>	1.0	--
<b>Prevalencia</b>	0.50	0.49

C. Métricas de rendimiento de RN

El modelo de RN muestra una precisión del 99% durante la prueba, siendo efectivo para la clasificación de las señales. La matriz de confusión de la Figura 18 revela que la red neuronal clasifica correctamente la mayoría de las muestras, registrando solo cinco errores en un total de 720 muestras. Esto también genera un VPP de 100%. Los índices de evaluación, incluyendo sensibilidad y especificidad, muestran valores cercanos a 1.0 para ambas clases. Los resultados detallados se encuentran en la Tabla 3.

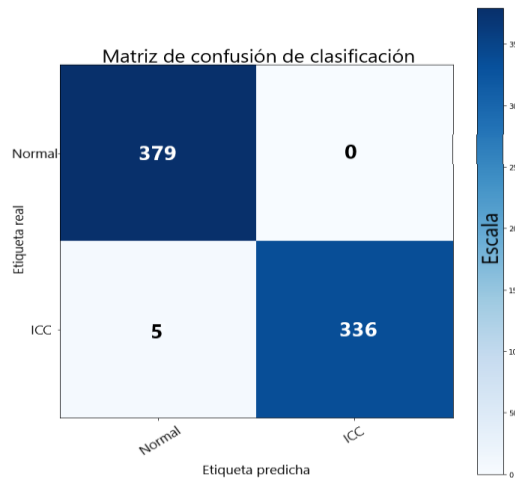


Fig. 18. Matriz de confusión RN.

TABLA 3  
ÍNDICES DE EVALUACIÓN RN

	Índices de clase 0 (normal)	Índices de clase 1 (ICC)
<b>Sensibilidad</b>	--	0.98
<b>Especificidad</b>	1.0	--
<b>Prevalencia</b>	0.52	0.47

17

Para el modelo de RN, la Figura 19 ilustra la gráfica de exactitud durante las épocas de entrenamiento y validación. Se observa una tendencia estable en la precisión hasta la época 30, tanto para los datos de entrenamiento como de validación. Sin embargo, se destaca un pico notable que experimenta una caída brusca alrededor de la época 30. Esta disminución podría señalar un problema temporal durante el entrenamiento, como variabilidad en los datos de entrada o un ajuste del modelo. A pesar de esta caída, el modelo recupera rápidamente su precisión en las siguientes épocas, lo que sugiere una buena capacidad para ajustar y mejorar su rendimiento después de un breve desajuste. Este comportamiento resalta la robustez del modelo RN para mantener una alta exactitud en la clasificación de señales de ECG a lo largo del tiempo.

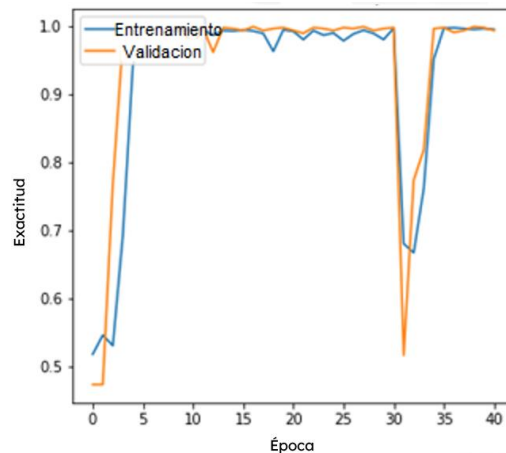


Fig. 19. Exactitud del modelo durante el entrenamiento.

#### D. Plataforma web resultante

La página principal del sitio web es donde se encuentra la interfaz para la clasificación de las señales de ECG. En la Figura 20 se ilustra el diseño de esta página. Esta interfaz contiene los elementos principales para la interacción del usuario con el sistema. A continuación, se describen los elementos y el flujo de uso:

1. Campos para seleccionar los archivos de las señales de ECG a analizar. El usuario puede hacer clic para abrir el navegador de archivos, o simplemente arrastrar los elementos dentro del área designada.
2. Botón para subir los archivos seleccionados a la nube, preparándolos para el análisis.
3. Botones para seleccionar el modelo de aprendizaje máquina con el que se desea clasificar el ECG (SVM, KNN o RN).
4. Botón para iniciar el análisis de la señal una vez que se ha seleccionado el modelo deseado.
5. Gráfica desplazable que muestra el ECG de los datos subidos por el usuario, permitiendo una visualización clara de la señal.
6. Indicadores del resultado de la clasificación, que muestran si la señal analizada es normal o indicativa de ICC.
7. Información de la señal de ECG analizada.

17



Fig. 20. Plataforma web para la clasificación de la señal de ECG.

## VI. CONCLUSIONES

Este trabajo ha demostrado la viabilidad de integrar técnicas de aprendizaje automático en el análisis de señales de ECG para el apoyo en el diagnóstico de la ICC. La plataforma web desarrollada facilita la clasificación de señales, automatizando el proceso de análisis, lo que podría beneficiar tanto a médicos como a pacientes en entornos de telemedicina. Aunque los resultados son prometedores, se reconoce que este sistema aún está en fase de investigación y futuras evaluaciones en entornos clínicos serán necesarias para validar su efectividad y potencial optimización en el diagnóstico de ICC.

Los modelos de aprendizaje automático SVM, K-NN y RN mostraron una alta eficacia en la clasificación de señales de ECG en el conjunto de datos utilizado. En particular, la RN alcanzó una precisión del 99% en la detección de ICC, con solo cinco errores en 720 muestras de prueba. Los índices de evaluación para SVM y K-NN también fueron altos, con sensibilidades y especificidades cercanas al 100%.

Los rasgos extraídos, como la duración del complejo QRS, la amplitud de la onda T, la entropía de *Shannon*, la entropía *wavelet* y la energía en bandas de frecuencia, demostraron ser altamente relevantes para el entrenamiento de los modelos. Estos rasgos permitieron una clara diferenciación entre las señales normales y las afectadas por ICC, contribuyendo significativamente a la precisión del sistema de clasificación.

Finalmente, este trabajo representa una propuesta tecnológica en la clasificación de señales de ECG afectadas por ICC y propone más ejemplos de rasgos característicos indicativos de ICC que puede servir para futuras investigaciones y sistemas más completos. Aunque las pruebas controladas han mostrado resultados alentadores, será necesario realizar evaluaciones más amplias en entornos clínicos para garantizar su aplicabilidad real en el diagnóstico de la ICC.

REFERENCIAS

- 19
- [1] L. Azcona, "El electrocardiograma," in *Libro de la salud cardiovascular*, A. López Farré, C. Mayaca Miguel, 1ª ed. Bilbao, España: Narea, 2009, pp. 49-56.
  - [2] A. Darmawahyuni, S. Nurmaini, M. Yuwandini, M. N. Rachmatullah, F. Firdaus, B. Tutuko, "Congestive heart failure waveform classification based on short time-step analysis with recurrent network," *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 21, p. 100441, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100441>.
  - [3] D. Li, Y. Tao, J. Zhao, H. Wu, "Classification of Congestive Heart Failure from ECG Segments with a Multi-Scale Residual Network," *Symmetry*, vol. 12, no. 12, p. 2019, Dec. 2020, doi: 10.3390/sym12122019. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/sym12122019>.
  - [4] V. Jahmunah, S. L. Oh, J. K. E. Wei, E. J. Ciaccio, K. Chua, T. R. San, U. R. Acharya, "Computer-aided diagnosis of congestive heart failure using ECG signals – A review," *Physica Medica*, vol. 62, pp. 95-104, jun. 2019, ISSN 1120-1797. DOI: 10.1016/j.ejmp.2019.05.004. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179719301115>.
  - [5] L. Hussain, I. A. Awan, W. Aziz, S. Saeed, A. Ali, F. Zeeshan, K. S. Kwak, "Detecting Congestive Heart Failure by Extracting Multimodal Features and Employing Machine Learning Techniques," *BioMed Research International*, vol. 2020, ID 4281243, Feb. 2020. DOI: 10.1155/2020/4281243. [En línea]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2020/4281243/>.
  - [6] A. C. Guyton, J. E. Hall, "Electrocardiograma normal," in *Tratado de fisiología médica*, 12ª ed., vol. 1, Unidad 3, Elsevier, 2011, pp. 121-130.
  - [7] R. Bover, "El electrocardiograma (ECG) en la insuficiencia cardíaca: bloqueo de rama izquierda," *Insuficiencia cardíaca para pacientes*, Aug. 13, 2018. Available: <https://insuficiencia-cardiaca.com/insuficiencia-cardiaca/diagnostico-insuficiencia-cardiaca/41-diagnostico-electrocardiograma-insuficiencia-cardiaca.html>.
  - [8] D. Zipes, P. Libby, R. Bonow, D. Mann, and G. Tomaselli, *Braunwald's Heart Disease: A Textbook of Cardiovascular Medicine*, 11ª ed. Philadelphia, PA, USA: Elsevier, 2019.
  - [9] D. S. Baim, W. S. Colucci, E. S. Monrad, H. S. Smith, R. F. Wright, A. Lanoue, D. F. Gauthier, B. J. Ransil, W. Grossman, E. Braunwald, "Survival of patients with severe congestive heart failure treated with oral milrinone," *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 7, no. 3, pp. 661-670, Mar. 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(86\)80478-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(86)80478-8).
  - [10] A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, R. G. Mark, H. E. Stanley, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals," *Circulation*, vol. 101, no. 23, pp. e215-e220, Jun. 2000, doi: <https://doi.org/10.13026/C29G60>.
  - [11] A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. Ch. Ivanov, R. G. Mark, and H. E. Stanley, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals," *Circulation*, vol. 101, no. 23, pp. e215-e220, Jun. 2000. Available: <https://physionet.org/content/nsrdb/1.0.0/>.
  - [12] O. Manolkar, N. Gawande, "ECG Analysis for Chronic Heart Failure Detection using Deep Learning," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 11, no. 6, 2023, doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53733>.
  - [13] V. Morales Oñate, "Machine Learning: Teoría y Práctica," [En línea]. Disponible: [https://bookdown.org/victor\\_morales/TecnicasML/](https://bookdown.org/victor_morales/TecnicasML/). (accessed Apr. 11, 2023).
  - [14] J. Botros, F. Mourad-Chehade, D. Laplanche, "CNN and SVM-Based Models for the Detection of Heart Failure Using Electrocardiogram Signals," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 23, p. 9190, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22239190>.
  - [15] A. Turnip *et al.*, "Classification of ECG signal with Support Vector Machine Method for Arrhythmia Detection," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 970, p. 012012, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/970/1/012012>.
  - [16] I. Logunova, "K-Nearest Neighbors Algorithm for ML," *Serokell*. Available: <https://serokell.io/blog/knn-algorithm-in-ml>. (accessed Sep. 7, 2024).
  - [17] Y. Shi, Z. Yang, K. Yang, Y. Zhou, "k-Nearest Neighbors Method," in *Mobile Edge Artificial Intelligence*, Academic Press, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-00624-9>.
  - [18] ScienceDirect, "k-Nearest Neighbors Algorithm," *ScienceDirect*. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/k-nearest-neighbors-algorithm>. (accessed Sep. 7, 2024).
  - [19] S. Jayalalitha, D. Susan, S. Kumari, B. Archana, "K-nearest Neighbour Method of Analysing the ECG Signal (To Find out the Different Disorders Related to Heart)," *Journal of Applied Sciences*, vol. 14, no. 14, pp. 1628-1632, 2014, doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2014.1628.1632>.
  - [20] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*, 1st ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016.



- [21] U. R. Acharya, H. Fujita, O. S. Lih, M. Adam, J. H. Tan, C. K. Chua, "Automated detection of coronary artery disease using different durations of ECG segments with convolutional neural network," *Knowledge-Based Systems*, vol. 132, pp. 62-71, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.06.003>.
- [22] Y. Karaca, M. Moonis, "Shannon entropy-based complexity quantification of nonlinear stochastic process," in *Multi-Chaos, Fractal and Multi-Fractional Artificial Intelligence of Different Complex Systems*, Elsevier, 2022. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/shannon-entropy>.
- [23] T. Li, M. Zhou, "ECG classification using wavelet packet entropy and random forests," *Entropy*, vol. 18, no. 8, p. 285, Aug. 2016. <https://doi.org/10.3390/e18080285>.
- [24] H. Yanık, E. Değirmenci, B. Büyükakıllı, D. Karpuz, O. Kılınc, S. Gürgül, "Electrocardiography (ECG) analysis and a new feature extraction method using wavelet transform with scalogram analysis," *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, vol. 65, no. 5, pp. 543-556, May 2020. <https://doi.org/10.1515/bmt-2019-0147>.

## Estudio del desarrollo de las aeronaves tilt-rotor

Study of the development of Tilt-rotor aircraft

Víctor Gabriel **Sánchez Meza**<sup>1</sup>, Alberto **Luviano Juárez**<sup>2</sup>  
Yair **Lozano Hernández**<sup>3</sup>, Jaime **González Sierra**<sup>4</sup>

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3130-3082 | vsanchezm1301@alumno.ipn.mx

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8790-4165 | aluvianoj@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería campus Hidalgo, MÉXICO

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-8157-3510 | ylozanoh@ipn.mx

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0001-9141-0061 | jagonzalezsi@ipn.mx

Recibido 09-09-2024, aceptado 31-10-2024.

### Resumen

La aeronave de rotor basculante es un diseño híbrido que combina los modos de vuelo de ala fija y ala rotatoria, de esta forma, combina las ventajas de vuelo de los aviones y los helicópteros. En este artículo se presenta la descripción de las aeronaves híbridas en modo de vuelo y el estado del arte del desarrollo de modelos de aeronaves híbridas, y esquemas de control. Se exponen diferentes modelos mecánicos de aeronaves que incluyen mecanismos para la transición de modo de vuelo de ala rotatoria a ala fija y viceversa. También, se formula el modelo matemático empleado comúnmente en los trabajos reportados, así como el planteamiento de algoritmos de control propuestos enfocados en la estabilidad de las aeronaves en su transición de modo de vuelo.

**Palabras clave:** Tilt-rotor, VANT, control, vuelo híbrido.

### Abstract

The tilting rotor aircraft is a hybrid design that combines the fixed -wing flight modes and a rotating wing, thus combines the flight advantages of airplanes and helicopters. This article presents the description of hybrid aircraft in flight mode and the state of the art of the development of hybrid aircraft, and control schemes. Different mechanical models of aircraft are exposed that include mechanisms for the transition of the rotating wing flight to a fixed wing and vice versa. Also, the mathematical model commonly used in the reported works is formulated, as well as the proposed control algorithms approach focused on the stability of the aircraft in their flight mode transition.

**Keywords:** Tilt-rotor, UAV, control, hybrid flight.

## I. INTRODUCCIÓN

El interés por los Vehículos Aéreos No Tripulados (en adelante, *VANT*) ha crecido de manera constante durante los últimos años, no solo en la investigación, sino también desde un punto de vista comercial y militar [1]. En México, se ha manifestado un interés en este tipo de tecnología, tanto en empresas privadas como públicas, para la vigilancia aérea, fotografía aérea, protección costera y el monitoreo forestal [2].

Existen distintas plataformas en uso que pueden dividirse en dos clases: ala rotatoria y de ala fija, con diferentes ventajas y desventajas inherentes, por ejemplo, flexibilidad, carga útil y facilidad de uso [3]. Las diferencias principales son la maniobrabilidad y agilidad de los vehículos de ala rotatoria como cuadrotores y helicópteros convencionales. Estos pueden mantenerse en vuelo estacionario y no requieren de una pista para el despegue y aterrizaje. Por otro lado, los vehículos de ala fija tienen la capacidad de producir fuerzas de sustentación inducidas por la velocidad del aire, también, operan de manera eficiente en vuelo avance frontal de alta velocidad manteniendo un menor consumo energético en comparación con los de ala rotatoria [4], [5].

En adición, existen aeronaves de alas basculantes conocidas como *Tilt-rotor*, son un diseño híbrido de ala fija y de ala rotatoria un ejemplo de estos es mostrado en la Figura 1. Estas aeronaves combinan las ventajas de ambos modos de vuelo y de esta forma tiene la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente y mantener el vuelo estacionario como un helicóptero, también tiene la velocidad y el alcance de un avión [6]. Estas características hacen de los aviones de rotor basculante un punto de acceso de investigación durante los últimos años [7], [8] [9].



Fig. 1. VANT Tilt-rotor [6].

En específico, el Tilt-rotor representa un reto importante en el área de control automático, debido a que es un sistema multivariable con dinámica no lineal y compleja. La dinámica propia del Tilt-rotor requiere del estudio de algoritmos de control para su posicionamiento y mantener la estabilidad, especialmente en las etapas de transición de modo de vuelo las cuales suelen ser maniobras agresivas. En la actualidad, el diseño de controladores para aeronaves tipo Tilt-rotor se centra en el estudio por separado de la dinámica de un avión de ala fija y de un helicóptero, siendo común encontrar modelos obtenidos a partir de la dinámica del cuerpo rígido del VANT, excluyendo la presencia de efectos aerodinámicos. Sin embargo, lo anterior no soluciona los problemas presentes durante la fase crítica de vuelo.

De lo anterior, el diseño de los esquemas de control ante perturbaciones exógenas para realizar el despegue/aterrizaje y transición de modo de vuelo en los Tilt-rotos continúa siendo una oportunidad de desarrollo en la investigación. En este artículo, se pretende exponer los diferentes modelos mecánicos de aeronaves híbridas que permiten generar la combinación de ambos modos de vuelo. También, se expone el modelo matemático generalizado que define la dinámica de una aeronave sobre de un marco de referencia de cuerpo fijo. Además, se presentan algunos esquemas de control documentados con propiedades significativas en posicionamiento y estabilidad de la aeronave. De esta forma, se pretende exponer los avances alcanzados y las áreas de oportunidad disponibles para su desarrollo e investigación de las aeronaves híbridas.

La estructura de este trabajo está organizada por la sección 2 que presenta una descripción de los VANT híbridos en modo de vuelo, mientras que la sección 3 muestra algunos desarrollos de prototipos de VANT Tilt-rotor que han sido funcionales para sus pruebas de vuelo. Por otra parte, sección 4 muestra el modelo matemático de forma general que representa la dinámica del VANT Tilt-rotor. En adición, la sección 5 detalla algunos esquemas de control empleados principalmente para la estabilidad de rotación del VANT.

## II. DESCRIPCIÓN DE LOS VANT HÍBRIDOS

3

Los VANT híbridos son aeronaves con la capacidad de migrar en su forma de vuelo, es decir, pasar de un vuelo de ala rotatoria a un modo de vuelo de ala fija y/o viceversa, incluso durante su navegación. Esto le brinda al VANT las propiedades de mantener su vuelo en estado estacionario, planear para mantener el rendimiento y velocidad de un VANT de ala fija, despegar y aterrizar de forma vertical sin la necesidad de tener acceso a una pista de despegue. Existen algunas configuraciones principales en las arquitecturas de las aeronaves híbridas para realizar la transición de tipo de vuelo [10], [7]. Algunas de las arquitecturas de estos VANT son [11]:

- Rotor-wing
- Sistemas duales
- Tilt-wing (*Ala basculante*)
- Tilt-rotor (*Rotor basculante*)

### A. Rotor-wing

La arquitectura del rotor-wing, emplea un ala rotativa que gira para proporcionar elevación durante el vuelo vertical y se detiene para actuar como un ala fija durante el vuelo [12]. La Fig. 2 muestra el principio de funcionamiento del Rotor-wing, durante su primera fase de despegue hace rotar las alas del VANT para generar propulsión, posteriormente son detenidas para activar un segundo sistema de propulsión y utilizar las alas detenidas para generar la sustentación [13]. Dicha metodología de diseño fue explotada inicialmente por Sikorsky Aircraft quien desarrolló su primer prototipo integrado con las hélices compuestas de ala en forma de X como se muestran en la Fig. 3 [14]. Más tarde, solo fue investigado por Boeing y el Laboratorio de Investigación Naval en el diseño de dos VANT de ala de rotor, es decir, Dragonfly X-50 y NRL [11], [15].

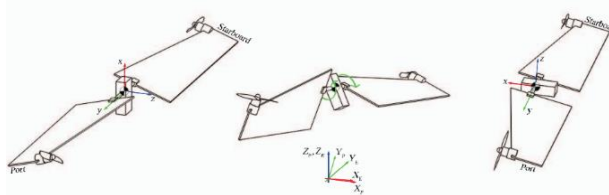


Fig. 2. Principio de operación de Rotor-wing [12].



Fig. 3. Fotografía del Sikorsky X-wing [14].

### B. Sistemas duales

Los sistemas duales utilizan dos conjuntos de sistemas de propulsión: uno contiene un rotor (o rotores) montado hacia arriba para la operación vertical y otro adopta propulsores para el vuelo de ala fija. Como el mecanismo de inclinación no es necesario para la transición de modo de vuelo, dicha aeronave, presenta un diseño mecánico simplificado. Sin embargo, durante el vuelo de ala fija, los múltiples rotores no operados para la generación de elevación vertical causan un arrastre aerodinámico adicional debido a su montaje fijo, lo que resulta en una carga adicional a los rotores de propulsión (véase Fig. 4 [16]).

4



Fig. 4. VANT con sistema dual [16].

### C. Tilt-wing

Los Tilt-wing generan su transición de modo de vuelo realizando la inclinación parcial o completa del ala junto con el rotor respectivo. Esto implica que las alas estén posicionadas de forma vertical cuando el VANT toma un modo de vuelo de ala rotatoria. La transición de modo de vuelo de este VANT tiene complicaciones en los efectos aerodinámicos que generan los vórtices de las ráfagas de viento con la inclinación del ala [16]. Debido a tal desafío, el concepto de diseño de ala de inclinación perdió popularidad hasta el año 2000, cuando la tecnología de fabricación de aviones RC en miniatura maduro y su potencial en el mercado fue impulsada gradualmente por los diseñadores. Durante la última década, se han investigado activamente aeronaves con sistemas de inclinación del perfil alar y se han desarrollado casos representativos que se muestran en la Fig.5 ([17], [18], [19], [20], [21], [22]).



(a) HARVee [17].



(b) AVIGLE [20], [21].



(c) Greased Lightning (GL) VTOL Drone [18].



(d) AT-10 Responder [22].



(e) Quad Tilt Wing (QTW) VTOL [19].



(f) SUAVI [16].

Fig. 5. Modelos de VANT Tilt-wing.

5



(a) Fotografía del modelo Bell Eagle [23].



(b) Fotografía del modelo Tilt-rotor V-22 Osprey [23].

Fig. 6. Modelos Tilt-rotores con 2 rotores.



a) Fotografía del modelo delta con 3 rotores [24].



(b) Fotografía del modelo con 4 rotores [11].

Fig. 7. Tilt-rotores con 3 y 4 rotores.

#### D. Tilt-rotor

A diferencia del Tilt-wing, el Tilt-rotor realiza la inclinación de los rotores manteniendo las alas fijas, esto genera mayor simplicidad en el mecanismo de inclinación de los rotores y evitando los efectos aerodinámicos causados por la rotación de las alas. Las configuraciones principales de los Tilt-rotores pueden contener dos, tres o cuatro rotores [11]. Los Tilt-rotores de dos rotores posicionan los rotores en las extremidades de las alas. Esta configuración presenta problemas de estabilidad de orientación, pero se ha resuelto colocando mecanismos llamados *platos cíclicos* y *longitudinales*. Estos varían el ángulo de ataque de las palas, así generar los torques de rotación del cuerpo de la aeronave para mantener su estabilidad. El concepto del Tilt-rotor fue introducido por primera vez en 1993 por Bell Helicopter Inc., que se trata como el pionero en el campo de los VANT híbridos bi-rotores [10]. Uno de sus diseños principales es el Bell Eagle que se muestra en la Fig. 6(a); este diseño es la versión no tripulada del avión híbrido tripulado V-22 Osprey que se muestra en la Fig. 6(b) [23].

Por otra parte, los Tilt-rotores de tres y cuatro propulsores en generalmente utilizan el tercer y en su caso el cuarto rotor como un estabilizador de orientación evitando el uso de los platos cíclicos y longitudinales como se muestra en la Fig. 7 [24], [11].

De lo anterior, el Tilt-rotor de dos rotores es la aeronave que ha presentado mayor desarrollo particularmente los modelos Bell Eagle y V-22 Osprey ya que incluso estos modelos han sido comercializados con funciones prácticas [10], [11], [23]. Además, esta configuración presenta menos efectos aerodinámicos al mantener el perfil alar fijo en su transición de modo de vuelo [16]. Mientras que las demás configuraciones de VANT híbridas solo se han desarrollado a nivel prototipo con objeto de estudio para el mejoramiento de sus funcionalidades.



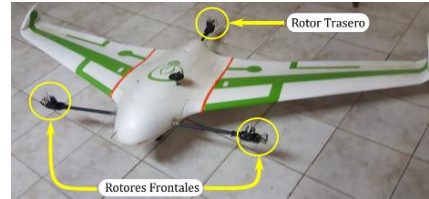
### III. DESARROLLOS EN MODELOS MECÁNICOS DEL TILT-ROTOR.

En cuanto al diseo de VANT Tilt-rotor de tres rotores, en [25] se presenta un diseo (véase Fig. 8(a)) donde el material utilizado para la construcci3n del marco del cuerpo es el aluminio, que en forma de varillas y barras huecas ofrece resistencia y flexibilidad. Una consideraci3n importante para el proceso de diseo que se presenta es reducir las vibraciones inducidas por el rotor tanto como sea posible. Los autores mencionan que, si bien las vibraciones de alta frecuencia son rechazadas de manera eficiente por las vibraciones filtradas de baja frecuencia de alta amplitud de la unidad de medici3n inercial, conducen a los datos de sensores calibrados ruidosos y a la deriva de las estimaciones de actitud del sistema informadas.

Por otra parte, en [26] se presenta un diseo del Tilt-rotor con una estructura de ala delta ilustrado en la Fig. 8(b), los autores muestran el mecanismo de inclinaci3n de los rotores realizando el estudio de los esfuerzos del mecanismo por medio de SolidWorks. Las consideraciones de diseo fueron las siguientes: capacidad de acoplarse a los tubos sobre los que se montan los rotores frontales; capacidad de ensamblarse con el servomotor seleccionado; y capacidad de rotar por lo menos  $90^\circ$  una vez montada. De forma similar, en [27] se presenta un diseo basado en el Bell-Boeing V-22 Osprey mostrado en a Fig. 8(c).



(a) Fotografía del modelo presentado en [25].



(b) Fotografía del modelo presentado en [26].



(c) Ilustraci3n del modelo presentado en [27].



(d) Fotografía del modelo presentado en [28].

Fig. 8 Modelos de Tilt-rotor.

En adici3n, la comercializadora *Bannana Hobby* tiene a la venta un prototipo a escala del *Bell-Boeing V-22*, elaborado con un material de espuma de poliuretano [28] (véase Fig. 8(d)). El diseo est́ conformado por dos rotores principales con hélices fijas y un rotor de cola para compensar la falta de los platos ćclicos y longitudinales, de este modo, ser capaz de generar efectos de cabeceo de la aeronave.

### IV. MODELADO MATEMÁTICO DEL TILT-ROTOR

En cuanto al modelado matemático, en [4], [26], [29] se desarrolla el modelado dinámico de los VANT tilt-rotor de dos y tres rotores contemplando ambas formas de vuelo. El modelado es desarrollado por el formulismo de Newton-Euler y puede representarse por la siguiente ecuaci3n:

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_{xm} &= (\dot{\psi}_m v_{ym} - \dot{\theta}_m v_{zm}) + g \sin(\theta) + \frac{U_x}{m} + \frac{F_{Ax}}{m} \\
 \dot{v}_{ym} &= (\dot{\phi}_m v_{zm} - \dot{\psi}_m v_{xm}) - g \cos(\theta) \sin(\phi) \\
 \dot{v}_{zm} &= (\dot{\theta}_m v_{zm} - \dot{\phi}_m v_{ym}) - g \cos(\theta) \sin(\phi) + \frac{U_z}{m} + \frac{F_{Az}}{m} \\
 \ddot{\phi}_m &= \frac{(I_{yy} - I_{zz}) \dot{\theta}_m \dot{\psi}_m}{I_{xx}} - \frac{J_{prop} \dot{\theta}_m (\omega_{rp} + \omega_{lp})}{I_{xx}} + \frac{U_\phi}{I_{xx}} + \frac{\tau_{A\phi}}{I_{xx}} \\
 \ddot{\theta}_m &= \frac{(I_{zz} - I_{xx}) \dot{\psi}_m \dot{\phi}_m}{I_{yy}} - \frac{J_{prop} \dot{\phi}_m (\omega_{rp} + \omega_{lp})}{I_{yy}} + \frac{U_\theta}{I_{yy}} + \frac{\tau_{A\theta}}{I_{yy}} \\
 \ddot{\psi}_m &= \frac{(I_{yy} - I_{zz}) \dot{\phi}_m \dot{\theta}_m}{I_{zz}} + \frac{U_\psi}{I_{zz}} + \frac{\tau_{A\psi}}{I_{zz}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

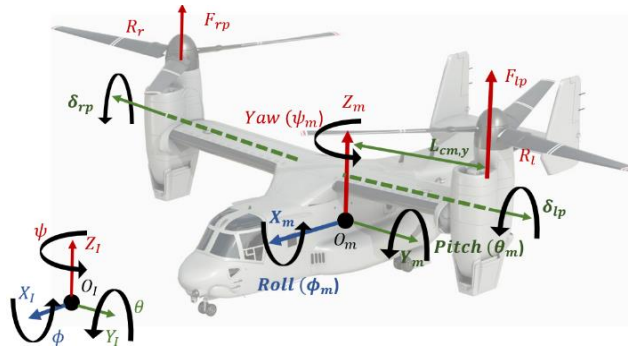


Fig. 9 Marcos de referencia inercial y de cuerpo fijo.

donde,  $v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}, \phi_m, \theta_m, \psi_m$  son las variables de velocidad de desplazamiento y rotación variantes en tiempo y proyectadas sobre de un marco de cuerpo fijo como se muestra en la Fig. 9.  $U_x, U_z$  son las fuerzas generadas por los rotosres incidiendo sobre del eje  $x_m$  y  $z_m$ . Mientras que  $U_\phi, U_\theta$  y  $U_\psi$  son los torques de rotación generados por las relaciones de los rotosres. Finalmente, las fuerzas  $F_A$  y  $\tau_A$  son las sumas de las fuerzas de arrastre y sustentación definidas por el perfil alar y la incidencia del viento.

Además, las fuerzas generadas por los rotosres ( $U_x, U_z, U_\phi, U_\theta$  y  $U_\psi$ ) y del perfil alar ( $F_{Ax}, F_{Az}, \tau_{A\phi}, \tau_{A\theta}$  y  $\tau_{A\psi}$ ) dependen directamente del diseño y configuración del sistema. En particular al modelo de la Fig. 9, las fuerzas generadas por los rotosres se pueden definir como:

$$U_x = k_{rp} \omega_{rp}^2 \sin(\delta_{rp}) + k_{lp} \omega_{lp}^2 \sin(\delta_{lp}) \tag{2}$$

$$U_z = k_{rp} \omega_{rp}^2 \cos(\delta_{rp}) + k_{lp} \omega_{lp}^2 \cos(\delta_{lp}) + k_{tp} \omega_{tp}^2 \tag{3}$$

$$U_\phi = -k_{rp} \omega_{rp}^2 L_{cm,y} \cos(\delta_{rp}) + k_{lp} \omega_{lp}^2 L_{cm,y} \cos(\delta_{lp}) \tag{4}$$

$$U_\theta = k_{rp} \omega_{rp}^2 (L_{cm,z} \sin(\delta_{rp}) + L_{cm,x} \cos(\delta_{rp})) + k_{lp} \omega_{lp}^2 (L_{cm,z} \sin(\delta_{lp}) + L_{cm,x} \cos(\delta_{lp})) + k_{tp} \omega_{tp}^2 L_{cm,t} \tag{5}$$

$$U_\psi = -k_{rp} \omega_{rp}^2 L_{cm,y} \sin(\delta_{rp}) + k_{lp} \omega_{lp}^2 L_{cm,y} \sin(\delta_{lp}) \tag{6}$$

siendo,  $k_{rp}$ ,  $k_{lp}$  y  $k_{tp}$  ganancias de fuerza del rotor derecho, izquierdo y trasero respectivamente,  $\omega_{rp}$ ,  $\omega_{lp}$  y  $\omega_{tp}$ , las velocidades de rotación de los rotores,  $\delta_{rp}$  y  $\delta_{lp}$  los ángulos de inclinación de los rotores considerando un ángulo 0 en posición vertical.  $L_{cm,x}$ ,  $L_{cm,y}$ ,  $L_{cm,z}$  y  $L_{cm,t}$  son las distancias de los rotores al centro de masa de la aeronave.

Dado la presencia de dinámicas no lineales acopladas en los 6 grados de libertad del sistema (1) dificulta el diseño de los esquemas de control por lo que en su mayoría se utilizan metodologías de linealización y de observadores que ayudan a realizar la compensación de perturbaciones y fenómenos no modelados [6], [30], [31].

∞

## V. DISCUSIÓN DE ESQUEMAS DE CONTROL

Referente a los algoritmos de control, en [6] se determina que el cambio del ángulo de inclinación y la velocidad de vuelo hacia adelante durante el modo de transición de vuelo. De lo anterior, realizan el diseño de un algoritmo de control backstepping para la estabilización de los tres ángulos de orientación de un VANT tilt-rotor de dos rotores. Los autores consideran el estado  $x_1 = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ ,  $x_2 = [p \ q \ r]^T$ , donde  $x_2$  representa la tasa de cambio de los ángulos  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ ;  $u = [\delta_{ail} \ \delta_{hor} \ \delta_{ver}]^T$  se define como la entrada de control. Se define la superficie del error como  $z_1 = x_1 - y_d$ ,  $z_2 = x_2 - x_{2d}$ ,  $y_d$  es el valor deseado de  $x_1$ , de este modo la derivada de  $z_1$  es tal que:

$$\dot{z}_1 = f_{11}(x_1)k + x_2 + \Delta_1(x_1, t) - \dot{y}_d \quad (7)$$

con,  $k$  es un parámetro desconocido derivado de los efectos aerodinámicos y  $\Delta_1(x_1, t)$  es un parámetro de la dinámica no modelada. Mediante el análisis de Lyapunov se determina la relación:

$$\lambda \dot{x}_{2d} + x_{2d} = \bar{x}_{2d}, \quad x_{2d}(0) = \bar{x}_{2d}(0); \quad (8)$$

donde,  $\lambda > 0$  es el parámetro de ajuste [6].

De lo anterior, los autores presentan las simulaciones de estabilidad de los estados  $x_1$  y  $x_2$  considerando una altura de 6.4 ft y una velocidad de viento de 337 ft/s.

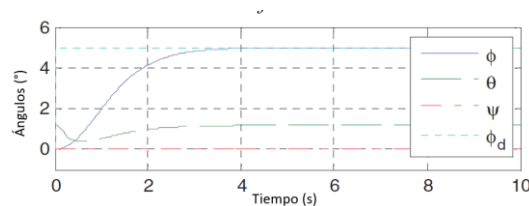


Fig. 10 Simulación de estabilidad y posicionamiento de  $\phi$  con el control backstepping.

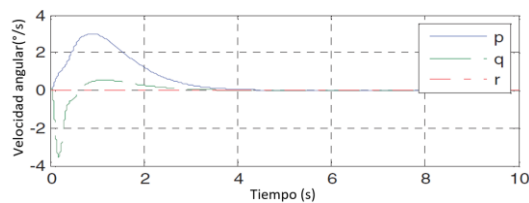


Fig. 11 Simulación de velocidades angulares con control backstepping.

En [6] se concluye que el backstepping necesita usar un algoritmo recursivo para llevar a cabo la derivación al control virtual, por lo que puede causar una “indeterminación diferencial” que hace que el controlador sea muy complejo. Esta desventaja es más prominente en el sistema de orden superior como los aviones de rotor basculante. Sin embargo, [6] solo se realiza la estabilización de los ángulos de inclinación manteniendo las velocidades de traslación constantes limitando el control de posicionamiento de la aeronave.

Además, en [30] diseñan un control por retroalimentación de estados para el control de altura variando el ángulo de los rotores de un VANT Tilt-rotor de dos rotores principales, el esquema de control planteado se ilustra en la Fig. 12. El sistema de control de vuelo incluye tres bucles: el bucle interno es el bucle de aumento que se utiliza para mejorar la estabilidad del sistema; El bucle intermedio es la bruja del circuito de control de actitud para ajustar el ángulo de actitud del VANT Tilt-rotor; El bucle exterior es el bucle de control de altitud. Función de rendimiento cuadrado para la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$J = \frac{1}{2} X^T F x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [X^T Q X + U^T R U] dt \quad (9)$$

donde,  $X$  es el vector  $[V_x V_z \theta \dot{\theta}]^T$ , con  $V_x$  y  $V_z$  define las velocidades en  $x$  y  $y$  respectivamente,  $\theta$  es el ángulo de pitch. Por otra parte, la ecuación hamiltoniana se compone por:

$$H(X, U, \lambda) = \frac{1}{2} [X^T Q X + U^T R U] + \lambda^T [A X + B U] \quad (10)$$

De este modo, en [30] se propone el controlador como de la forma:

$$U = -R^{-1} B \lambda \quad (11)$$

y

$$\lambda = P X \quad (12)$$

La matriz  $P$  es la respuesta a la ecuación de Riccati  $A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P - Q = 0$ .

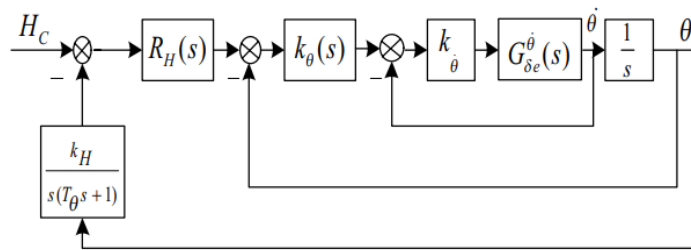


Fig. 12. Esquema de control propuesto en [30].

De lo anterior, el sistema propuesto del sistema linealizado con un ángulo de inclinación de las góndolas de  $-45^\circ$  definido por las matrices  $A$ ,  $B$  y  $C$  son:

$$A = \begin{bmatrix} -0.3644 & 0.0498 & -9.81 & 8.86 \\ 0.2314 & -1.093 & 0 & 97.96 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.068 & -0.1067 & 0 & -1.915 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 5.401 \\ 6.198 \\ 0 \\ -2.675 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

R se define como 1 y  $Q = [100 \ 10 \ 80 \ 90]^T$ . Así la acción de control resultante resulta.

$$U = 111.64 (\theta - \theta_d) + 1.65 \dot{\theta} \quad (16)$$

La respuesta de la simulación del sistema en la altitud e inclinación del VANT se ilustra por las Figs. 13 y 14.

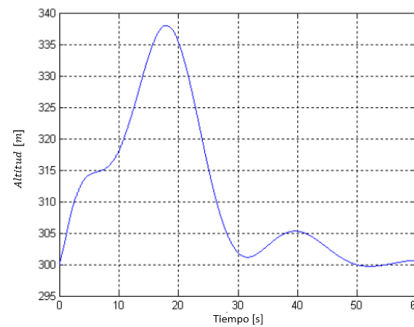


Fig. 13. Respuesta de simulación en la altitud con un valor deseado de 300 m [30].

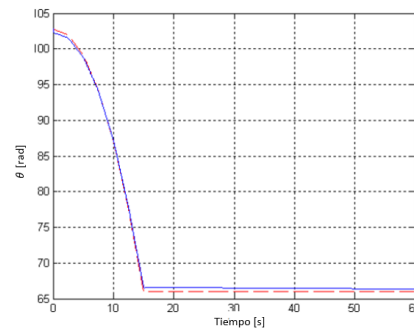


Fig. 14. Respuesta de estabilidad del ángulo de pitch [30].

Similarmente, en [31] se presenta el control de uno de los seis grados de libertad de un VANT Tilt-rotor de tres rotores consiguiendo únicamente la estabilización de estos. En primer lugar, se adopta el Algoritmo Genético (GA), que posee una fuerte capacidad en la búsqueda de óptimo global, para identificar una solución gruesa. En segundo lugar, la solución gruesa se refina aún más mediante el método Levenberg-Marquardt (LM) para el

óptimo local preciso. El método de acabado innovador combina las ventajas de estos dos algoritmos y se aplica al control del Tilt-rotor en el proceso de transición de despegue de inclinación.

Por otro lado, en [32] se desarrolla un esquema de control de vuelo de conmutación resistente basado en el observador de perturbaciones para un sistema linealizado. En primer lugar, se proporciona el modelo de conmutación cinemática longitudinal lineal de la aeronave, y se diseña la regla de conmutación basada en el tiempo de permanencia promedio. Luego, la perturbación externa es compensada por el observador de perturbaciones diseñada, el método de control  $H_\infty$  se usa para suprimir la perturbación limitada por la energía. Además, se introduce el método de control no frágil para reducir el efecto de las perturbaciones de ganancia del controlador. Con la función Lyapunov, las ganancias del controlador se resuelven mediante la caja de herramientas de desigualdad de matriz lineal.

Los trabajos mencionados anteriormente han aportado al diseño, modelado y control teniendo resultados favorables con excepción a los esquemas de control, los cuales son presentados a nivel simulación y aún no son capaces de realizar la navegación autónoma y transición de etapas de vuelo de los VANT Tilt-rotos haciendo uso de un solo esquema de control. Por esto, se puede observar que existen oportunidades de investigación en el diseño de controladores para los VANT Tilt-rotos que permitan la navegación autónoma de la aeronave manteniendo la estabilidad de vuelo en la transición del modo de vuelo. Además, en los trabajos reportados el ángulo de inclinación de los rotores es definido por la etapa de transición de vuelo. Esto limita al esquema de control poder regular la inclinación de los rotores según sea requerido y así optimizar las acciones de control ([32], [33], [34], [35]).

## VI. CONCLUSIONES

Las aeronaves Tilt-rotor resultan ser bastantes prácticas permitiendo fusionar las técnicas de vuelo de una aeronave de ala rotatoria y de ala fija. A pesar de proporcionar propiedades de vuelo implica un reto en el desarrollo de los esquemas de control por sus dinámicas no lineales. Se han desarrollado diferentes modelos funcionales de VANTs Tilt-rotor de tres rotores que han permitido realizar experimentaciones de vuelo, para la validación de pruebas de vuelo. De forma similar modelo matemático se puede concentrar en el sistema (1).

En cuanto a los esquemas de control la mayoría de los trabajos reportados documentan trabajos a nivel simulación donde muestran haber logrado mantener la estabilidad los ángulos de rotación de la aeronave mientras que otros trabajos consiguen realizar adicionalmente el seguimiento de trayectoria en la altura del VANT. Esto refleja la oportunidad de desarrollo en ellos esquemas de control de los VANT Tilt-rotor para resolver el seguimiento de trayectorias en el desplazamiento de los tres ejes y estabilidad de rotación del Tilt-rotor. Más aún, el diseño de un esquema de control que defina por sí mismo la inclinación de los rotores en función de las trayectorias de seguimiento ofertaría la adaptabilidad bajo las condiciones de vuelo de forma automática ya que los esquemas de control existentes consideran la inclinación de las góndolas como un factor predefinido.

Del mismo modo, la implementación del esquema de control de forma embebida es un problema para resolver ya que involucra la integración del esquema de control, la instrumentación y la solución de los efectos aerodinámicos siendo un campo con oportunidades de investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores se encuentran en el Instituto Politécnico Nacional y son quienes expresan su gratitud por el apoyo recibido. Este artículo fue parcialmente respaldado por el Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN bajo subvenciones 20240039, 20240693, 200241125 y 20240014. Víctor G. Sánchez Meza es un becario de CONAHCYT (964590) y está agradecido por el apoyo recibido.



## REFERENCIAS

- 12
- [1] R. G. Hernández-García, H. Rodríguez-Cortés, "Transition flight control of a cyclic tiltrotor UAV based on the Gain-Scheduling strategy," 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 951-956, 2015, <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2015.7152383>
  - [2] R. G. Hernández-García, H. Rodríguez-Cortés, "A total energy control system design for the transition phase of a tiltrotor aerial vehicle," IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, no. 30, pp. 52-57, 2013, <https://doi.org/10.3182/20131120-3-FR-4045.00043>
  - [3] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, D. Nakazawa, *Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles*, Springer Science, 2010, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-53856-1>
  - [4] K. Lu, C. Liu, Z. Wang, W. Wang, "Modeling and control of tilt-rotor aircraft," 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp. 550-553, 2016.
  - [5] R. W. Prouty, *Helicopter performance, stability, and control*, Krieger Publishing Company, 1995.
  - [6] T. Liang, W. Wang, S. Wu and K. Lu, "Nonlinear attitude control of tiltrotor aircraft based on dynamic surface adaptive backstepping," 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), no. 29, pp. 603-608, 2017.
  - [7] Z. Liu, Y. He, L. Yang, J. Han, "Control techniques of tilt rotor unmanned aerial vehicle systems: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, no. 1, pp. 135-148, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.11.001>
  - [8] L. Young, W. Chung, A. Paris, D. Salvano, R. Young, H. Gao, V. Cheng, K. Wright, "Civil tiltrotor aircraft operations," 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than, p. 6898, 2011.
  - [9] F. Zhang, L. Ping, T. Jiang, F. Shi, "Research on modeling of the tilt tri-rotor unmanned aerial vehicle's dynamic," DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, vol. icmca, 2017. <https://doi.org/10.12783/dtetr/icmca2017/12362>
  - [10] V. D. Quy, L. T. T. Nhung, N. Q. Hung, N. N. Quynh, "Modeling and Controller Design of a Tilt tri-rotor UAV," *Regional Conference in Mechanical Manufacturing Engineering*, pp. 1356-1368, 2021.
  - [11] A. S. Saeed, A. B. Younes, C. Cai, G. Cai, "A survey of hybrid unmanned aerial vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 98, pp. 91-105, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.007>
  - [12] W. Gai, J. Zhang, L. Huang, Y. Li, "Transition flight control using adaptive neutral network dynamic inversion for Canard Rotor/Wing UAV," *The 26th Chinese Control and Decision Conference*, pp. 4210-4214, 2014, <https://doi.org/10.1109/CCDC.2014.6852919>
  - [13] J. E. Low, L. T. S. Win, D. S. B. Shaiful, C. H. Tan, G. S. Soh, S. Foong, "Design and dynamic analysis of a Transformable Hovering Rotorcraft (THOR)," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 6389-6396, 2017, <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989755>
  - [14] B. Handy, *Royal Air Force Aircraft and Weapons*, USA: Ministry of Defense, pp. 8-9, 2023.
  - [15] D. R. Jenkins, T. Landis, J. Miller, *American X-Vehicles: An Inventory X-1 to X-50 Centennial of Flight Edition*, USA: Createspace Independent Publishing Platform, 2003.
  - [16] K. T. Oner, E. Cetinsoy, M. Unel, M. F. Aksit, I. Kandemir, K. Gulez, "Dynamic model and control of a new quadrotor unmanned aerial vehicle with tilt-wing mechanism," *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICCARV'08)*, vol. 35, pp. 58-63, 2008.
  - [17] J. J. Dickeson, D. Miles, O. Cifdaloz, V. L. Wells, A. A. Rodriguez, "Robust LPV H-infinity gain-scheduled hover-to-cruise conversion for a tilt-wing rotorcraft in the presence of CG variations," 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control, New York, USA, pp. 2773-2778, 2007, <https://doi.org/10.1109/ACC.2007.4283148>
  - [18] W. Fredricks, M. Moore, R. Busan, "Benefits of Hybrid Electric Propulsion to Achieve 4x Increase in Cruise Efficiency for a VTOL Aircraft," *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Los Angeles, USA, 2013. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140001088>
  - [19] K. Muraoka, N. Okada, D. Kubo, "Quad tilt wing vtol uav: Aerodynamic characteristics and prototype flight," *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Seattle, USA, p. 1834, 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-1834>
  - [20] T. Ostermann, J. Holsten, Y. Dobrev, D. Moormann, "Control concept of a tiltwing uav during low speed manoeuvring," *Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences: ICAS Brisbane*, Australia, vol. 1190, 2012. Available: [https://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/752.PDF](https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/752.PDF)
  - [21] J. Holsten, T. Ostermann, Y. Dobrev, D. Moormann, "Model validation of a tiltwing UAV in transition phase applying windtunnel investigations," *Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences ICAS2012*, Australia, vol. 2012, pp. 1-10, 2012. Available: <https://www.fsd.rwth-aachen.de/cms/fsd/Forschung/Publikationen/~jpcf/Details/?lidix=1&file=116436>
  - [22] M. Streebly, *IHS Jane's All the World's Aircraft: Unmanned*, USA: IHS Global, 2013.

- [23] S. Yanguo, W. Huanjin, "Design of flight control system for a small unmanned tilt rotor aircraft," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 22, no. 3, pp. 250-256, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60095-3](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60095-3)
- [24] Y. O. Aktas, U. Ozdemir, Y. Dereli, A. F. Tarhan, A. Cetin, A. Vuruskan, B. Yuksek, H. Cengiz, S. Basdemir, M. Ucar, M. Genctay, A. Yukselen, I. Ozkol, M. Kaya, G. Inalhan, "A low cost prototyping approach for design analysis and flight testing of the TURAC VTOL UAV," *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, USA, pp. 1029-1039, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842354>
- [25] C. Papachristos, K. Alexis, A. Tzes, "Towards a high-end unmanned tri-tiltrotor: Design, modeling and hover control," *2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Barcelona, España, pp. 1579-1584, 2012. <https://doi.org/10.1109/MED.2012.6265864>
- [26] E. Paiva, M. Llano, J. Rodas, R. Gregor, J. Rodríguez, M. Gomez, "Design and implementation of a VTOL flight transition mechanism and development of a mathematical model for a tilt rotor UAV," *2018 IEEE international conference on automation/XXIII congress of the Chilean association of automatic control (ICA-ACCA)*, Concepción, Chile, pp. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609836>
- [27] C. Chen, N. Wang, J. Zhang, G. He, Y. Li, "Plan for the tilt angles of the tilt rotor unmanned aerial vehicle based on gauss pseudospectral method," *2020 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, China, pp. 76-80, 2020. <https://doi.org/10.1109/ISCID51228.2020.00024>
- [28] B. Hobby, "BlitzRCWorks Coast Guard VTOL V-22 Osprey RC," [Online]. Available: <https://www.bananahobby.com/5-ch-blitzrcworks-coast-guard-vtol-v-22-osprey-rc-warbird-airplane-arf.html> [Accessed 2024].
- [29] C. Chao, S. Lincheng, Z. Daibing, Z. Jiyang, "Mathematical modeling and control of a tiltrotor UAV," *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Ningbo, China, pp. 2016-2021, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2016.7832150>
- [30] F. Yonghua, Y. Jun, "Design of Tiltrotor Flight Control System Using Optical Control," *2007 Chinese Control Conference*, Zhangjiajie, China, pp. 687-691, 2007. <https://doi.org/10.1109/CHICC.2006.4347033>
- [31] X. Wang, J. Chen, Q. Zhang, J. Zhang, H. Cong, "Research on Innovative Trim Method for Tiltrotor Aircraft Take-Off Based on Genetic Algorithm," *Journal of Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8876867>
- [32] Z. An, S. Shao, "Resilient Switching Control of the Tilt-Rotor Aircraft Based on the Disturbance Observer," *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, Sanya, China, pp. 756-761, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICARM58088.2023.10218762>
- [33] F. J. Giner Bellot, *Diseño y construcción de un vehículo aéreo no tripulado autónomo*, València: Universidad Politécnica de València, 2018. Available: <http://hdl.handle.net/10251/106894>
- [34] E. Çetinsoy, *Design, construction and flight control of a quad tilt-wing unmanned aerial vehicle*, İstanbul, Türkiye: Sabancı University, 2010. Available: <https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/24081/>
- [35] C. Papachristos, K. Alexis, A. Tzes, "Hybrid model predictive flight mode conversion control of unmanned quad-tiltrotors," *2013 European Control Conference (ECC)*, Zurich, Switzerland, pp. 1793-1798, 2013. <https://doi.org/10.23919/ECC.2013.6669816>

## Simulación numérica de casco mediante interacción de elementos 2D y 3D

Numerical simulation of helmet through interaction of 2D and 3D elements

Iván Lenín **Cruz Jaramillo**<sup>1</sup>, Martín **Domínguez Sánchez**<sup>2</sup>  
María del Carmen **López Hernández**<sup>3</sup>, Víctor Manuel **Ferreyra Coroy**<sup>4</sup>

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tlaxiaco  
Departamento de Ingeniería Industrial, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-7832-1686 | breaking\_182@hotmail.com

<sup>2</sup>ORCID: 0009-0005-4725-2664 | martin\_industrial@test.edu.mx

<sup>3</sup>ORCID: 0009-0003-1133-2107 | carmen.lopez@test.edu.mx

<sup>4</sup>ORCID: 0009-0009-7934-4546 | victor\_fc@test.edu.mx

Recibido 12/08/2024, aceptado 24/11/2024.

### Resumen

Las lesiones en la cabeza causadas por accidentes de motocicleta son una de las principales causas de mortalidad grave, siendo el traumatismo craneoencefálico, las lesiones cerebrales, la lesión en la médula espinal, las lesiones faciales y en el cuello las más comunes. El casco es un componente esencial para proteger la cabeza durante un accidente. Un casco moderno generalmente cuenta con una carcasa exterior rígida fabricada en termoplástico o fibra de vidrio, diseñada para reducir la energía del impacto inicial. El modelado 3D en CAD permite diseñar la carcasa del casco, generando un discretizado controlado con elementos hexaédricos para 3D y cuadráticos para 2D, para realizar simulaciones numéricas bajo las condiciones de frontera especificadas en la norma PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016. Cada simulación se ejecuta manteniendo las mismas condiciones de frontera y propiedades mecánicas tanto para el casco de ABS como para el bloque de acero A36, variando únicamente los elementos 2D y 3D en cada pieza (casco y bloque). Las simulaciones, realizadas durante 20 ms, permiten obtener deformaciones unitarias, esfuerzos y energía interna. Los resultados muestran que, al emplear un material rígido, el tiempo de cómputo es similar independientemente del tipo de elementos (2D o 3D). No obstante, al utilizar elementos 2D para materiales deformables, el tiempo de cómputo se reduce en un 88.4% en comparación con los elementos 3D. Las variaciones observadas se reflejan principalmente en la rigidez del material y la energía interna, debido a la mayor cantidad de elementos en el espesor del material cuando se utilizan elementos 3D. Sin embargo, el esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima son iguales, independientemente del tipo de elemento empleado. La interacción entre elementos 2D y 3D no genera variaciones significativas, excepto en el tiempo de iteración, que aumenta en 0.05 ms, debido a que los elementos 2D, al tener menos elementos en el espesor, requieren más tiempo para generar la interacción. Sin embargo, este incremento es insignificante.

**Palabras clave:** simulación numérica, método elementos finitos, dinámica estructural, elementos 3D, elementos 2D.

### Abstract

Head injuries resulting from motorcycle accidents are a leading cause of severe mortality, with the most common injuries being traumatic brain injury, brain lesions, spinal cord injuries, facial injuries, and neck injuries. The helmet is a critical component for protecting the head during a motorcycle accident. A modern helmet typically features a rigid outer shell made from thermoplastic or fiberglass, designed to reduce the initial impact energy. 3D CAD modeling allows for the design of the helmet shell, creating a controlled discretization with hexahedral elements for 3D and quadratic elements for 2D to perform numerical simulations under the boundary conditions specified by the PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016 standard. Each simulation is conducted with the same boundary conditions and mechanical properties for both the ABS helmet and the A36 steel block, with only the 2D and 3D elements of each piece (helmet and block) varying. The simulations, performed over 20 ms, provide unit deformations, stresses, and internal energy. The results show that, when using a rigid material, the computation time is similar regardless of the element type (2D or 3D). However, when 2D elements are used for deformable materials, the computation time is reduced by 88.4% compared to 3D elements. The observed variations mainly reflect differences in material rigidity and internal energy, due to the higher number of elements in the material thickness when using 3D elements. Nevertheless, the maximum stress and maximum unit deformation are the same, regardless of the element type used. The interaction between 2D and 3D elements does not result in significant variations, except in the iteration time, which increases by 0.05 ms. This is due to 2D elements, having fewer elements in the material thickness, requiring more time to generate interaction. However, this increase is insignificant.

**Index terms:** numerical simulation, finite element method, structural dynamics, 3D elements, 2D elements.

## I. INTRODUCCIÓN

El casco de protección ha sido un elemento esencial para salvaguardar la integridad física de los motociclistas, evolucionando a lo largo de la historia para adaptarse a diferentes tipos de impactos. La necesidad de desarrollar cascos específicamente para motociclistas surgió poco después de la popularización de la motocicleta a inicios del siglo XX. Marcas como Triumph en Inglaterra y Harley-Davidson en Estados Unidos lideraron la innovación en respuesta a los requerimientos de seguridad de este nuevo medio de transporte, que ofrecía una alternativa más económica al automóvil [1].

2

Conducir una motocicleta implica un riesgo considerable de accidentes fatales, especialmente entre conductores inexpertos [2]. Las lesiones en la cabeza resultantes de accidentes de motocicleta son una causa significativa de morbilidad y mortalidad [3], destacándose entre las más comunes el traumatismo craneoencefálico, lesiones cerebrales, daños en la médula espinal, lesiones faciales y cervicales [4].

A lo largo del tiempo, la evolución de los cascos ha estado vinculada al desarrollo de nuevos materiales y procesos de fabricación, los cuales han permitido avances significativos en la protección ante impactos [5]. Actualmente, los motociclistas disponen principalmente de tres tipos de cascos: integral, abierto y de media cobertura, siendo este último el que ofrece una menor protección ante lesiones craneales. Los cascos modernos están diseñados con una carcasa externa rígida, fabricada generalmente en termoplástico o fibra de vidrio, con el objetivo de reducir la energía del impacto inicial [6].

Los componentes clave de un casco incluyen el revestimiento de espuma y la carcasa. La espuma tiene la función de absorber la mayor parte de la energía generada por el impacto, mientras que la carcasa actúa como barrera protectora, evitando la penetración de objetos extraños y distribuyendo la fuerza del impacto sobre una superficie más amplia, lo que aumenta la capacidad de absorción de energía del revestimiento [7].

En México, el uso de motocicletas ha experimentado un crecimiento exponencial, pasando de un millón ochenta mil unidades en 2008 a más de cuatro millones en 2018. Este aumento ha sido impulsado en parte por el auge del autoempleo en actividades de distribución de alimentos, entrega de paquetes y compras en línea, fomentado por aplicaciones móviles como Uber, Beat, DiDi y Cabify [8].

La importancia del casco en la protección de los motociclistas es innegable. En este estudio, se utiliza Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) como material para la fabricación de la carcasa de un casco, con el fin de evaluar su comportamiento frente a impactos mediante análisis comparativos utilizando elementos 2D y 3D. Estos análisis se comparan con los valores obtenidos previamente en el trabajo de P.K. Pinnoji et al. [9], explorando las variaciones y la interacción de los elementos 2D y 3D, bajo las mismas condiciones de impacto.

## II. METODOLOGÍA

El presente estudio se implementa el diseño de un casco de protección en talla mediana de 7.5 pulgadas (equivalente a talla 60 en el sistema europeo) [10]. El modelado de la carcasa se llevó a cabo utilizando un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés). A través de las herramientas de modelado de superficies, se realizó una extrusión a partir del croquis del casco. Las tres secciones principales del casco (mandíbula, parte media y parte superior) fueron unidas mediante la operación de cosido en el programa SolidWorks (véase Fig. 1).

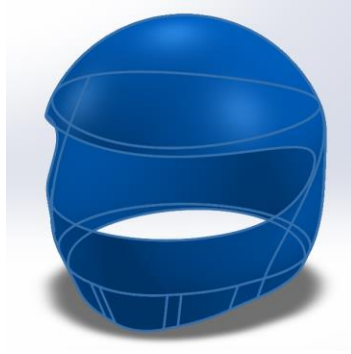


Fig.1. Modelado de carcasa de casco.

Posteriormente, se aplicó un espesor de 4 mm al modelo y se exportó en formato .iges al software HyperMesh 14.0, donde se llevó a cabo el proceso de discretización, obteniendo un modelo tipo shell (sin espesor) compuesto por elementos 2D (véase Fig. 2). La discretización 2D se utilizó para generar un mapeado que permitió la creación de elementos 3D. Los modelos 2D y 3D fueron posteriormente exportados al software LS-DYNA, donde se configuraron los escenarios para los análisis de impacto.

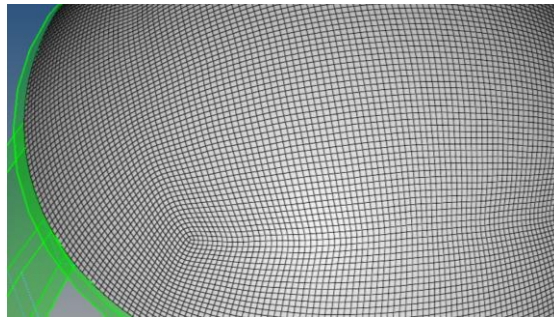


Fig. 2. Proceso de discretizado 2D en HyperMesh.

Las condiciones de frontera se establecieron de acuerdo con la norma PROY-NOM-206-SCFI/SSA2-2016. Para los ensayos de impacto, se seleccionó un bloque plano con un diámetro de 127 mm y un espesor de 25 mm, el cual fue modelado en LS-DYNA como un cilindro sólido. La discretización del bloque se realizó utilizando 72 elementos a lo largo del diámetro y 10 elementos en el espesor (véase Fig. 3).

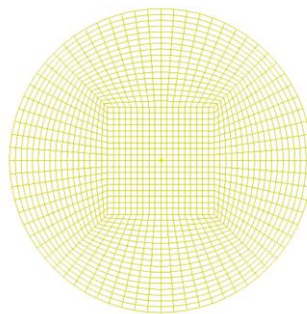


Fig.3. Discretizado de bloque impactador plano.



4

Para el análisis, se asignó al bloque de impacto el material acero A36, cuyas propiedades mecánicas son: densidad de  $7.85 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>, módulo de Young de 200 GPa, límite elástico 0.25 GPa y una relación de Poisson 0.32 [11]. En el caso del casco, se empleó Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) como material, con las siguientes propiedades mecánicas: densidad de  $1.2 \times 10^{-3}$  g/mm<sup>3</sup>, módulo de Young de 2 GPa, límite elástico 34.3 MPa y una relación de Poisson 0.37 [12].

Las condiciones de frontera se establecieron posicionando el casco a una distancia inicial de 0.1 mm respecto al bloque, con una velocidad de impacto de 7.5 mm/ms. Una vez definidas las propiedades de los materiales, la velocidad del bloque y la gravedad se procedió a montar los escenarios de impacto. El bloque fue restringido en su parte inferior para mantenerlo fijo durante la colisión con el casco.

El análisis se replicó en cuatro configuraciones distintas para evaluar la interacción entre los modelos 2D y 3D: casco 3D contra bloque 3D, casco 2D contra bloque 3D, casco 3D contra bloque 2D, y casco 2D contra bloque 2D (véase Fig. 4).

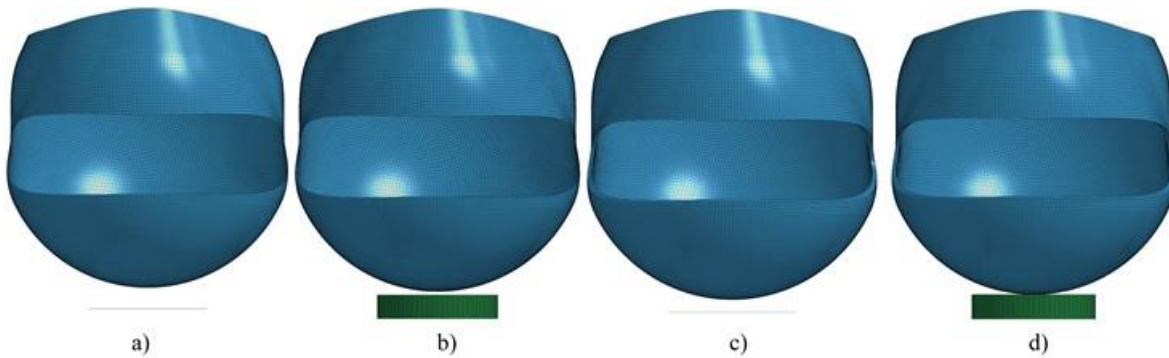


Fig. 4. Escenarios de simulación con carcasa de casco de 4 mm: a) Casco 2D-Boque 2D, b) Casco 2D-Bloque 3D, c) Casco 3D-Bloque 2D, d) Casco 3D-Bloque 3D.

Aunque la distancia entre el casco y el bloque se establece en 0.1 mm, en la Fig. 5 se observa una separación mayor en los escenarios que utilizan elementos 2D. Esta diferencia se debe a las características de los elementos tipo shell, a los cuales se les asignan propiedades de espesor. El espesor de los elementos shell se distribuye simétricamente alrededor de su plano medio, por lo que la mitad del espesor se aplica a cada lado del objeto. Esto genera la apariencia de una mayor separación entre el casco y el bloque en comparación con el modelo de elementos sólidos 3D. Este fenómeno es más evidente cuando se modifica la visualización de los elementos tipo shell, asignándoles un espesor visual, lo que permite apreciar mejor las diferencias en la separación (Fig. 5). La representación gráfica con espesor ayuda a comprender mejor la geometría y la interacción de los elementos en los escenarios de impacto.

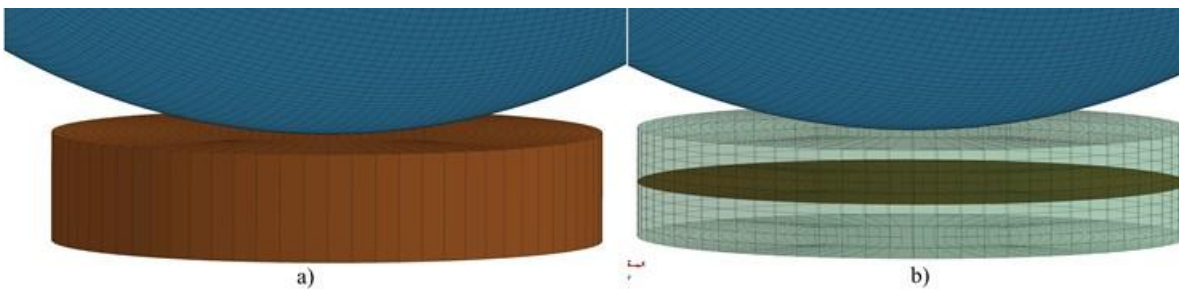


Fig. 5. Elementos tipo shell: a) Bloque con visualización de espesor, b) Elemento Shell central con espesor simétrico.

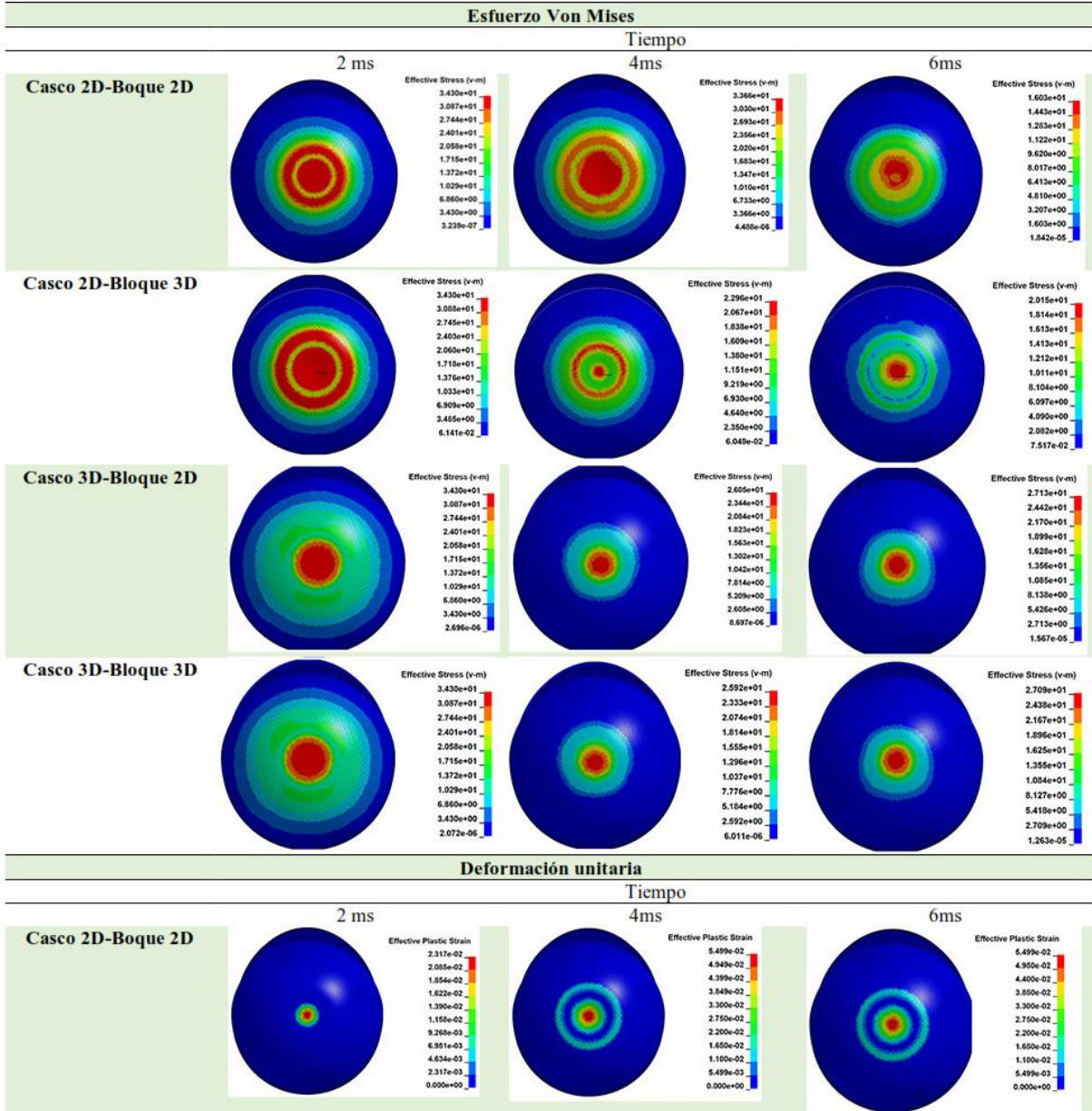


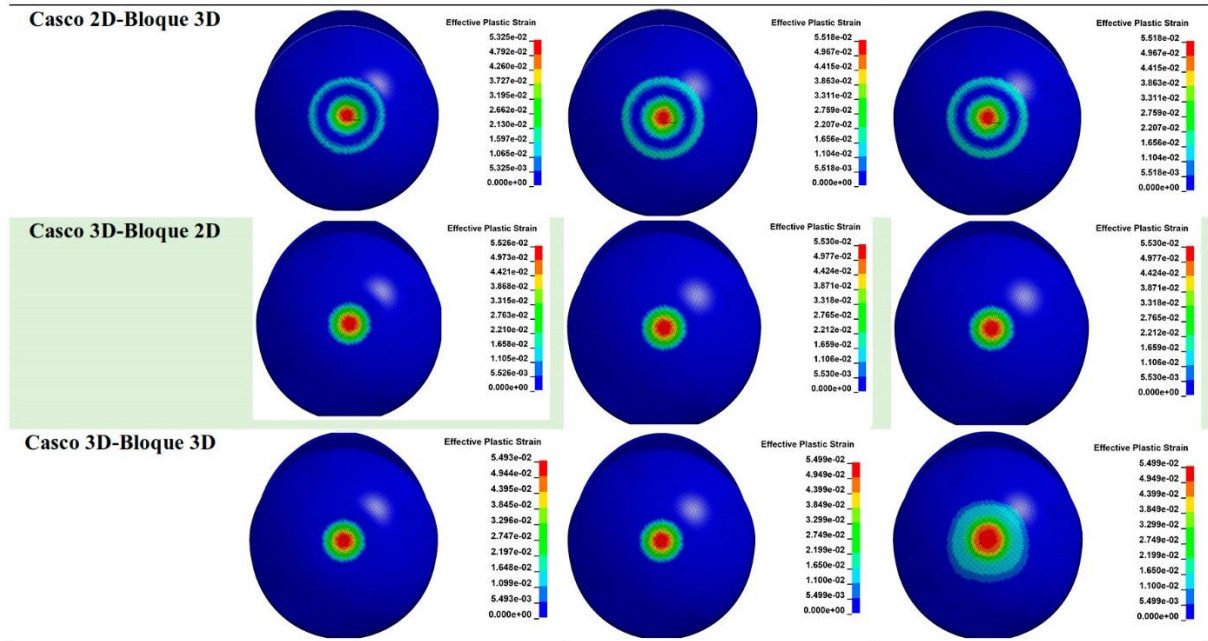
### III. RESULTADOS

Las simulaciones se llevan a cabo durante 20 ms, capturando la cinemática del impacto desde el inicio de la colisión entre el bloque y la carcasa, que ocurre a los 2 ms. A partir de este momento, se observa un incremento de 2 ms en los intervalos hasta llegar a los 6 ms, momento en el cual se produce el rebote del casco. Se presentan los esfuerzos y las deformaciones unitarias, generados en las carcasas de los cascos (véase Tabla 1).

Tabla 1  
CINEMÁTICA DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES UNITARIAS.

5





En la Tabla 1 se observa que al emplear elementos 2D para el casco, se presentan ligeras variaciones en los esfuerzos al cambiar los elementos del bloque de 2D a 3D. No obstante, cuando se utilizan elementos 3D para el casco, los valores de los esfuerzos permanecen consistentemente similares, independientemente de los elementos empleados para el bloque. Además, el comportamiento de las deformaciones unitarias muestra una mayor congruencia al usar elementos 3D para el casco. Aunque las variaciones en el caso al utilizar elementos 2D son más notables, estas diferencias no son significativas.

Las gráficas de esfuerzo-deformación para cada uno de los análisis realizados (véase Fig. 6) se generaron a partir de los valores máximos de esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidos en intervalos de un milisegundo durante los 20 ms de la simulación.

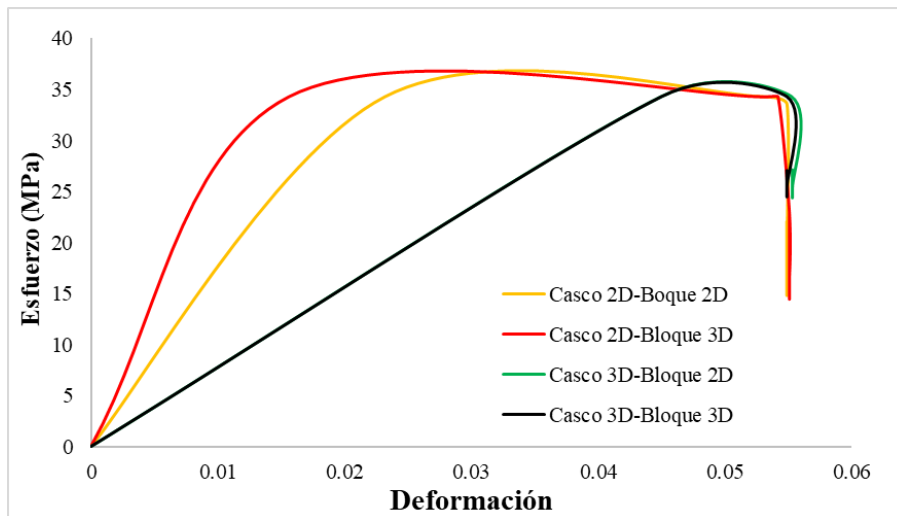


Fig. 6. Gráfica esfuerzo-deformación.

Como se observa en la Fig. 6, el impacto provoca que el esfuerzo alcance el límite elástico del ABS, de 34.3 MPa. Sin embargo, al utilizar elementos 2D en el análisis del casco, se obtiene una mayor rigidez en comparación con el uso de elementos 3D. Esta diferencia se debe a que, en el caso con los elementos 3D, el espesor del material se discretiza en cuatro elementos con un tamaño de 1 mm cada uno, mientras que los elementos 2D representan todo el espesor con un solo elemento, lo que influye en la variación de la rigidez. A pesar de las diferencias en los elementos utilizados, en todos los casos se observa una deformación unitaria máxima de 0.055.

7

Un parámetro clave a considerar es la energía interna de la carcasa del casco, ya que un mayor valor de energía interna refleja una mayor capacidad de absorción del impacto, lo que reduce la transmisión de energía al cráneo y, por tanto, disminuye el riesgo de lesiones. La Fig. 7 presenta una comparación de la energía interna correspondiente a cada una de las carcasas de casco analizadas.

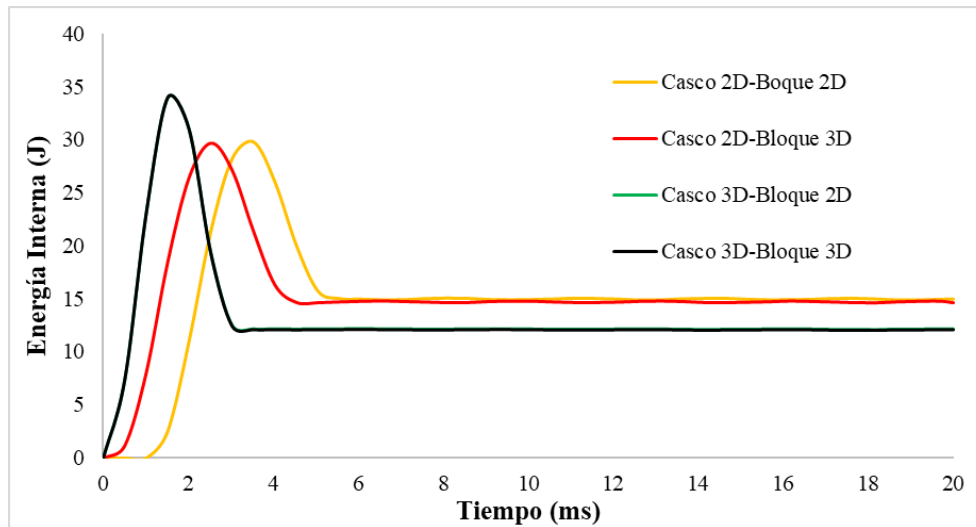


Fig. 7. Energía interna del casco.

Cuando el casco se modela con elementos 3D, su comportamiento es consistente, independientemente de los elementos utilizados para el bloque. En cambio, con el casco modelado con elementos 2D, la interacción con un bloque 3D ocurre ligeramente más rápido, iniciando al milisegundo, mientras que con un bloque 2D el inicio se retrasa 0.5 ms. No obstante, ambos modelos alcanzan el mismo pico de energía interna de 29.7 J, estabilizándose en 14.8 J. La variación en los picos de energía interna entre los cascos modelados con elementos 3D y 2D es de 4.3 J, siendo mayor en los modelos 3D, mientras que la energía estabilizada difiere en 2.6 J, siendo mayor en los modelos 2D.

Los tiempos de cómputo de las simulaciones también varían según el tipo de elementos utilizados, como se detalla en la Tabla 2.

TABLA 2  
TIEMPOS DE CÓMPUTO

Análisis	Tiempo
Casco 3D-Bloque 3D	26 minutos 34 seconds
Casco 2D-Boque 2D	2 minutos 34 seconds
Casco 3D-Bloque 2D	26 minutos 34 seconds
Casco 2D-Bloque 3D	3 minutos 45 seconds

Como se muestra en la Tabla 2, el uso de elementos 2D en comparación con elementos 3D reduce el tiempo de cómputo en un 88.4%. No obstante, cuando se aplican elementos 2D en materiales rígidos, como en el caso del bloque, el tiempo de cómputo es similar al de los elementos 3D, dado que en estos casos el bloque no genera datos adicionales y solo transmite la energía del impacto.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en esta investigación en comparación con los reportados por Pinnoji et al. [9]. Esta comparación valida la consistencia de los resultados y respalda la fiabilidad del modelo empleado en este estudio.

∞

TABLA 3  
COMPARATIVO DE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO CASCO DE 4 MM DE ESPESOR

Casco	Deformación unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Energía interna en la cáscara antes del rebote (J)
Pinnoji	0.04	34.3	30.5
Casco 3D-Bloque 3D	0.055	34.3	33.9
Casco 2D-Bloque 2D	0.055	34.3	29.7
Casco 3D-Bloque 2D	0.055	34.3	33.9
Casco 2D-Bloque 3D	0.055	34.3	29.7

Como se muestra en la Tabla 3, no se observan variaciones en las deformaciones unitarias entre los análisis realizados. Sin embargo, en comparación con el estudio de Pinnoji, existe una diferencia de 0.015. En cuanto a los esfuerzos, los resultados obtenidos en todos los análisis son consistentes con los reportados por Pinnoji. Respecto a la energía interna de la carcasa antes del rebote provocado por el impacto contra el bloque, se registra una variación de 0.8 J inferior al usar elementos 2D, y de 3.4 J superior al usar elementos 3D, en comparación con los valores reportados por Pinnoji.

#### IV. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre la utilización de elementos 2D y 3D en la simulación del comportamiento estructural del casco de ABS revela diferencias en términos de rigidez, precisión de los resultados y tiempos de cómputo. Al emplear elementos 2D para el casco, se observan ligeras variaciones en los esfuerzos al modificar los elementos del bloque de 2D a 3D, aunque dichas variaciones no son significativas. En contraste, al utilizar elementos 3D para el casco, los esfuerzos y las deformaciones unitarias muestran una mayor consistencia, independientemente de los elementos utilizados en el bloque. Los materiales rígidos, independientemente de si se utilizan elementos 2D o 3D en su modelado, transmiten la misma cantidad de energía.

En cuanto a los tiempos de cómputo, la implementación de elementos 2D resulta significativamente más eficiente, con una reducción del 88.4% en comparación con los elementos 3D. Sin embargo, en materiales rígidos como el bloque, esta ventaja en el tiempo de cómputo desaparece, ya que ambos tipos de elementos muestran tiempos similares.

Los resultados de los análisis indican que la implementación de elementos 2D es más factible para piezas de bajo espesor, ya que las variaciones obtenidas con respecto a los elementos 3D no son significativas y los tiempos de cómputo se reducen considerablemente. Esto permite obtener resultados numéricos viables en las simulaciones sin comprometer la precisión del análisis.

Los análisis de elemento finito permiten desarrollar pruebas de problemas complejos no lineales reduciendo tiempos y costos respecto a las pruebas experimentales, sin embargo, pese a ello las simulaciones dinámicas conllevan tiempos elevados de cómputo, por lo cual es necesario implementar la combinación de elementos 2D y 3D para sistemas grandes y complejos para disminuir tiempo de cómputo.

#### REFERENCIAS

9

- [1] J. Newman, "The biomechanics of head trauma and the development of the modern helmet. How far have we really come," *In Proceedings of the IRCOBI Conference*, 2005, September 21-23, Prague, Czech Republic pp. 10. Available: <https://wblldb.lievers.net/10041415.html>
- [2] K. Kardamanidis, A. Martiniuk, R. Q. Ivers, M. R. Stevenson, K. Thistlethwaite, "Motorcycle rider training for the prevention of road traffic crashes". *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 10, CD005240, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005240.pub2>
- [3] B. C. Liu, R. Ivers, R. Norton, S. Boufous, S. Blows, S. K. Lo, "Helmets for preventing injury in motorcycle riders". *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 1, CD004333, 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004333.pub3>
- [4] M. Tabary, S. Ahmadi, M. H. Amirzade-Iranaq, M. Shojaei, M. S. Asl, Z. Ghodsi, V. Rahimi-Movaghar, "The effectiveness of different types of motorcycle helmets—A scoping review," *Accident Analysis & Prevention*, 154, 106065, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106065>
- [5] F. A. O. Fernandes, R. A. De Sousa, "Motorcycle helmets—A state of the art review," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 56, pp.1-21, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.011>
- [6] W. Y. Yu, C. Y. Chen, W. T. Chiu, M. R. Lin, "Effectiveness of different types of motorcycle helmets and effects of their improper use on head injuries," *International journal of epidemiology*, vol. 40, no.3, pp. 794-803, 2011, doi: <https://doi.org/10.1093/ije/dyr040>
- [7] F. M. Shuaeib, A. M. S. Hamouda, M. M. Hamdan, Umar, R. R. Umar, M. S. J. Hashmi, "Motorcycle helmet: Part II. Materials and design issues," *Journal of materials processing technology*, Vol.123, no. 3, pp. 422-431, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00047-X)
- [8] A. L. Gutiérrez, "Las motos en México se multiplican por 4... y tus "antojos" serían la razón". *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/las-motos-en-mexico-se-multiplican-por-4-y-tus-antojos-serian-la-razon/> (accessed Oct. 22, 2024).
- [9] P. K. Pinnoji, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck, R. Willinger, "Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments and numerical modeling," *International Journal of Impact Engineering*, vol.37, no. 3, pp. 274-284, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.013>
- [10] DOF - Diario Oficial de la Federación. "Gob.mx" [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5524337&fecha=29/05/2018](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5524337&fecha=29/05/2018) (accessed Jun. 8, 2024).
- [11] R.C. Hibberler, *Mecánica de materiales*, 6th ed., Pearson Educación: Naucalpan de Juárez, México, pp. 894, 2006.
- [12] S. K. Totla, A. M. Pillai, M. Chetan, C. Warad, S. K. Vinodkumar, A. Y. Patil, B. B. Kotturshettar, "Analysis of helmet with coconut shell as the outer layer," *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pp. 365-373, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.047>



## Caracterización mecánica de defectos en las Unidades de Líneas de Acero (ULA) operativas en pozos petroleros

Mechanical characterization of defects in slickline units (LSUs) operating in oil wells

Mauricio Arellano Pastrana<sup>1</sup>, Jesus Bermúdez Vilchiz<sup>2</sup>, Apolinar Albiter Hernández<sup>3</sup>,  
Víctor Augusto Castellanos Escamilla<sup>4</sup>, Iván Enrique Martínez Merlín<sup>5</sup>

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla,  
División de Estudios de Posgrado e Investigación, Estado de México, MÉXICO

<sup>1</sup>ORCID: 0009-0001-5445-8258 | M18250512@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>2</sup>ORCID: 0009-0000-0137-0458 | M18250511@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0002-9097-5981 | aalbiter@imp.mx

<sup>4</sup>ORCID: 0000-0001-8511-4477 | victor.ce@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>5</sup>ORCID: 0000-0001-9030-5024 | iemerlin@hotmail.com

Recibido 07/11/2024, aceptado 20/12/2024.

### Resumen

Las actividades en pozos petroleros se ven afectadas con fallos catastróficos desencadenados por el deterioro en las líneas de acero en diferentes operaciones mecánicas, inspeccionarías y de rastreo. Es por ello que en este trabajo se prueban diferentes tipos de daños en las líneas de acero (con profundidades de 0.5, 1 y 1.5 mm y anchuras de 1, 4 y 6.5 mm, además de perforaciones circulares de 2.5 mm de diámetro a las mismas profundidades) las cuales serán sometidas a cargas de tensión controladas, con el propósito de caracterizar las respuestas mecánicas de estas estructuras bajo condiciones operativas en pozo. Se realizaron ensayos de tensión para evaluar la resistencia y el comportamiento de las líneas de acero en condiciones de esfuerzo tensil. Estos ensayos permiten determinar los límites de elasticidad, la resistencia máxima y alargamiento máximo, que son indicadores cruciales para entender el rendimiento estructural de los materiales.

El objetivo principal de caracterizar defectos en una Unidad de Línea de Acero (ULA) es desarrollar un sistema eficiente para la detección de anomalías durante la operación de estas por medio de un sensor. Los hallazgos revelan que los defectos más profundos y anchos funcionan como amplificadores de estrés, comprometiendo enormemente la resistencia estructural de la ULA. Las muestras sin defectos alcanzaron tensiones máximas de 2,317 MPa, mientras que las que presentaban defectos severos exhiben valores inferiores a 1,800 MPa. Realizar un análisis detallado de la pérdida de material y evaluar la resistencia estructural de las líneas apoya en la determinación de la aptitud de la unidad para ejecutar maniobras seguras y efectivas en pozos de hidrocarburos.

**Palabras clave:** pozos petroleros, concentrador de esfuerzos, pruebas de tensión, caracterización de daños, ULA, SAF 2205.

### Abstract

Oil well activities are affected with catastrophic failures triggered by the deterioration of slickline in different mechanical, inspection and tracing operations. That is why in this work different types of steel line damage (with depths of 0.5, 1 and 1.5 mm and widths of 1, 4 and 6.5 mm, in addition to circular perforations of 2.5 mm diameter at the same depths) are tested and subjected to controlled tensile loads, with the purpose of characterizing the mechanical responses of these structures under downhole operating conditions. Tensile tests were performed to evaluate the strength and behavior of the steel lines under tensile stress conditions. These tests allow the determination of yield strength, ultimate strength and maximum elongation, which are crucial indicators to understand the structural performance of the materials.

The main objective of characterizing defects in a Steel Line Unit (SLU) is to develop an efficient system for the detection of anomalies during operation by means of a sensor. The findings reveal that deeper and wider defects function as stress amplifiers, greatly compromising the structural strength of the ALU. Samples without defects reached maximum stresses of 2,317 MPa, while those with severe defects exhibit values below 1,800 MPa. Performing a detailed analysis of material loss and evaluating the structural strength of the lines supports the determination of the unit's suitability to perform safe and effective maneuvers in hydrocarbon wells.

**Index terms:** oil wells, stress concentrator, stress tests, damage characterization, ULA, SAF 2205.



## I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera hoy en día utiliza una multiplicidad de procesos y herramientas para gestionar la terminación de pozos, la reparación y la optimización de la vida operativa de los pozos petroleros en diferentes etapas. Estas etapas son muy importantes para maximizar la producción y aumentar el ciclo de vida operativo del pozo, lo que a su vez impacta directamente en la rentabilidad de las operaciones.

Se caracterizan operaciones comunes, como el bombeo, métodos neumáticos y procedimientos de configuración, adaptados a problemas que podrían ocurrir en relación con las operaciones [1]. Las Unidades de Línea de Acero (ULA) se utilizan para llevar a cabo estas operaciones [1]. Estas unidades son una parte esencial para realizar trabajos cuando se necesita alambre de acero especializado, optimizando el rendimiento del pozo y manteniendo la seguridad en las operaciones.

Sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión han sido estudiadas anteriormente. Un ejemplo destacado es el SAF 2205, que es el dúplex más utilizado, presentando un equilibrio perfecto de fases ferríticas y austeníticas que proporciona buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión para un rango amplio de entornos [2], [3], [4], [5].

Sin embargo, solo unos pocos estudios informaron sobre ULA con tales características, operando bajo condiciones extremas utilizadas para simular los procesos de formación de fallas, como fatiga y envejecimiento [2], [3], [4].

El objetivo del presente trabajo es caracterizar la respuesta mecánica de las ULA sometidas a defectos controlados que replican los daños más típicamente reportados en operaciones de pozos petroleros. El objetivo es entender cómo esto afecta la resistencia estructural de las líneas a diferentes geometrías y profundidades de defectos mediante ensayos de tracción y un cambio en la comprensión de la geometría y profundidad del defecto.

Este sistema tiene un contador para medir la longitud del alambre que se desenrolla del carrete, porque si falla, podría costar enormemente al proyecto, así como mucho trabajo potencial y tal vez incluso una gran explosión, lo que justifica mucha atención en validar una longitud adecuada.

El diseño del sistema de carrete que muestra los componentes principales y su disposición funcional se muestra en la Fig. 1 [1].



Fig. 1. Carrete de unidad de línea de acero fuera de servicio.

Además, se deben monitorear los parámetros operativos, como la tensión de la línea y la duración del despliegue, para asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad. La creación de sistemas de monitoreo en tiempo real ha sido posible gracias a los desarrollos en sensores que proporcionan información adicional al proceso y al área que permite ajustes en el ULA (Unidad de levantamiento artificial).

Por lo tanto, el ULA acompañado de tecnología hidráulica y sistemas de medición avanzados es uno de los componentes más importantes que asegura la eficiencia y seguridad de las operaciones petroleras.

En la Fig. 2 podemos observar un diagrama donde nos especifica como son las fuerzas que se aplican en las ULA en operaciones, la flecha azul indica las fuerzas de tensión, el vector rojo es el peso de la herramienta que está en uso en operaciones, el vector verde son fuerzas dinámicas, que esto representa las vibraciones e impacto mecánico típicos en operaciones. Lo cual se destaca el ambiente en el que están como la temperatura de ( $\leq 120^{\circ}\text{C}$ ) y la exposición a la corrosión ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ) el cual afecta significativamente el comportamiento de las ULA.

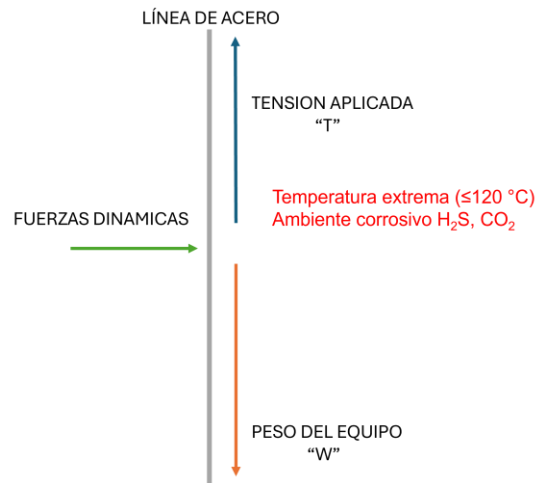


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre de la línea de acero.

Con esto en mente las ULA están alojadas para afrontar las cargas que actúan sobre ellas en los pozos de petróleo. Tales tensiones axiales son creadas por el peso del equipo asociado, el cual puede incluso alcanzar más de 500 kg [1].

Las ULA son cruciales para el negocio de hidrocarburos, llevando a cabo una variedad de operaciones que se pueden agrupar en mecánicas, recolección de información y muestreo PVT (Presión, Volumen y Temperatura) [1]:

- Operaciones mecánicas: Contra los impactos que sus herramientas de percusión, como las cizallas, generan para la activación y recuperación de dispositivos mecánicos, la verificación de las condiciones de las tuberías productivas y la recuperación de fluidos o sólidos.
- Recolección de información: — Registro de temperatura; — Monitoreo de producción; — Calibración de tuberías; — Recolección de muestras PVT (necesarias para el análisis de las condiciones del pozo).
- Muestreo PVT: Comprender el comportamiento de los fluidos en el reservorio y optimizar la producción.

Además, las ULA necesitan propiedades específicas, tales como resistencia a la corrosión y a la flexión, que requieren seleccionar aceros inoxidable apropiados para resistir ambientes hostiles en pozos profundos donde son susceptibles tanto a ataques corrosivos como a esfuerzos mecánicos. Tales aceros son importantes cuando se usan en pozos que incluyen gas y petróleo [1], [5], [6].

Las ULA que se utilizan para Petróleos Mexicanos (PEMEX) están hechas principalmente con aceros SANICRO 28 y DUPLEX SAF 2205. Estos aceros son ampliamente empleados no solo en líneas de acero, sino también en tuberías flexibles. Su resistencia a ambientes con azufre de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) los hace altamente efectivos frente a la corrosión [1], [10].

El **acero inoxidable dúplex SAF 2205** (UNS S31803/S32205) es una aleación ampliamente utilizada debido a su excelente resistencia a la corrosión y altas propiedades mecánicas [3], [7], [8], [9]. Se clasifica como un acero inoxidable dúplex porque tiene una estructura equilibrada de fases ferrítica y austenítica, lo que le confiere una combinación de propiedades de ambos tipos de aceros. A continuación, se muestra en la Tabla 1 la información sobre sus propiedades mecánicas, químicas.

TABLA 1. COMPOSICIONES QUÍMICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE SAF 2205 [7], [3].

Composición química (%)	
Composición química	valores típicos
Cromo	21-23%
Níquel	4.5-6.5%
Molibdeno	2.5-3.5%
Manganeso	máx. 2%
Nitrógeno	0.08-0.2%
Carbono	máx. 0.03%
Silicio	máx. 1%
Azufre	máx. 0.02%
Fósforo	máx. 0.03%
Hierro	balance
Propiedades mecánicas	
resistencia a la tracción	620-850 Mpa
límite elástico	≥ 450 Mpa
alargamiento	25-30%
dureza brinell (hb)	máx. 290 hb
módulo elástico	200 gpa

4

Debido a la naturaleza de las ULA de estar sujetas a fuerzas constantes que tienden a causar que las ULA se fracturen en puntos críticos a lo largo de los esqueletos de estas estructuras, al igual que con la mayoría de los defectos estructurales y los concentradores de esfuerzo como muescas o factores de concentración de esfuerzos conocidos, se determinó que se realizarían pruebas de tensión.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar daños controlados con dimensiones y profundidades específicas, para realizar pruebas de tensión, estas pruebas permiten evaluar el comportamiento mecánico con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de las ULA mediante pruebas de tensión esto para poder detectar los daños cuando la ULA este en operación y así poder detectar, verificar y garantizar si es útil que pueda estar en pozo en operaciones.

## II. METODOLOGÍA

El estudio actual se realizó en muestras de acero inoxidable SAF 2205, que se emplea comúnmente en la producción de ULA debido a la alta resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión que proporciona. A continuación, se presenta el procedimiento organizado en etapas clave del proceso en la Fig. 3.

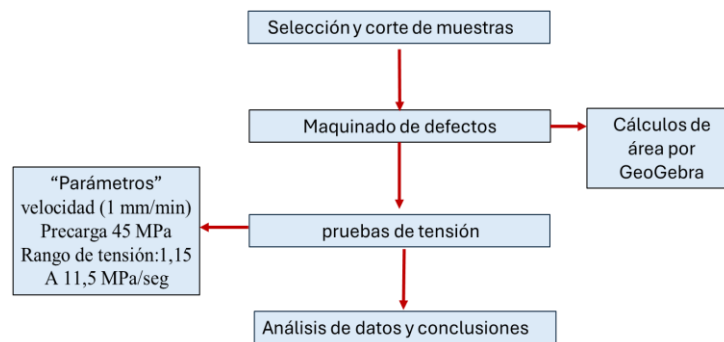


Fig. 3. Diagrama de bloques de metodología.

Para este estudio en este caso se definen las condiciones experimentales utilizadas para proporcionar datos de prueba sobre la efectividad de la Línea de Acero en ULA bajo condiciones representativas de laboratorio y de campo. Por último, las muestras fueron cortadas de un nuevo carrete de línea de acero (sin usar), de modo que las propiedades iniciales del material no se vean alteradas por una vida útil previa o por acciones ambientales.

El defecto no solo hizo que las muestras entalladas variaran en profundidad (0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) y ancho (1 mm, 4 mm, 6,5 mm), sino también con puntos circulares con un diámetro de 2,5 mm, las pruebas de tracción se realizaron usando una máquina universal INSTRON 4482, basada en las recomendaciones de ASTM E8/E8M [10], [11]. Se aplicaron velocidades de desplazamiento según el tipo de texturizado, las dimensiones de la muestra y el propósito; la velocidad utilizada fue de 1 mm/min y con una precarga de 45 MPa con rango de tensión de 1,15 a 11,5 Mpa/s.

Bajo condiciones simuladas, se estudió la resistencia mecánica de la ULA diseñada con variaciones de propiedades, verificadas por área efectiva y funciones geométricas, por configuración, con cuatro pruebas realizadas de cada daño [7], [12].

#### A. Preparación de muestras

Para llevar a cabo este análisis, se tomaron varias muestras del carrete de ULA SAF 2205, cada una con una longitud de 50 cm. A estas muestras se les realizaron dobleces de 4.5 cm en forma de gancho en sus extremos para que las mordazas de la máquina de tensión tengan una mejor sujeción, como se ilustra en la Fig. 4. Este procedimiento nos permitirá evaluar de manera más precisa los efectos del esfuerzo mecánico en el material, así como identificar las características específicas de cada tipo de daño.

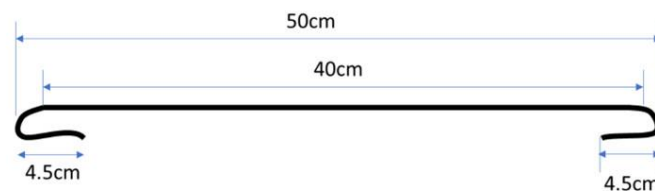


Fig. 4. Muestra de líneas de acero.

Los daños aplicados en ULA SAF 2205 fueron elegidos intencionadamente para permitir una investigación sistemática y permitir la medición precisa de cada tipo de defecto. Dado que los daños reales no permitirían mediciones exactas, estos defectos se simularon para modelar condiciones reales con más control sobre sus características.

Los daños se registraron de manera sistemática y se codificaron con un sistema de colores (véase Fig. 5), para facilitar su identificación y seguimiento en evaluaciones posteriores.

La clasificación incluyó profundidad, anchura y, en casos más serios, la geometría de la línea cambió. Forman la base para evaluar la influencia del desgaste y la fatiga en el material, así como la integridad estructural a largo plazo del material. Cuando sea necesario, se incluye también información relacionada con el período de exposición a condiciones operativas extremas o las tensiones mecánicas experimentadas, para proporcionar una comprensión más completa del desempeño del SAF 2205 en aplicaciones relevantes.

Esta estrategia estructurada no solo mejorará nuestra capacidad para el reconocimiento y clasificación de daños a todos los niveles, sino que también proporcionará ideas importantes para desarrollar un plan estratégico y optimizar el rendimiento del material de la ULA durante la operación en pozos petroleros.

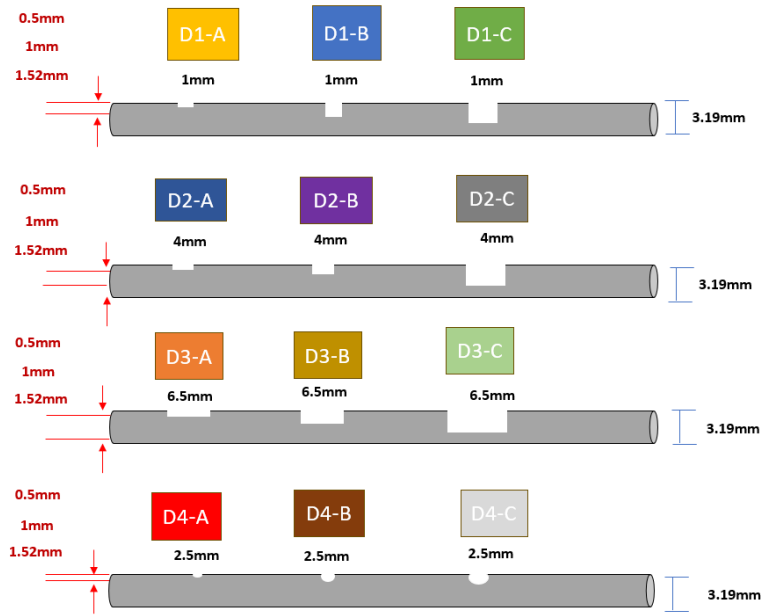


Fig. 5. Daños de muestras de líneas de acero.

Se cortaron ubicaciones concretas (correctamente) utilizando máquinas fresadoras de 3 ejes DIMSA FUX-I20 con cortadores de disco, como se ve en la Fig. 6a, anchuras de 1, 4 y 6.5 mm, así como profundidades que van desde 0.5 a 1 y 1.5 mm. Luego, se propuso centrar las muestras en la cama de la fresadora (véase Fig. 6b), para realizar los cortes con precisión.

La cama de la fresadora permite ajustar la profundidad de cualquier corte, que se puede realizar y mostrar a las profundidades deseadas en la Fig. 6c, permitiendo realizar el defecto en la ULA SAF 2205 puede alcanzar en un entorno real. Con estos cortes sistemáticos, los defectos generados no solo imitan daños reales, sino que también permiten una visión estructural exhaustiva y una evaluación del rendimiento de los materiales bajo ciertos escenarios de carga.



Fig. 6. Preparación de las muestras de ULA. a) Discos de corte y herramientas para realizar pruebas, b) Preparación de muestras, c) Realización de muesca a las muestras, d) Muestras realizadas.

Después de eso, se realizaron daños circulares con el taladro central, como se ve en la Fig. 7. Esto se hizo con un tornillo de banco en el que las piezas estaban correctamente centradas para asegurar que el corte fuera perpendicular.

Esta perforación se realizó a diferentes profundidades para entender el efecto del diámetro y la profundidad de los cortes en la integridad del material.

Estas pruebas y análisis nos ayudarán a proporcionar una comprensión del comportamiento del material, así como a definir estrategias de mantenimiento y mejora para su uso industrial.

7



Fig. 7. Realización de defecto circulares.

Tras la creación de daños, ilustrada en la Fig. 8, se aplicaron 12 tipos de daños a las muestras de ULA, tal como se indica en la Fig. 6.

### B. Cálculo de áreas transversales

La sección transversal de cada una de las muescas se calculó utilizando métodos de cálculo integral en GeoGebra para determinar las áreas con mayor precisión y menor variabilidad, como se observa en la Fig. 8. Hay varios programas resumidos que muestran una representación gráfica y realizan un análisis matemático exacto que permite el cálculo correcto de las áreas a partir de las geometrías derivadas del corte.

Usando GeoGebra como herramienta para el cálculo integral, fue posible determinar el área de las secciones transversales de cada uno de los defectos estudiados. Este proceso permitió establecer la función correspondiente que se describe en la Ecuación 2.

GeoGebra se empleó para visualizar gráficamente el escenario y derivar los cálculos requeridos, asegurando precisión y facilidad de análisis.

Al evitar extremos en la deformación en los extremos, este método representa una representación más robusta y realista de los cálculos de tensión, proporcionando una evaluación más precisa del comportamiento del material bajo condiciones de carga.



∞

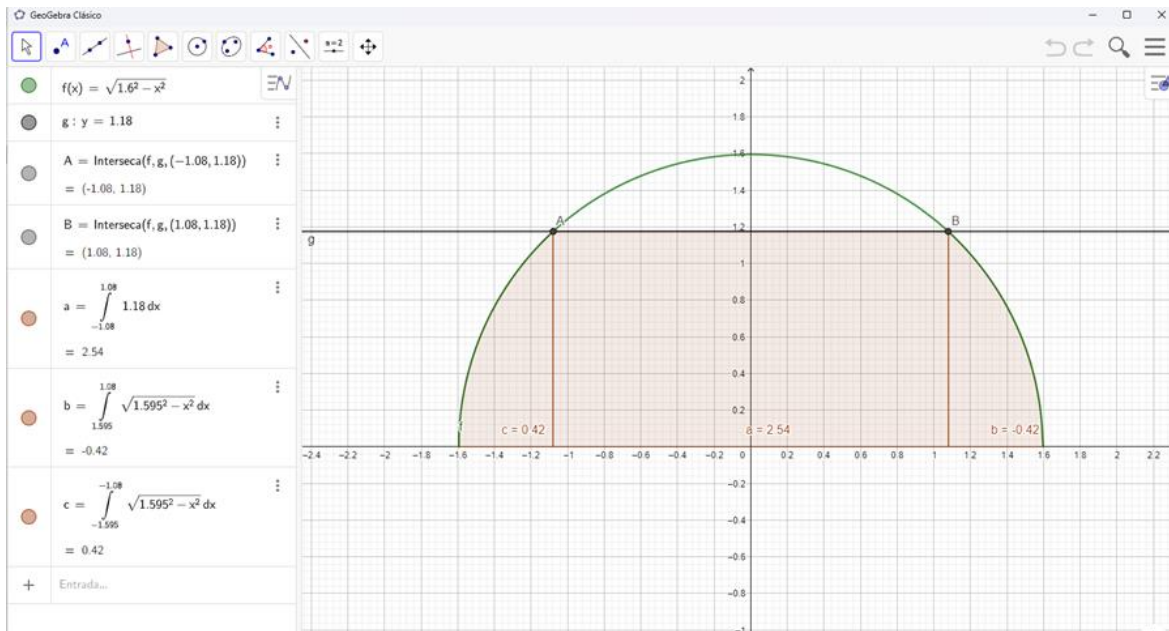


Fig. 8. Cálculo de áreas de muescas.














Iniciando el análisis en la función, tenemos el rango original del ULA SAF 2205, que tiene un diámetro de 3.19 mm, y al calcular, tenemos un radio de 1.59 mm. A partir de esto, establecimos la función gráfica correspondiente, identificada en la ecuación 2.

Paralelamente, tenemos una línea que es la muesca. En este caso, tenemos la definición de 2.36 mm porque está relacionada con las características geométricas del material o las tolerancias permitidas por el proceso. Cabe señalar que: "La profundidad de 2.36 mm puede considerarse como un límite establecido según los parámetros limitantes destinados al material, ya que, con esta, se asegura que la integridad estructural del material no está en riesgo". Esta recta se puede expresar como  $g(x) = 1.8$ . lo que se asume como una simplificación del comportamiento de la profundidad a lo largo de la pieza, permitiendo un cálculo más sencillo basado en aproximaciones empíricas o consideraciones geométricas prácticas.

$$f(x) = \sqrt{1.6^2 - x^2} \quad (1)$$

Posteriormente, se identificó los puntos de intersección entre la recta y la circunferencia, donde se utilizaron estos puntos para calcular la integral de las funciones en el intervalo determinado por dichos puntos de intersección. Este procedimiento permite determinar el área de la sección transversal resultante como se describe en la Tabla 2.

TABLA 2.  
ÁREAS DE LAS DIFERENTES MUESCAS EN ULA.

Defectos	Tipo de defecto	Área (mm <sup>2</sup> )
	S/D	7.99
	D1-A	6.76
	D1-B	5.48
	D1-C	4.38
	D2-A	7
	D2-B	4.66
	D2-C	1.76
	D3-A	6.34
	D3-B	4.06
	D3-C	1.02
	D4-A	7.76
	D4-B	7.64
	D4-C	7.24

9

En lo estipulado en la norma ASTM E8 [10], realizamos una longitud calibrada de 100 mm. A partir de esta longitud, calculamos la deformación unitaria utilizando la ecuación 2 [9]. Posteriormente, se procede a determinar el esfuerzo para cada una de las pruebas realizadas. Finalmente, se promediaron los resultados obtenidos para cada uno de los defectos analizado como se muestra en la Tabla 3.

$$e = \frac{\Delta L}{l} \quad (2)$$

### C. Pruebas de tensión

Las propiedades mecánicas se caracterizaron mediante ensayos de tracción utilizando una máquina de ensayos universal INSTRON 4482 (véase Fig. 9). Se probó cada una de las muestras con los diversos daños realizados.

Se realizaron 4 ensayos para cada tipo de muestra, se considera estas 4 muestras, ya que estos resultados fueron repetitivos, por ende, se decidió tomar en cuenta esos modelos el cual nos proporcionaron datos representativos sobre las cargas máximas alcanzadas durante el ensayo. El enfoque experimental proporciona información sobre la resistencia del SAF 2205 a varios tipos de daños y también, cuando se definen las características de carga, el comportamiento del SAF 2205 bajo condiciones aplicadas.

Estas pruebas proporcionarán datos esenciales para informar sobre la durabilidad a largo plazo de este material en aplicaciones de pozos petroleros, así como para establecer modelos predictivos de su rendimiento a largo plazo [13], [14].



Fig. 9. Ensayo de tensión en máquina universal INSTRON 4482.

La máquina universal INSTRON 4482 está equipada con varios tipos de mordazas, dependiendo del tipo de prueba. Específicamente, se utilizaron mordazas que sujetaban firmemente los hilos de acero de línea durante las pruebas de tensión.

Se seleccionaron intermediarios que evitan el deslizamiento y permiten una distribución uniforme de fuerzas para obtener resultados estables como se observa en la Fig. 10 se muestra el montaje utilizado.



Fig. 10. Preparación de la máquina para pruebas de tensión.

El esfuerzo de tracción se obtuvo a partir de estos datos utilizando la ecuación de esfuerzo de acuerdo con la carga máxima y el área de superficie de las muestras, como se muestra en la ecuación 3 [15]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

La tensión máxima  $\sigma$  es proporcional a una fuerza aplicada  $P$  por el área  $A$  donde se aplica esta carga (1).

Si se pierde anchura durante el proceso de corte del material en muestras, el área de la sección transversal cambia y eso puede afectar mucho a los resultados del esfuerzo de tracción.

Como ejemplo realizamos las primeras muestras con defecto D1-A el cual obtuvimos carga de 18,518 N y tiene un área de 6.76 mm<sup>2</sup>, el cual vamos a realizar el cálculo de esfuerzo con la ecuación 3 de igual forma se realizó el cálculo de las elongaciones con la ecuación 2:

$$\sigma = \frac{12,073 \text{ N}}{6.76 \text{ mm}^2} = 1,785 \text{ MPa} \quad e = \frac{100.52-100}{100} = 0.0052 \text{ mm/mm}$$

#### D. Concentrador de esfuerzos

En este contexto, es relevante mencionar la propiedad de la mecánica de concentración de esfuerzos. Según esta propiedad, en estructuras sometidas a tensión o compresión, los cambios geométricos generan áreas de concentración donde se acumulan los esfuerzos, resultando en una reducción del área efectiva [3], [13], [16], [17], [18], [19]. Por lo tanto, los resultados obtenidos para las muescas más profundas indican una mayor acumulación de carga.

Para analizar con mayor detalle este fenómeno, se emplea la siguiente ecuación, donde  $K$  representa el factor de concentración de esfuerzos se divide el esfuerzo máximo en probeta con daño entre el esfuerzo en la muestra sin daño:

$$K = \frac{\text{Esfuerzo Maximo en la probeta con muesca}}{\text{esfuerzo en la probeta sin muesca}} \quad (4)$$

Este enfoque permite cuantificar cómo las variaciones en la geometría de los defectos afectan la distribución del esfuerzo en el material, brindando una mejor comprensión de su comportamiento estructural bajo cargas [4].

### III. RESULTADOS

La Fig. 11 muestra los defectos realizados sobre el material, como podemos observar las dimensiones ya proporcionadas de 1, 4, 6.5 mm de anchura en el caso de las muescas con profundidades de 0.5, 1.0, 1.52 mm en el caso de los defectos de tipo circular (D4) tienen un diámetro de 2.5 mm con las mismas profundidades que las otras muestras, el cual tenemos por cuatuplicado cada una de los defectos.

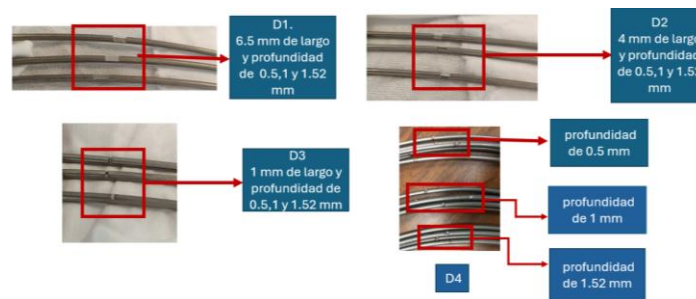


Fig. 11. Defectos realizados.

En la siguiente tabla se muestra las cargas aplicadas de cada uno de los defectos promediado de cada una de las muestras de los diferentes defectos realizados.

TABLA 3.  
CARGAS DE CADA MUESTRA DE LAS PRUEBAS REALIZADAS.

Muestra	Cargas
S/D	18,518.50
D1-A	12,073.29
D1-B	10,488.06
D1-C	9,313.98
D2-A	12,501.93
D2-B	10,507.08
D2-C	7,051.17
D3-A	11,661.28
D3-B	9,669.70
D3-C	6,770.84
D4-A	12,558.86
D4-B	11,175.86
D4-C	9,635.28

#### A. Ensayos de tensión

Las siguientes tres gráficas presentadas muestran el comportamiento esfuerzo-deformación de diferentes muestras (D1, D2, D3, D4) en distintas condiciones (A, B y C).

1. **Gráfico A:** Las tensiones máximas para las muestras estuvieron entre 1500 MPa y 1800 MPa. Todas muestran un comportamiento dúctil: la tensión aumenta con el aumento de la deformación hasta valores de deformación superiores a 0.25 mm/mm hasta la fractura. (Cuando los materiales están en esta condición, puede influir significativamente en la noción de deformación y en su mayoría sobreviven al efecto de un uso indebido/proceso hasta cierto punto).
2. **Gráfico B:** Por el contrario, en este caso, la tensión máxima disminuye aproximadamente de 1000 MPa a 1200 MPa. Las muestras aquí presentan un comportamiento más frágil, lo cual se puede observar a través de las pronunciadas pendientes de la curva y una fractura repentina a niveles de deformación más bajos (es notable que tiende a romperse como máximo con ~0.16 mm/mm). Todavía corresponde a una ruptura muy repentina y esta tensión alcanza su límite mucho más rápidamente que en la serie A, lo que sugiere una menor capacidad de deformación.
3. **Gráfico C:** Este gráfico muestra nuestras tensiones más altas, donde la muestra D3-C alcanza un valor máximo de 4500 MPa y las otras muestras entre 1000 MPa y 3000 MPa. Sin embargo, estas altas tensiones (considerablemente más de lo que se esperaría en condiciones in vivo) son comprensiblemente demasiado para muchas de las curvas, que muestran rupturas bruscas a deformaciones relativamente bajas (más de 0.14 mm/mm parecería ser el límite del tejido blando). Para los especímenes en la serie C, hay muy poca deformación plástica y en ciertos casos, como el espécimen D3-C, el espécimen falla de una manera casi explosiva después de alcanzar su tensión máxima.

Estas tres series revelan una clara evolución del comportamiento; las muestras de la serie A son más dúctiles, sufren mayores deformaciones, mientras que las de las series B y C tienen un comportamiento más frágil, con fracturas más bruscas y menos deformación antes de la rotura de la pieza.

Los resultados del perfilado de las muestras indican que hay diferencias en el rendimiento mecánico en función de la carga.

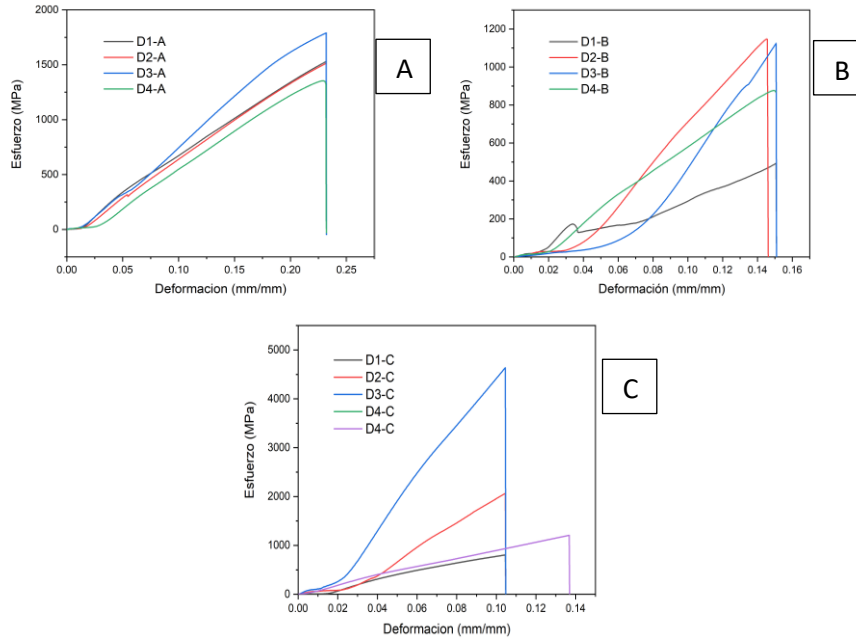















Fig. 12. Gráficas Deformación-Esfuerzo A). Defectos tipo A, B). Defectos tipo B, C). Defecto tipo C.

Luego, se llevaron a cabo pruebas de tensión en las muestras con una máquina INSTRON 4482 (véase Fig. 9), que permitiría evaluar el comportamiento del material bajo tensión y la recuperación de las propiedades mecánicas del material.

TABLA 4. TABLA DE ESFUERZO, DESPLAZAMIENTOS Y ELONGACIONES.

Defectos	Tipo de defecto	Esfuerzo MPa	Desplazamiento mm	Elongación (e) mm/mm
	S/D	2,317.71	100.2	0.002
	D1-A	1,785.99	100.52	0.005
	D1-B	1,913.88	100.19	0.0019
	D1-C	2,126.48	100.19	0.0019
	D2-A	1,785.99	100.2	0.002
	D2-B	2,254.74	100.25	0.0025
	D2-C	4,006.35	100.4	0.004
	D3-A	1,839.32	100.14	0.001
	D3-B	2,381.70	100.6	0.006
	D3-C	6,638.08	100.3	0.003
	D4-A	1,618.41	10.33	0.013
	D4-B	1,462.81	101.33	0.013
	D4-C	1,330.84	100.2	0.002



B. Resultados de concentrador de esfuerzos

Este cálculo se llevó a cabo para cada una de las muescas, lo que permite observar el factor de concentración de esfuerzos específico para cada defecto, como se presenta en la Tabla 5. En esta tabla, se parte de un valor de este factor de 1 para condiciones sin defectos. Sin embargo, se puede apreciar que, en las muescas con mayor profundidad, tales como los defectos, D2-C y D3-C, los valores del concentrador de esfuerzos son significativamente superiores a 1. Esto indica que la presencia de defectos profundos en la geometría de las muescas provoca una acumulación considerable de esfuerzos en esas regiones, reflejando un comportamiento mecánico que debe ser considerado en el análisis estructural. Los altos valores de *K* en estas muescas subrayan que la fragilidad del material cuando tiene una pérdida significativa de esta [3].

TABLA 5. CONCENTRADOR DE ESFUERZOS.

Tipo de defecto	Concentrador de esfuerzos
S/D	1.00
D1-A	0.77
D1-B	0.82
D1-C	0.91
D2-A	0.76
D2-B	0.97
D2-C	1.72
D3-A	0.79
D3-B	1.02
D3-C	2.86
D4-A	0.69
D4-B	0.63
D4-C	0.57

En la Fig. 3 se observa en la grafica un aumento progresivo en la severidad de cada defecto con mayor profundidad. Por ejemplo, la línea negra representa los tres primeros defectos, todos con una anchura de muesca de 1 mm, cuyas profundidades son de 0.5mm, 1mm y 1.5 mm. En relación con las diferentes anchuras de 4 mm, 6.5 m y 2.5 mm, se evidencia que los defectos D1-C, D2-C Y D3-C presentan un incremento significativo en los concentradores de esfuerzos ya que estas muestras cuenta con daños mayores.

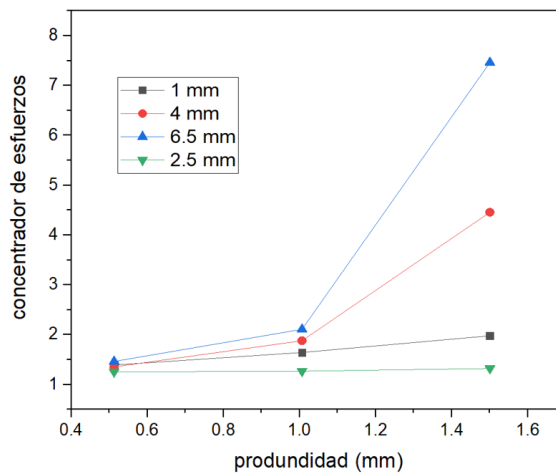


Fig. 13. Concentrador de esfuerzos.

### C. Análisis de pérdida de material

Para realizar una correcta caracterización de estos defectos, el área de la línea de acero debe ser continua y no tener pérdida del material de la propia línea de acero. Además, se analizaron detalladamente el material y las áreas dañadas para definir una comparación precisa de resistencia. Esto permite evaluar el impacto de los cambios en el área y la integridad estructural del acero sobre su comportamiento mecánico y capacidad de carga.

La clasificación de las muestras y los daños asociados se puede ver en la esquina superior de cada gráfico (3, 4, 5, 6, 7). Esta clasificación se proporciona con una nomenclatura particular para que la identificación de cada muestra y su relación con los datos de los gráficos sea más sencilla. Ayuda a los espectadores a analizar e interpretar la información de manera más efectiva y a extraer patrones o tendencias relacionadas con los daños.

En la Fig. 14 presenta barras del esfuerzo necesario para fracturar cada una de las muestras. Para las dos muestras analizadas, hay una proporcionalidad inversa entre el área de material perdido y el esfuerzo de ingeniería necesario para romperlas. Los estudios metalográficos para corroborar este hecho muestran que dentro de las muestras de solidificación por láser selectivo (SLM) no hay macrodefectos o porosidad observable. Esto, en particular en las muestras SLM sin defectos, muestra el mayor esfuerzo y el mecanismo de integridad del material, lo cual es clave para mantener el factor de resistencia mecánica. Por el contrario, las muestras con suficientes defectos (D2, D3 y D4) son mucho más fáciles de fracturar debido a la pérdida de material (véase Fig. 4).

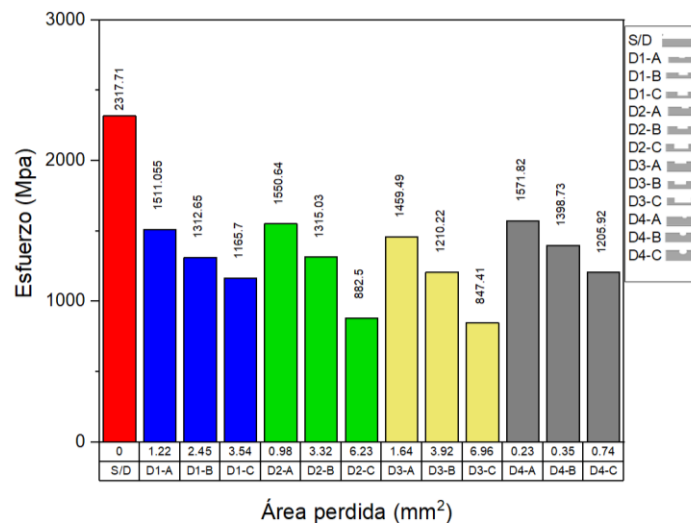


Fig. 14. Esfuerzo con área total / área perdida.

Los esfuerzos reales, calculados al tener en cuenta la presencia de defectos en el material, tienden a ser significativamente más altos que los esfuerzos ingenieriles convencionales. Esto se debe a que los esfuerzos ingenieriles no consideran la reducción en el área efectiva provocada por los defectos, lo que puede llevar a una subestimación del esfuerzo necesario para la fractura (véase Fig. 15)

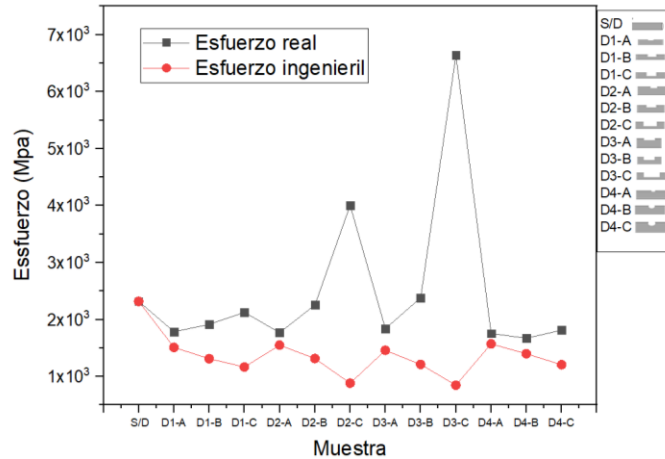


Fig. 15. Comparativa de esfuerzo ingenieril y esfuerzo real.

Los tipos de defectos (1, 2.5, 4, 6,5 mm) en las muestras observadas (véase Fig. 16) afectarán significativamente la resistencia a la tracción de estas, la resistencia de Muestras Sin Defectos (S/D) con una Fuerza Promedio de 2,31771 MPa en S/D, y Disminución de Resistencia con el Aumento del Tamaño del Defecto.

La muestra D1-A presenta un defecto de 1 mm y en la D4-A se observa un defecto de 2,5 mm en el centro del espacio, para los defectos de 4 mm (como en las muestras D1-B y D4-B), la resistencia cae hasta 1816,37 MPa a 884,41 MPa, perdiendo aún más resistencia.

Por último, los defectos máximos de 6,5 mm en las muestras D1-C, D2-C, D3-C y D4-C muestran capacidades de fuerza mínimas entre 1635,84 MPa y 882,45 MPa, y se puede decir que cuanto mayor es el defecto, menor es la resistencia a la tracción, haciendo la muestra susceptible a fracturas bajo cargas de publicidad.

Estamos particularmente interesados en correlacionar nuestros resultados con aquellos extraídos de la pérdida de valor conocida debido a pérdida de material, lo que en nuestro escenario experimental permite una definición precisa de los parámetros involucrados, donde el desgaste también se mide en el experimento con defectos más finos observados en el experimento.

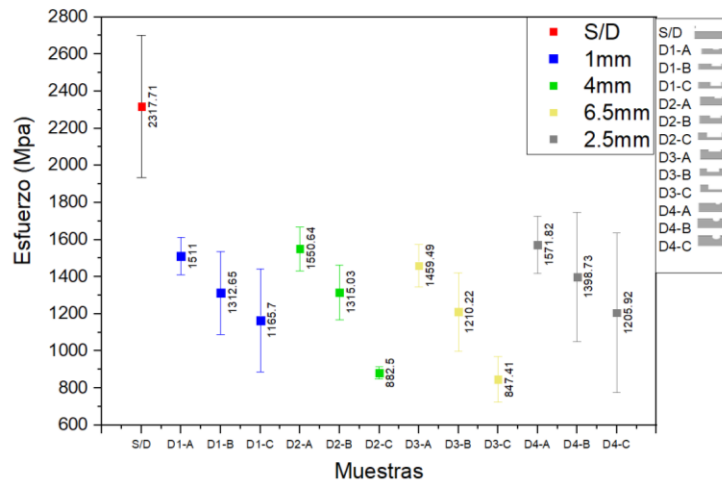


Fig. 16. Desviación estándar.

#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el tipo y la severidad de los defectos tienen un gran impacto en la resistencia mecánica de las Unidades de Línea de Acero (ULA). Se encontró que el esfuerzo máximo de las muestras sin defectos era de 2,317.71 MPa, mientras que las muestras con defectos de tipo A, B y C carecían de una resistencia progresiva correspondiente de acuerdo con el grado de daño, para las muestras de tipo A, la resistencia retenida varió, oscilando entre 1,785.99 y 2,126.48 MPa, indicando un comportamiento dúctil que permitió una mayor deformación antes de la falla, por el contrario, el tipo B alcanzó 1,462.81 y 2,254.74 MPa con menos deformabilidad y un comportamiento más frágil. Aunque las muestras de tipo C revelaron valores incluso en proporciones más estrictas, como en el caso D3-C, donde D3-C tuvo valores de resistencia que varían de 1,330.84 a 6,638.08 MPa, estos especímenes presentan rupturas repentinas y comportamiento frágil en presencia de condiciones de carga.

Los resultados indican una relación inversa entre el área y el volumen del material perdido y el esfuerzo de ingeniería necesario para lograr la fractura. Muestras con defectos más grandes, como D2-C o D3-C, requirieron menos esfuerzo de ingeniería para fracturarse, ya que la pérdida de material en la sección transversal causa una reducción en la capacidad estructural.

Este fenómeno se evidencia por el aumento de concentraciones de esfuerzo de hasta 7.83 veces en comparación con los valores en muestras sin defectos, porque el área efectiva se reduce en esos defectos y, por lo tanto, actúa como un concentrador de tensión, aumentando el potencial de fractura bajo condiciones operativas.

La magnitud de esta acumulación de tensión es particularmente importante en las estructuras de pozos de petróleo debido a la variabilidad de las cargas y las condiciones extremas a las que se exponen los ULA.

En defectos profundos, incluidos los especímenes de tipo C, es interesante observar que los valores de tensión verdadera son mucho mayores que los valores de tensión de ingeniería.

Esto significa que la carga sentida por las porciones defectuosas se subestima en los cálculos de ingeniería cuando el daño no se ve como parte de la estructura, y, potencialmente, se genera una falsa sensación de seguridad estructural en el uso real.

Esto enfatiza la importancia de considerar también que la tensión de ingeniería debe ser calculada de acuerdo con el área efectiva de la sección dañada, lo que conduce a evaluaciones más precisas de la resistencia utilizando las condiciones operativas.

Una limitación importante de este estudio es que las pruebas se realizaron en un entorno de laboratorio, a diferencia de las variables de energía cinética y ambientales adicionales del entorno de un pozo petrolero, incluidas las variaciones de presión y temperatura.

Debido al alcance sugerido no se realizaron pruebas de fatiga por razones de tiempo y; por lo tanto, no se estudió el comportamiento del ULA bajo carga cíclica durante períodos de tiempo significativos, lo cual es una parte esencial de su rendimiento operativo.

Trabajos futuros, incluidas las pruebas de fatiga, permitirán cuantificar los efectos acumulativos de cargas repetidas sobre la integridad estructural de las líneas, así como estudiar su respuesta en condiciones más cercanas al entorno real.

#### V. CONCLUSIONES

El impacto de los defectos en la cantidad de tensión de tracción que las líneas de acero podían soportar, lo que reduce la resistencia de la estructura en función del tamaño y forma del defecto, fue significativo.

Los defectos hicieron que las muestras funcionaran peor: la tensión máxima en muestras sin defectos fue de hasta 2,317.71 MPa, mientras que con diferentes defectos los valores disminuyeron a entre 1,330.84 y 663.808 MPa, dependiendo del defecto.

Así, defectos como el D3-C, que son más grandes y profundos, pueden concentrar tensiones hasta 7.83 veces más que en condiciones sin defectos.

Las porciones de esfuerzo muestran que, debido a la presencia de defectos con mayor anchura y profundidad, se produce una mayor acumulación de tensión en las zonas dañadas, lo que lleva a una menor vida útil de las ULA expuestas a condiciones operativas. Además, los valores de tensión reales en especímenes con defectos considerables superan las tensiones de ingeniería convencionales, lo que indica que los cálculos de tensión deben corregirse en función de la magnitud de la pérdida de material para lograr una estimación realista de la seguridad estructural.

Este estudio subraya la importancia de una caracterización precisa de los defectos y de implementar sistemas de monitoreo en tiempo real en las ULA para anticipar posibles fallas. La detección oportuna de defectos y el ajuste de cálculos de esfuerzo en base al área efectiva permitirían optimizar la integridad de las operaciones y mejorar la seguridad en la industria petrolera.

## REFERENCIAS

- [1] PEMEX, *Manual de línea de acero*, 2011, available: [https://www.academia.edu/36153661/Manual\\_Linea\\_de\\_Acero\\_Pemex\\_bueno](https://www.academia.edu/36153661/Manual_Linea_de_Acero_Pemex_bueno)
- [2] A. Albitzer Hernández, *Reporte final del proyecto N.62004. Diseño y construcción de un equipo para inspección mecánica integral de la línea de acero y tubería flexible para la prevención de fallas por ruptura*, Jefe de Proyecto.
- [3] R. G. Budynas, J. Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9a ed., México: McGrawHill, 2012.
- [4] A. Yaseen Aljubory, A. Yaseen Burjes, A. Ayuob Sulaiman, H. Yahya Najm, "Stress Study by the Finite Element Analysis of a Plate with a Central Hole," *Journal of Global Scientific Research*, vol. 7, no. 8, pp. 2022-2542, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7023016>
- [5] C. R. de Lima Lessa *et al.*, "Microstructure, mechanical properties, and pitting corrosion resistance of SAF 2205 duplex stainless steel after friction hydro-pillar processing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 3-4, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08899-6>
- [6] "Acero Inoxidable Duplex 2205 | SAF 2205 | UNS S31803 - Mega Mex." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://megamex.com/es/acero-inoxidable-duplex-2205/>
- [7] "Acero Inoxidable Duplex 2205 | SAF 2205 | UNS S31803 - Mega Mex." Accessed: Oct. 07, 2023. [Online]. Available: <https://megamex.com/es/acero-inoxidable-duplex-2205/>
- [8] "Alleima — Home." Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.alleima.com/en/>
- [9] X. Cao, X. Hu, "The investigation of micro-galvanic corrosion of SAF 2205 duplex stainless steel based on numerical simulation model and immersion test," *Corros Sci*, vol. 207, oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110601>
- [10] ASTM International. "Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications," ASTM A240/A240M-11, West Conshohocken, PA, USA, 2011, doi: [https://doi.org/10.1520/A0240\\_A0240M-11](https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-11)
- [11] "ASTM E8 Ensayo de tracción de materiales metálicos | Instron." Accessed: oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/the-definitive-guide-to-astm-e8-e8mb>
- [12] E. Rodríguez, A. Rivas, M. Suárez, W. González, "Caracterización de un acero inoxidable dúplex SAF 2205 tratado térmicamente a 475°C utilizando técnicas ultrasónicas y electroquímicas," 2021.
- [13] S. H. Xu, G. C. Qin, Z. X. Zhang, "Experimental Research on Hysteretic Characteristics of Steel Plates Artificially Corroded by Neutral Salt Spray," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: <https://doi.org/10.1155/2016/7645763>
- [14] J. L. Herrera Bernal, *Análisis de las diferencias entre la tensión de un acero astm 572 habitual y sometido a los tratamientos térmicos de criogenia temple y revenido a altas temperaturas*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019, available: <http://hdl.handle.net/11349/16017>
- [15] W. D. Callister, D. G. Rethwisch, *Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 6a ed., México: Limusa, 2011.
- [16] E. Nadal, J. J. Ródenas, E. M. Sánchez-Orgaz, S. López-Real, J. Martí-Pellicera, "Sobre la utilización de códigos de elementos finitos basados en mallados cartesianos en optimización estructural," *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, no. 3, pp. 155-165, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.009>
- [17] J. J. Rodríguez Castro, "Simulación en Ansys APDL de una placa a tensión con cinco tipos de mallado," 2021, available: [https://www.researchgate.net/publication/355186434\\_Simulacion\\_en\\_Ansys\\_APDL\\_de\\_una\\_placa\\_a\\_tension\\_con\\_cinco\\_tipos\\_de\\_mallado](https://www.researchgate.net/publication/355186434_Simulacion_en_Ansys_APDL_de_una_placa_a_tension_con_cinco_tipos_de_mallado)
- [18] J. Kisija, J. Kacmarcik, A. Karac, "Determination of Stress Concentration Factors Via Numerical Methods: Bar of Circular Cross Section with U-Shaped Groove Subjected to Tension and Bending," 13<sup>th</sup> International

Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Hammamet, Tunisia, 16-21 Oct. 2009. Available:

[https://www.academia.edu/35287146/DETERMINATION\\_OF\\_STRESS\\_CONCENTRATION\\_FACTORS\\_VIA\\_NUMERICAL\\_METHODS\\_BAR\\_OF\\_CIRCULAR\\_CROSS\\_SECTION\\_WITH\\_U\\_SHAPED\\_GROOVE\\_SUBJECTED\\_TO\\_TENSION\\_AND\\_BENDING](https://www.academia.edu/35287146/DETERMINATION_OF_STRESS_CONCENTRATION_FACTORS_VIA_NUMERICAL_METHODS_BAR_OF_CIRCULAR_CROSS_SECTION_WITH_U_SHAPED_GROOVE_SUBJECTED_TO_TENSION_AND_BENDING)

- [19] J. J. Rodríguez Jurado, “Análisis de concentradores de esfuerzos con diferentes geometrías y materiales en pruebas de tensión, Tesis Licenciatura,” Universidad de los Andes, Depto. de Ingeniería Mecánica, 2004. Available: <http://hdl.handle.net/1992/21738>



## Low-cost device for continuous monitoring of human organs during transportation

Dispositivo de bajo costo para el monitoreo continuo de órganos humanos durante el transporte

Daniel Armando **Aguirre Ibarra**<sup>1</sup>, Edgar Roberto **Pérez Serrano**<sup>2</sup>, Leonardo **Alfaro Díaz**<sup>3</sup>,  
Isaac Valentín **Aguirre Manríquez**<sup>4</sup>

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Irapuato, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5834-5536 | daniel.ai@irapuato.tecnm.mx

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0007-8600-3745 | edgar.ps@irapuato.tecnm.mx

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0006-0011-8246 | lis20110295@irapuato.tecnm.mx

<sup>4</sup> ORCID: 0009-0000-2349-4195 | lis20110052@irapuato.tecnm.mx

Recibido 20/08/2024, aceptado 20/11/2024.

### Resumen

La investigación que se presenta es sobre el desarrollo de un prototipo para el transporte de órganos, el cual permita tener un seguimiento de la ubicación y la temperatura en tiempo real. Se hace una comparación con los prototipos y productos comerciales disponibles, teniendo como desventaja el alto costo de tales prototipos. Para realizar el dispositivo se tomó en cuenta la metodología TRIZ, que, según la literatura científica, tiene un alto valor para ahorrar tiempo en la construcción de prototipos. Se presentan los resultados la prueba del equipo con sus respectivas réplicas, por último, se añaden las recomendaciones para continuar con a la escalabilidad del prototipo.

**Palabras clave:** Monitoreo en tiempo real, TRIZ, transporte de órganos

### Abstract

This research presents the development of a prototype for organ transport that enables real-time tracking of location and temperature. A comparison with existing prototypes and commercial products highlights the disadvantage of high costs associated with current solutions. The TRIZ methodology was employed to streamline prototype development, recognized in the scientific literature for its efficiency in accelerating prototyping processes. Results from equipment testing and their respective replicas are presented, along with recommendations for scaling the prototype further.

**Index terms:** Real-time tracking, TRIZ, organ transport.

## I. INTRODUCTION

The process of organ transplantation increased significantly in the 1960s. Since then, the predominant method for transporting organs has been the use of a portable cooler, which, as noted in [1], is no more sophisticated or elaborate than the model commonly used for outdoor recreational activities. Even in Mexico, coolers made of expanded polystyrene are used, as illustrated in Fig. 1. Since that time, the number of transplants has steadily increased, reaching the point where demand exceeds supply. In this context, the importance of strictly adhering to the transplantation protocol, which includes the transportation of organs, is crucial. The process can be viewed from a logistics perspective, as it is a complex supply chain consisting of the following stages, as recorded by [2]:

1. Information management.
2. Planning and programming.
3. Displacement of medical teams for organ harvesting.
4. Packaging.
5. Transportation.
6. Transplant.



Fig. 1. Organ transport cooler.

In the specific case of Mexico, the transportation stage presents a challenge as there is no unified transportation system among certified transplantation hospitals. The country has a national registry of patients awaiting transplants, but each federal entity has its own organ transplant coordination team, whose main function is to notify when an organ and/or tissue is available. At that moment, a recipient is identified, and both the provider hospital and the recipient hospital agree on the mode of transportation. This information was identified through visits and interviews conducted at the State Transplant Center of Guanajuato (CETRA) [3].

Three primary concerns were identified:

1. The organ undergoes multimodal transportation in most cases (frequency not quantified, but inferred from experience), prolonging the time in transit and thereby increasing the risk of ischemia, translating to reduced functionality and durability of the organ [4], [5].
2. Due to the shifts in modes of transportation, real-time tracking of the organ's location is unavailable.
3. The third issue combines the previous two: the receiving hospital lacks real-time knowledge of the organ's status regarding temperature, humidity, and oxygenation. The only means to obtain this information is through the attending physician responsible for the cooler containing the organ, who must open the cooler and use a digital thermometer to record the temperature. However, this action compromises the cold chain [6].

The matter of mitigating the risk of ischemia during organ transplantation holds significance within the scientific community, with studies and case reports documented in the literature. On one hand, research

endeavors concentrate on the utilization of clinical methodologies [7], [8], [9], which, although yielding favorable results, represent experimental techniques, even encompassing non-human organ models. The other research topic focuses on the development of technological devices that are useful during organ transportation. These devices yield positive outcomes, yet they still present a disadvantage for technology transfer to hospitals in Mexico (see Table 1).

TABLE 1  
TECHNOLOGICAL DEVICES USEFUL FOR ORGAN TRANSPORTATION

Device	Disadvantage	Source
Heart-in-a-Box: battery power chamber with wireless technology that maintains the organ in functioning state, perfusing it with warm, nutrient and oxygen blood.	This device was approved by the FDA and nowadays it's only available in 20 hospitals in U.S. Furthermore, it is an expensive device with a cost over \$40000 (US dollars).	[1], [10], [11]
OrganPocket: organ protector device that is made of proprietary elastomeric gel with insulating properties superior to silicone rubber. This highly elastic gel has been engineered to stretch to >1000% elongation, allowing the material to conform to the shape of transplanted organs.	It has not been tested with human organs. Researchers used an ex vivo porcine kidney, heart and pancreas models.	[12]
Paragonix: ice-free storage and transport unit that provides a controlled environment for the organ throughout the entire process, from donor extraction to recipient implantation.	It is not possible to know location of the organ in real-time. It is required a different device for each organ: lung, liver and heart.	[13]
MoTEC: mobile thermoelectric device with a two-compartment system with an outer recirculating water cooling unit.	This device requires an external car battery, making it heavy and difficult to handle.	[14]

Based on the understanding of the context in Mexico, the purpose of the research is to develop a low-cost portable device that is useful for remotely monitoring the conditions of the organ and/or tissue being transported for an organ transplant.

## II. METHODOLOGY

For the prototyping process, the TRIZ method (Theory of Inventive Problem Solving) and its 39 engineering contradiction parameters were selected. This choice was predicated on the TRIZ method's recognition as one of the most potent tools for systematic innovation [15], noted for its capacity to mitigate design conflicts by means of contradiction resolution [16].

To implement the TRIZ method, the following steps were taken:

1. Problem definition.
2. Contradiction analysis.
3. Application of the TRIZ principles.
4. Idea generation.
5. Solution selection.
6. Prototype development and validation.
7. Implementation and continuous evaluation.

Table 2 shows a segment of the actions taken when evaluating the principles.

TABLE 2  
TRIZ PRINCIPLES (SEGMENT)

Principle	Action
Segmentation	Divide the cooler into compartments for the organ and monitoring equipment.
Dynamicity	Implement sensors and communication devices with adjustable settings to adapt to changing conditions during transportation.
Preliminary action	Activate the monitoring system automatically upon organ insertion.
Local quality	Ensure precise temperature and humidity control within the organ compartment.
Feedback	Incorporate feedback mechanisms to adjust cooling and monitoring parameters based on real-time data.
Transition to a new dimension	Utilize miniaturized sensors and communication modules to minimize space requirements.
Equipotentiality	Ensure consistent performance across different transportation environments by optimizing cooling and communication systems.

4

Fig. 2 shows the connection diagram, which was created in Fritzing, and displays the connections between the elements (Arduino board, adapters and modules).

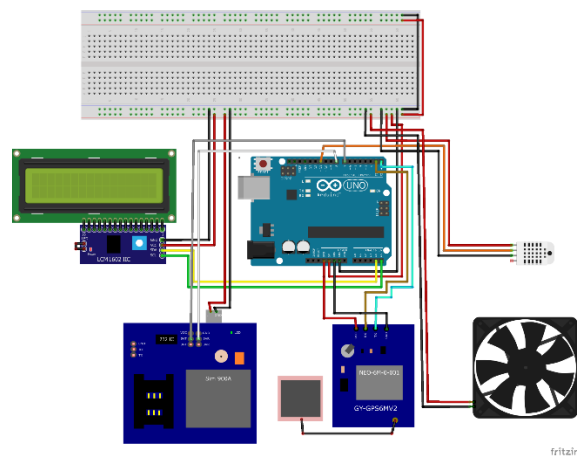


Fig. 2. Connection diagram.

The device was installed in a 28QT plastic cooler. The installation of the device is shown in Fig. 3.

The prototype utilized a conventional plastic cooler instead of one made from polystyrene. This choice offers certain advantages in terms of durability, as plastic coolers generally withstand mechanical stresses better than polystyrene, which is prone to cracking under impact. Additionally, plastic is less permeable than polystyrene, reducing the likelihood of moisture infiltration and potential contamination, which is critical for organ transport. While polystyrene provides effective thermal insulation, the more robust structural integrity of plastic can enhance the reliability of maintaining the necessary internal environment, particularly when the cooler may be subject to movement or external forces.

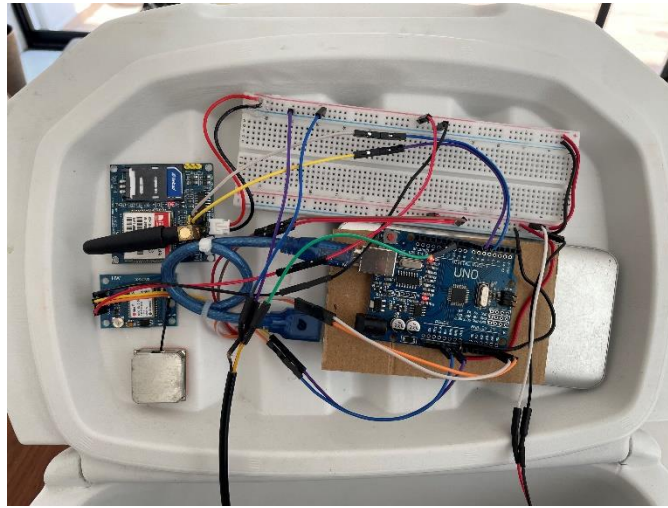


Fig. 3. Device installed in cooler.

The prototyping process, guided by the TRIZ method, effectively addressed and resolved design conflicts, ensuring the development of a robust and innovative solution. After defining the problem and analyzing contradictions, the application of TRIZ principles facilitated the generation of creative ideas that were systematically evaluated.

The solution selection process involved rigorous assessment and comparison of potential solutions to identify the most feasible and effective option. This step was crucial in ensuring that the chosen design not only met the project requirements but also leveraged the innovative potential of TRIZ principles.

Prototype development and validation followed, where the selected solution was transformed into a tangible prototype. The prototype was rigorously tested to validate its performance, ensuring that it met the desired specifications and resolved the identified contradictions. This iterative process of development and validation was critical to refining the design and ensuring its effectiveness.

### III. RESULTS

The prototype in the cooler was tested 10 times over 4-hour intervals. A control cooler was used, which did not contain sensors or the fan. Fig. 4 shows the average temperature comparison. Both coolers were filled with a cold gel pack. The organs selected for testing were pig hearts. It is important to clarify that the organs were donated by local butcher shops, so no live animals were harmed solely for the purpose of this project's research.

An analysis of variance was conducted between the two samples, and statistical evidence was found to reject the null hypothesis. Therefore, there is a significant difference between the two samples, indicating that the cooler with the device is effective in maintaining a stable temperature and humidity, at least over 4 hours (Fig 4 and Fig. 5).

In Fig. 6, the screen displays the execution of sending coordinates to a mobile device to track in real time the organ being transported, along with its temperature record.

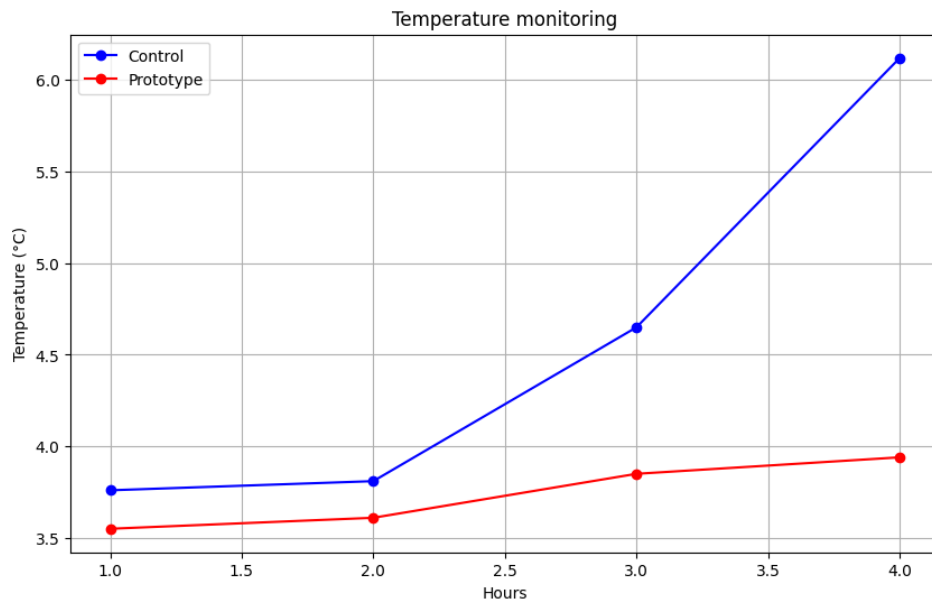


Fig. 4. Temperature monitoring.

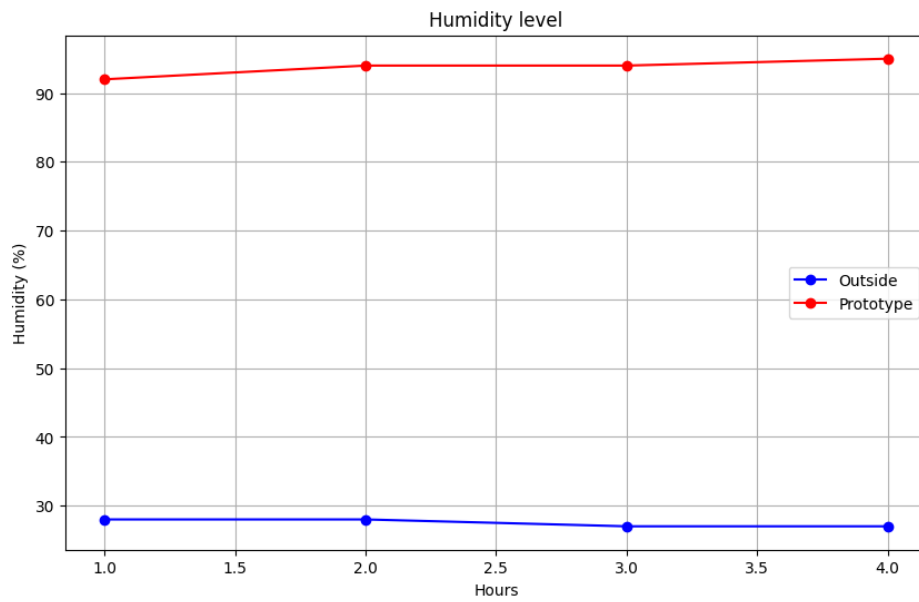


Fig. 5. Humidity monitoring.





Fig. 6. GPS display.

During prototype testing, the SMS messages programmed for automatic sending every 15 minutes were successfully received.

#### IV. CONCLUSIONS

The prototype meets the established objectives, providing a cooler with an integrated device that did not exceed 2000 Mexican pesos in total cost. Notably, the cooler, not being made of styrofoam, represented 53% of the total cost. Even considering labor costs, the total expenditure remains well below those indicated in Table 1.

The initial design proposed dividing the cooler into distinct compartments for the organ and monitoring equipment. However, due to cost considerations, this configuration was ultimately not implemented. Currently, sensors do not maintain either direct or indirect contact with the organ being transported. From a technical perspective, the lack of separate compartments could theoretically influence sensor accuracy due to potential signal interference from temperature fluctuations or condensation within the cooler. Nevertheless, if sensors are effectively isolated from the transported organ's immediate environment, any impact on sensor performance should be minimal, assuming adequate calibration and placement protocols. Nevertheless, there are still elements to consider for further prototype enhancement, necessitating future testing. The following elements are listed for evaluation:

1. Assessing the device with different insulating materials in the cooler.
2. Evaluating the device with styrofoam coolers to compare performance and assembly costs, particularly regarding insulation, durability, and cost-effectiveness for reliable organ transport.
3. Testing the device in areas with low cellular network connectivity.
4. Implementing a communication mode without data, specifically compliant with air travel regulations, thus requiring Wi-Fi communication.

To measure oxygenation of an organ within a cooler, non-invasive optical sensors need to be adapted. This is the next step in this project. These sensors rely on spectrophotometry, emitting specific wavelengths of light and analyzing how the organ tissue absorbs or reflects it to assess oxygen saturation levels. It is also recommended to conduct a failure analysis, for which a What-if process must be carried out and documented with the FMEA tool, detailing occurrence, severity, and detection.

## REFERENCES

- [1] D. Pickel. “Hearth-in-a-Box Device Revolutionizes Organ Transport” Duke University School of Medicine. <https://medschool.duke.edu/news/heart-box-device-revolutionizes-organ-transport> (accessed Feb. 15, 2024).
- [2] H. B. Bellotti, M. T. Francoso, “System for transporting human organs”, *Case Studies on Transport Policy*, vol. 9, no. 2, pp. 431-442, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.01.005>
- [3] R. López-Falcony, “Entrevista con Rodrigo López Falcony”, personal communication, (Mar. 2023)
- [4] N. Datta, S. G. Devaney, R. W. Busuttill, K. Azari, J. W. Kupiec-Weglinski, “Prolonged Cold Ischemia Time Results in Local and Remote Organ Dysfunction in a Murine Model of Vascularized Composite Transplantation”, *American Journal of Transplantation*, vol. 17, no. 10, pp. 2572-2579, Oct. 2017, <https://doi.org/10.1111/ajt.14290>
- [5] M. H. M. Chairi, M. Mogollón-González, J. Triguero-Cabrera, I. Segura-Jimenez, M. T. Villegas-Herrera, J. M. Villar-del Moral, “Impact of Ischemia and Preservation Times on Survival in Transplant Recipients From After Circulatory Death Donors”, *Transplantation Proceedings*, vol. 55, no. 10, pp. 2256-2258, Dec. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.transproceed.2023.08.033>
- [6] J. F. Ding, J. H. Weng, C. C. Chou, “Assessment of key risk factors in the cold chain logistics operations of container carriers using best worst methods”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 153, pp. 116-126, Sep. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.06.013>
- [7] G. Li, J. Chen, Z. Wang, S. Kang, Y. Liu, X. Ai, C. Wang, S. Jiang, “CD47 blockade reduces ischemia/reperfusion injury in murine heart transplantation and improves donor heart preservation”, *International Immunopharmacology*, vol. 132, May 2024, <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2024.111953>
- [8] J. D. McCully, P. J. del Nido, S. M. Emani, “Mitochondrial transplantation for organ rescue”, *Mitochondrion*, vol. 64, pp. 27-33, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2022.02.007>
- [9] Q. Liu, M. Liu, T. Yang, X. Wang, P. Cheng, H. Zhou, “What can we do to optimize mitochondrial transplantation therapy for myocardial ischemia-reperfusion injury?”, *Mitochondrion*, vol. 72, pp. 72-83, Sep. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.mito.2023.08.001>
- [10] TransMedics. “OCS Lungs”, <https://www.transmedics.com/ocs-lung/>, (accessed Feb. 17, 2024).
- [11] S. J. Pettit, M. C. Petrie, “Transplantation on Hearts Donated After Circulatory-Determined Death”, *Circulation: Heart Failure*, vol. 12, <https://doi.org/10.1161/CIRCHEARTFAILURE.119.005991>
- [12] S. Torai, K. Kurauchi, E. Kobayashi, “Evaluating a New Device for Reducing Second Warm Ischemia During Organ Transplantation in a Porcine Model of Kidney, Heart, and Pancreas Transplantation”, *Transplantation Proceedings*, vol. 155, no. 4, pp. 997-1004, May 2023, <https://doi.org/10.1016/j.transproceed.2023.03.052>
- [13] J. Bartosch. “UChicago Medicine using the newest, high-tech for transporting donor organs”, *UChicago Medicine*, <https://www.uchicagomedicine.org/forefront/transplant-articles/2022/july/uchicago-medicine-using-new-technology-for-transporting-donor-organs-for-transplant>, (accessed Feb. 17, 2024).
- [14] Stanford University. “Mobile Thermoelectric Cooler for Organ Transport (MoTec)”, *Stanford Explore Technologies*, <https://techfinder.stanford.edu/technology/mobile-thermoelectric-cooler-organ-transport-motec#:~:text=MoTEC%2C%20a%20thermoelectric%20cooler%20designed,an%20inner%20organ%20storage%20chamber>, (accessed Feb. 19, 2024).
- [15] C. Spreafico, D. Russo, “TRIZ Industrial Case Studies: A Critical Survey”, *Procedia CIRP*, vol. 39, pp. 51-56, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.165>
- [16] S. Munje, S. Kulkarni, V. Vatsal, A. Amrao, S. Pankade, “A study on product development using the TRIZ and additive manufacturing”, *materialstoday: PROCEEDINGS*, vol. 72, pp. 1367-1371, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.332>
- [17] I. Ekmekci, M. Koksall, “Triz Methodology and an Application Example for Product Development”, in *World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship*, Istanbul, Turkey, May 2015, pp. 2689-2698, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.481>
- [18] K. Gadd, “Appendix I 39 Parameters of the Contradiction Matrix”, in *TRIZ for Engineers: Enabling Inventive Problem Solving*, 1<sup>st</sup> ed, U.S: Wiley, 2011, pp. 468-470, <https://doi.org/10.1002/9780470684320.app1>