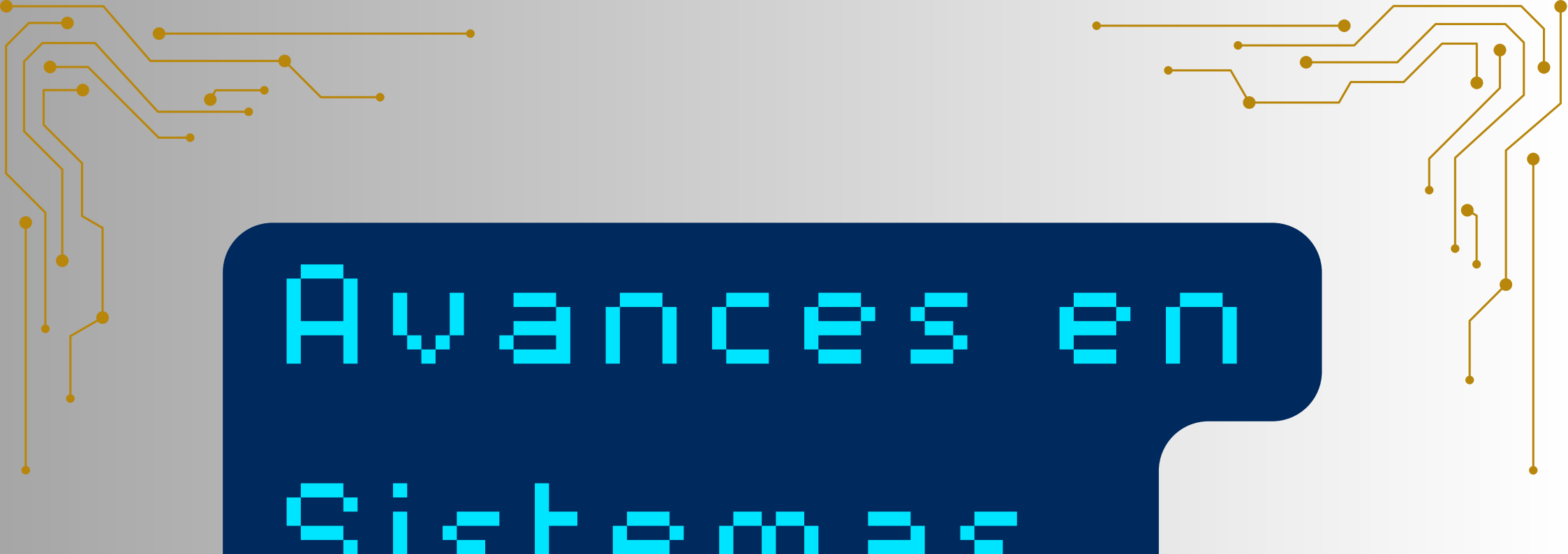


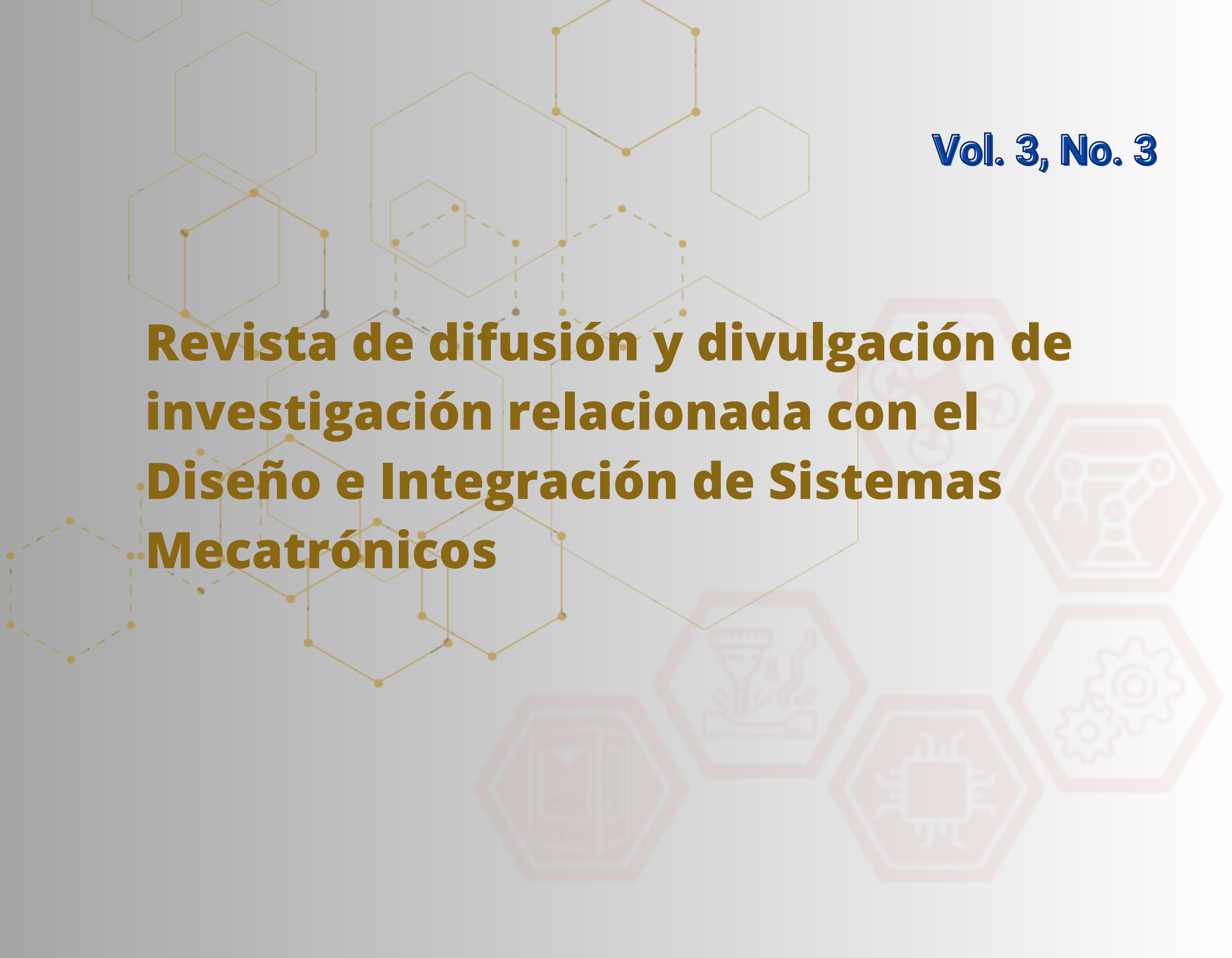


Avances en Sistemas Mecatrónicos

Diciembre de 2025

Vol. 3, No. 3

**Revista de difusión y divulgación de
investigación relacionada con el
Diseño e Integración de Sistemas
Mecatrónicos**



Directorio

Dr. Víctor Hugo Jiménez Arredondo

*Director de la División de Ingenierías
Campus Irapuato-Salamanca*

Dr. Antonio de Jesús Balvantín García

*Director del Departamento de Ingeniería
Mecánica*

Dr. Israel Martínez Ramírez

*Coordinador del Programa Educativo de
Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica*

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen

Editor en jefe

Avances en Sistemas Mecatrónicos Vol. 3, No. 3, es una publicación anual editada por la Universidad de Guanajuato, a través del Cuerpo Académico UGTO-CA-210 Diseño e Integración de Sistemas Mecatrónicos. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, Palo Blanco, C.P. 36885, Salamanca, Guanajuato, México. Tel. 4646479940. Página electrónica: <https://www.ugto.mx/campusirapuatosalamanca/asm>. Editor responsable: Felipe de Jesús Torres del Carmen (fdj.torres@ugto.mx). Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. XX-XXXX-XXXXXXXXXXXX-XXX, ISSN XXXX-XXXX, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Felipe de Jesús Torres del Carmen, Departamento de Ingeniería Mecánica, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, Palo Blanco, C.P. 36885, Salamanca, Guanajuato, México. Fecha de la última modificación: 08 de diciembre de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del consejo editorial de la publicación.

Consejo Editorial

Dr. Felipe de Jesús Torres del Carmen

Dr. Diego Alfredo Núñez Altamirano

Dr. Antonio de Jesús Balvantín García

Dr. Juan Pablo Ignacio Ramírez Paredes

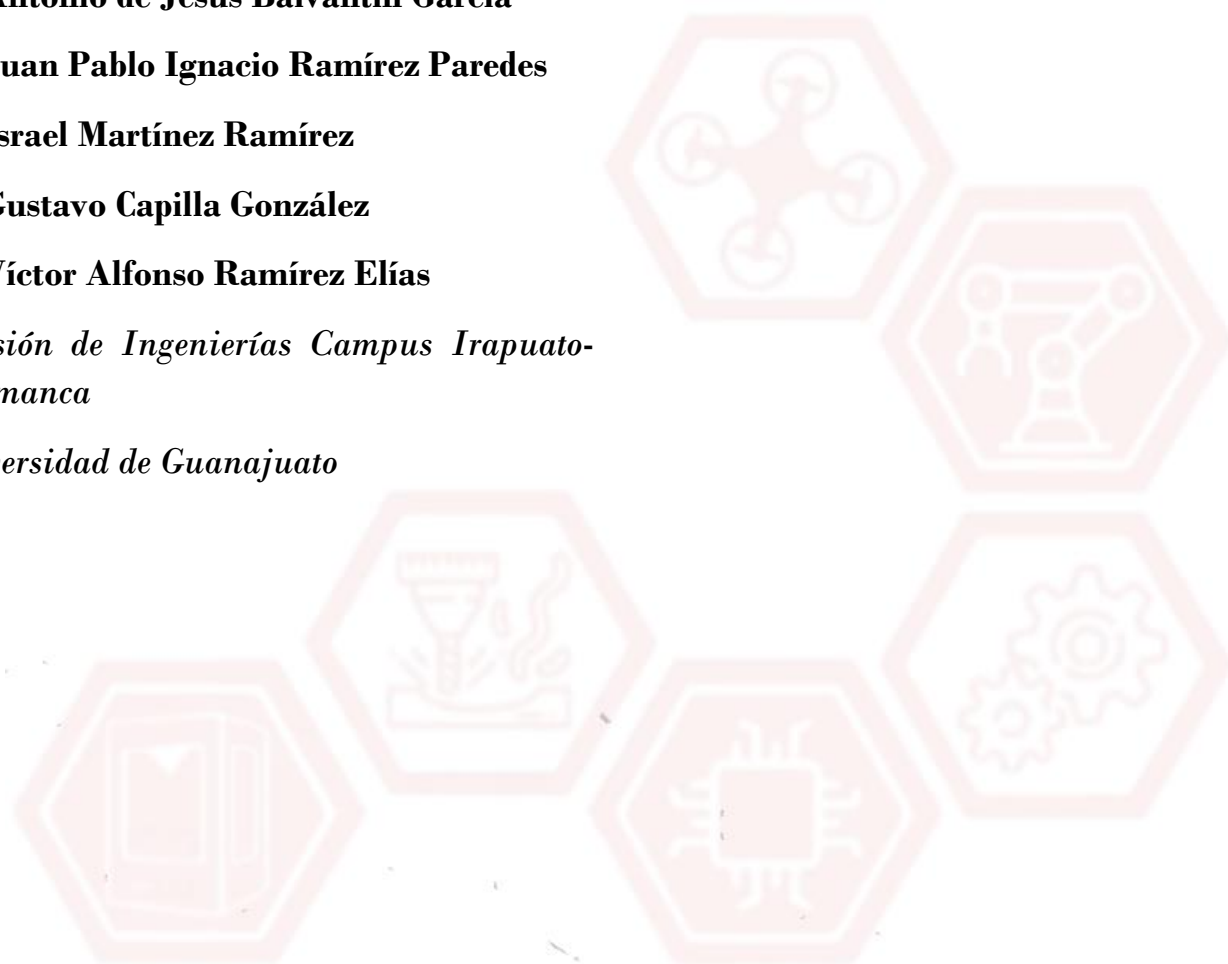
Dr. Israel Martínez Ramírez

Dr. Gustavo Capilla González

Dr. Víctor Alfonso Ramírez Elías

***División de Ingenierías Campus Irapuato-
Salamanca***

Universidad de Guanajuato



Consejo Arbitral

Dr. Antonio de Jesús Balvantín García

Universidad de Guanajuato

Dr. Felipe de Jesús Trujillo Romero

Universidad de Guanajuato

Dr. Gustavo Capilla González

Universidad de Guanajuato

Dr. Ricardo García García

Universidad de Guanajuato

Dr. Víctor Alfonso Ramírez Elías

Universidad de Guanajuato

Dra. Miroslava Cano Lara

*TecNM/Instituto Tecnológico Superior de
Irapuato*

Dr. Israel Martínez Ramírez

Universidad de Guanajuato

Dr. Diego Alfredo Núñez Altamirano

Universidad de Guanajuato

Dr. Juan Pablo Ignacio Ramírez Paredes

Universidad de Guanajuato

Dr. Daniel Edahí Urueta Hinojosa

*Universidad Politécnica del Estado de
Guerrero*

Contenido

Innovación y mejoras tecnológicas aplicadas a la PCB de un robot sumo de 3 kg <i>Bermúdez Sierra Alexis, Pérez Hernández Irma, Echegaray Franyutti José, Vaca Espino Rosa M., Zamora Cárdenas Enrique A., Nolasco Cruz José.</i>	5
Tendencias tecnológicas en el monitoreo de convertidores eléctricos mediante IoT y servicios en la nube <i>Anguiano Rodríguez Juan Daniel, López Núñez Adolfo Rafael*, Villaseñor Aguilar Marcos Jesús, Flores Rodríguez Eligio, Alfaro Rodríguez José Juan</i>	10
Sistema de Bajo Costo para el Control Gestual de Manos Robóticas Usando Visión Artificial <i>Urueta Daniel Edahi, Lavín Jorge Enrique, Valois Marco Antonio, Juárez Menez Danna Ruby</i>	16
Detección y reconstrucción de líneas de acotamiento vial mediante técnicas de visión por computadora <i>Ayala García José Francisco, Cerrano Valadés Miriam Guadalupe, Martínez Chávez María del Pilar, Gaytán Ponce Dulce María, Moreno Hernández Oscar Iván</i>	24
Estimación de propiedades fisicoquímicas en naranja (Citrus × sinensis) mediante modelado ANFIS y análisis de textura <i>Villaseñor-Aguilar Marcos Jesús, Trejo Caballero Gerardo, López-Núñez Adolfo-Rafael, Guzmán Altamirano Ángel, Herrera-Hernández Maria-Jose</i>	29
Más allá del modelo clásico: Dinámica glucosa-insulina con cálculo fraccionario <i>Lavín Delgado Jorge Enrique, Urueta Hinojosa Daniel Edahi, Soto Mendiola Rosa Maria, Salgado Díaz Jorge Alfonso</i>	37
Órtesis de Rodilla con Rigidez Ajustable Mediante Freno de Disco por Fricción <i>Sánchez-Angeles Alexis, Núñez-Altamirano Diego Alfredo, Capilla González Gustavo</i>	44
Generación de Patrones Subacuáticos Producidos por Frecuencias Cimáticas <i>Moreno Corona Irvin Elí, Reyes Medina Perla Ximena, Martínez Jiménez Leonardo, Rostro González Horacio, Edgar Alvarado Méndez, Cano Lara Miroslava</i>	50
Análisis de movimiento de dedos y traducción del lenguaje de señas por visión computacional <i>Aguilar Delgado Malcom I., Meza Vallejo Maria F., Razón González Juan Pablo, Estrada Gutiérrez Juan C., Barajas Elías Azucena, Rodríguez Bravo Humberto, Cano Lara Miroslava</i>	60

Innovación y mejoras tecnológicas aplicadas a la PCB de un robot sumo de 3 kg

Bermúdez Sierra Alexis¹, Pérez Hernández Irma², Echegaray Franyutti José³, Vaca Espino Rosa M.³, Zamora Cárdenas Enrique A.⁴, Nolasco Cruz José¹.

¹ Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Mecánica, Carretera Salamanca- Valle de Santiago km 3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México.

² Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería Mecánica, Adolfo Ruiz Cortínez s/n, Costa Verde, Ver., 94294, México.

³ Universidad Veracruzana, Facultad de administración, Puesta del sol s/n, Fraccionamiento Vista Mar, Ver., 91780, México.

⁴ Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Carretera Salamanca- Valle de Santiago km 3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México.

* Autor de correspondencia: j.nolasco@ugto.mx

Resumen. En este trabajo se muestra el proceso de diseño, modelado e implementación de una tarjeta de circuito impreso (PCB) la cual se acopló a un robot para competencia en la categoría sumo de hasta 3 kg. El objetivo del desarrollo se basó en mejorar la modularidad del sistema, la confiabilidad bajo condiciones de carga más exigentes y la eficiencia energética. Se utilizaron motores JGA25-370 con una caja reductora de relación de 33:1, un controlador DRV8874 de Texas Instruments para la etapa de potencia y un microcontrolador ESP32 con Bluetooth como medio de comunicación, todo el sistema fue alimentado con una batería basada en polímero de litio, interconectado a reguladores conmutados de alta eficiencia. El modelado de la PCB fue realizado mediante el uso del software EasyEDA, se añadieron características como separación de planos de tierra mediante la técnica “punto estrella”, enrutado con ángulos de 45° y se crearon módulos extraíbles para los controladores, facilitando el mantenimiento durante las competencias. Durante la etapa de pruebas se experimentaron mejoras en la disipación térmica, reducción del espacio interno y mejoras en la estabilidad en el control de motores, en comparación con el uso de controladores como el L298N. Los resultados mostraron que la implementación y las mejoras en los controladores de la PCB permitieron un robot más compacto, versátil y confiable. El uso de estrategias modernas de diseño y modelado electrónico en la robótica competitiva se destaca como suma importancia.

Palabras clave. Competencia sumo, PCB, modelado electrónico, DRV8874.

I. INTRODUCCIÓN

Las competencias robóticas han sido consolidadas en los últimos años como un campo de aprendizaje y experimentación de nuevas técnicas de armado en electrónica (Antonio et al., 2025) (Del Cid et al., 2011). En esta área se encuentran los robots sumos los cuales se basan en reproducir de manera similar dinámicas parecidas a las luchas japonesas, en este caso particular los robots, pueden ser tripulados o no tripulados y se busca derrotar al oponente mediante los empujes de su carcasa hasta quedar fuera del círculo o área delimitada (Albayrak y Gökhan Yuksel, 2007; Erik S, 2024; Lindao y Quilambaqui, 2014).

El prototipado de un robot sumo para la categoría de 3 kg representa ciertas condiciones de exigencia debido a las limitaciones en el peso, dimensiones y autonomía que caracterizan a la categoría (Zabala et al., 2013). No es suficiente con la construcción de una carcasa o chasis resistente a impactos o contar con motores con alto torque o potencia; es imprescindible un sistema de control que sea eficiente confiable y robusto y a su vez que garantice la operación del robot en ciertas condiciones de alta exigencia (Brengi et al., 2011; Riofrío y Joseph, 2025; Zabala et al., 2013).

El diseño de la tarjeta PCB en este contexto se convierte en un factor determinante para el desempeño global del robot (Clavijo, 2019). El mal diseño de una PCB conlleva incluso a provocar sobrecalentamientos en la unidad, pérdidas de potencia, interrupciones en la comunicación lógica e inclusive descalificaciones por falta de respuesta al momento de la competencia.

En el presente proyecto se aborda el diseño, modelado y mejoras implementadas a una PCB de un robot para competencias en la categoría de 3 kg. El trabajo se enfocó en la selección de componentes de potencia, fuentes de alimentación y control lógico. Se muestran algunas prácticas de diseño, como son la

implementación de tierras, uso de controladores modernos e integración de módulos extraíbles.

II. METODOLOGÍA Y MATERIALES

a. Materiales

Los materiales empleados en la fabricación del robot sumo fueron seleccionados de acuerdo a un balance entre rendimiento, costo y tamaño, y se seleccionaron los siguientes elementos principales: motor JGA25-370 con operación a 12 V y caja reductora con una relación de 33:1, controlador DRV8874 marca: Texas Instruments acoplado a puente H con tecnología MOSFET con capacidad de 3.5 A continuos y 5.8 A en corriente pico, microcontrolador ESP32 con conectividad Bluetooth, batería de polímero de litio (Li-Po) y reguladores conmutados de voltaje con eficiencia aproximada a 90%.

b. Metodología

El desarrollo del proyecto se realizó en tres etapas. La primera etapa se trató de una evaluación de diversas opciones para los controladores de los motores, se descartaron como opciones el L298N debido a su baja eficiencia térmica y el TB6612FNG por limitaciones en cuanto a la corriente que puede soportar. Se optó por utilizar el DRV8874 (fig. 1), ya que, mostró mayor capacidad en cuanto a eficiencia térmica y un rango de corriente superior, además de ser una tecnología más reciente.

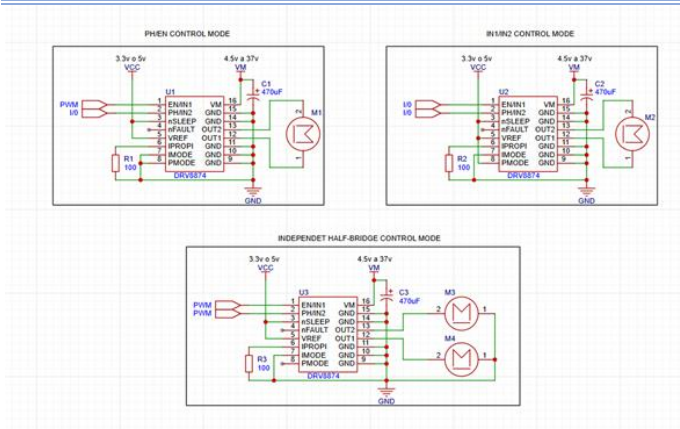


Fig. 3. Modos de operación del módulo DRV8874.

III. RESULTADOS

Se realizaron pruebas funcionales en el robot sumo, las pruebas realizadas fueron en condiciones similares a las de competencia, los resultados obtenidos mostraron que el uso del controlador DRV8874 tuvo un desempeño superior en comparación a los controladores tradicionales. Durante las pruebas de carga/empuje la corriente se mantuvo en valores aproximados a los 3 A sin presentar caídas de tensión significativas. Esto se traduce en un mejor aprovechamiento energético de la batería y mejoras en el control de velocidad de los motores mediante PWM. A diferencia del controlador L2298N se observaron pérdidas de energía de aproximadamente 20% además presentaba sobrecalentamiento en condiciones de uso prolongado.

Por otra parte, debido al aumento en el grosor de cobre en las pistas principales de la PCB, se redujo la temperatura de operación entre un 15% y 20% en comparación con un diseño con pistas de 1 oz de cobre, lo cual permitió evitar sobrecargas en la PCB y mejor soporte en corrientes pico debido al esfuerzo generado en los motores por el efecto de empuje.

Se redujeron las dimensiones aproximadamente entre un 20% y 25%, gracias a la integración del elemento ESP32 a la placa principal, eliminando la necesidad de

tarjetas intermedias, lo cual permitió incluir placas de acero para aumentar el peso del robot. Además, durante la fase de pruebas, se observó una mejora significativa en los tiempos de mantenimiento en caso de fallas, esto debido a la implementación de módulos extraíbles para los controladores de potencia, permitiendo reemplazar ciertos elementos de forma rápida sin comprometer el resto de la PCB.

También se observó que el implemento de los modos de operación permitió la conmutación entre señales lógicas y pulsos de ancho de banda (PWM) ampliando los modos de manejo del robot. En pruebas controladas se observó que el modo lógico proporcionaba estabilidad y facilidad de control mientras que el modo PWM ofreció una aceleración gradual y un control más exacto. En cuanto al empleo de baterías de polímero de litio permitió una autonomía de operación continua de hasta 18 minutos, permitiendo cubrir varias sesiones de combate sin necesidad de carga.

IV. CONCLUSIONES

Las mejoras tecnológicas implementadas en el robot sumo de 3 kg mostraron un avance notable en cuanto a robustez en su diseño, mejoras en la eficiencia energética y facilidad en su mantenimiento. Durante el desarrollo del proyecto se obtuvieron diversas mejoras significativas, en primer lugar, el uso del controlador DRV8874 mostro un cambio sustancial respecto a controladores como el L2298N, ya que permitió tener un control más estable en los motores, menor generación de calor en el armado electrónico y una demanda de corriente más optima.

En segundo lugar, la implementación de incorporar el ESP32 directamente a la PCB permitió una reducción significativa de espacio, mejorando las conexiones y permitiendo agregarle robustez al chasis del carro. Además, la incorporación de los módulos extraíbles

ofreció la capacidad de un mantenimiento rápido y eficaz sin comprometer otros elementos de la PCB. Por último, este proyecto muestra la importancia que tienen las mejoras en el diseño de la PCB y como puede impactar favorablemente el desempeño de cualquier sistema electrónico

V. REFERENCIAS

- Albayrak, M., y Gökhan YÜKSEL, Y. (2007). Design and Implementation of a Sumo Robot by 8051 Microcontroller. En Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Antonio, M., Ormaza, S., Alberto, L., Gualli, A., Sebastián, J., Arcos, V., & Guevara Nuñez, J. (2025). La competencia en minisumo.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29965>
- Brengi, D., Mariño, N., Huy, C., Gómez, R., García, G., Márquez, M., y Zaradnik, I. (2011). Competencia de sumo robot para la enseñanza de electrónica y robótica práctica.
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121943>
- Clavijo, C. (2019). Diseño y construcción de un robot minisumo.
<https://doi.org/https://doi.org/10.55411/26652544.143>
- Del Cid, A., Méndez, R., y Sandoval, F. (2011). Investigación. Fundamentos y metodología Segunda edición.
- Erik S, P. (2024). Desarrollo de dos robots mini sumo de competencia como herramientas de enseñanza educativa enfocado a bachillerato general.
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13257>
- Lindao, J. S., y Quilambaqui, E. H. (2014). Diseño y construcción de 2 robots sumo para las categorías pesado y liviano y un robot seguidor de línea modalidad velocidad.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6554>
- Riofrío, G., y Joseph, D. (2025). Desarrollo de robot micro sumo autónomo para competencias de robótica profesional.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30427>
- Zabala, S. A., Pérez, J. A., y Rodríguez, H. F. (2013). Estrategia para el desarrollo de aprendizajes en ingeniería basado en robótica educativa y competitiva: caso Universitaria de Investigación y Desarrollo, UDI.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10118643>

Tendencias tecnológicas en el monitoreo de convertidores eléctricos mediante IoT y servicios en la nube

Anguiano Rodríguez Juan Daniel, López Núñez Adolfo Rafael*, Villaseñor Aguilar Marcos
Jesús, Flores Rodríguez Eligio, Alfaro Rodríguez José Juan

TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, División de Ingeniería Electrónica, Carretera Silao-Irapuato km 12.5, El Copal, 36821, Irapuato, Guanajuato, México.

** Autor de correspondencia: adolfo.ln@irapuato.tecnm.mx*

Resumen. El avance de las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) y los servicios en la nube han impulsado el desarrollo de sistemas de monitoreo energético remotos, eficientes y de bajo costo. Este artículo presenta una revisión detallada del estado del arte sobre la aplicación del IoT en el monitoreo de variables eléctricas, con especial énfasis en convertidores DC-DC y sistemas de energía renovable. Se analizan soluciones implementadas en contextos residenciales, educativos, industriales y médicos, donde microcontroladores como el ESP32 y ESP8266, junto con sensores como ACS712 (sensor de corriente basado en efecto Hall), INA219 (sensor de voltaje y corriente digital con comunicación I²C) y SCT-013 (transformador de corriente no invasivo), han demostrado ser herramientas clave para la adquisición de datos. Asimismo, se muestra la comparación de plataformas en la nube, tales como AWS, ThingSpeak y Blynk, destacando sus capacidades de almacenamiento, visualización y escalabilidad. Además, se discuten también los protocolos de comunicación más utilizados, como MQTT, HTTP y WebSockets, evaluando su idoneidad según el tipo de aplicación. Esta revisión permite identificar tendencias tecnológicas, arquitecturas comunes y buenas prácticas que pueden guiar el desarrollo de futuros sistemas de monitoreo aplicados a convertidores eléctricos, especialmente en contextos donde la eficiencia energética, el acceso remoto y la confiabilidad son esenciales.

Palabras clave. AWS, IoT, ESP32, Convertidor, Monitoreo y MQTT.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo del IoT y los servicios en la nube ha transformado la manera en que se monitorean diversos sistemas electrónicos de potencia, permitiendo la adquisición, transmisión y análisis de datos en tiempo real (Abir et al., 2021; Witczak y Szymoniak, 2024). En particular, los convertidores DC-DC, ampliamente utilizados en aplicaciones como energía renovable, telecomunicaciones y automatización industrial, requieren supervisión constante para garantizar su eficiencia y detectar fallas de manera oportuna (Anbuselvan et al., 2024).

Numerosos trabajos recientes han abordado esta problemática mediante arquitecturas IoT de bajo costo, empleando microcontroladores como el ESP32 o ESP8266, sensores eléctricos de efecto Hall y plataformas en la nube como AWS, ThingSpeak o Blynk (Abed y Naser, 2020; Román-Reyes et al., 2024). Estas soluciones han demostrado ser efectivas en contextos con limitaciones de infraestructura, optimizando el consumo y facilitando la visualización de variables críticas como voltaje, corriente y potencia (Kaur y Sood, 2020).

Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión estructurada del estado del arte en sistemas de

monitoreo energético basados en IoT, con énfasis en su aplicación en convertidores CD-CD. Se analizan enfoques implementados en contextos industriales, residenciales, educativos y médicos, destacando sus arquitecturas, tecnologías de comunicación, plataformas utilizadas y tipos de sensores.

Este documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se exploran las principales aplicaciones del monitoreo energético en distintos entornos; en la Sección III se analiza su aplicación en sistemas de energía renovable; en la Sección IV se revisan las plataformas de nube utilizadas; en la Sección V se presentan aplicaciones médicas relevantes por su estructura técnica; finalmente, en la Sección VI se resume una comparativa técnica que consolida las tendencias actuales.

II. APLICACIONES DEL MONITOREO ENERGÉTICO BASADO EN IoT

a. Entornos residenciales y académicos.

En contextos domésticos y educativos, los sistemas de monitoreo energético han sido diseñados para ofrecer soluciones accesibles y didácticas, mediante el uso de microcontroladores de bajo costo y plataformas en la nube. Por ejemplo, (Román-Reyes et al., 2024) utilizaron un ESP32 con sensores SCT-013 y un convertidor ADC ADS1115 para monitorear el consumo eléctrico en viviendas, con visualización a través de ThingSpeak y MATLAB.

Asimismo, (Abed y Naser, 2020) propusieron un medidor inteligente basado en el módulo PZEM-004T junto con un ESP32, transmitiendo los datos a una base de datos MySQL con visualización en Microsoft Excel. Esta integración de herramientas tradicionales con hardware embebido resalta la adaptabilidad de estas tecnologías a entornos educativos.

En un enfoque orientado a la educación superior, (Mancías Zambrano y Ortíz Villegas, 2021) desarrollaron un módulo didáctico biomédico con ESP32, sensores de parámetros clínicos y servicios de AWS. Aunque no se centra en convertidores eléctricos, su arquitectura de adquisición y visualización remota resulta directamente aplicable a entornos educativos donde se explora el monitoreo energético.

b. Aplicaciones industriales.

En entornos industriales, el monitoreo energético requiere mayor precisión, escalabilidad y robustez. En ese sentido, (Zakaria et al., 2023) implementaron un sistema IoT para supervisar el consumo energético en impresoras 3D, utilizando sensores INA219 y ACS714 con un ESP32, integrados a través de AWS IoT Core y AWS Timestream para el almacenamiento, y Grafana para la visualización. Esta solución permite clasificar el consumo según las fases del proceso productivo y resulta altamente extrapolable al monitoreo de convertidores eléctricos.

Por su parte, (Vélez Iñiguez, 2022) diseñó una plataforma modular basada en el hardware Siemens IoT2040, empleando una arquitectura MQTT, bases de datos locales y una interfaz visual desarrollada en Angular. Aunque no se enfoca en servicios en la nube como AWS, esta solución es útil en entornos industriales con restricciones de conectividad, ofreciendo una base técnica reutilizable para el monitoreo de convertidores eléctricos.

III. MONITOREO EN SISTEMAS DE ENERGÍA RENOVABLE

a. Monitoreo en sistemas solares.

Diversos estudios han demostrado que los microcontroladores ESP32 y ESP8266, junto con sensores de corriente como el ACS712, pueden implementarse eficazmente para monitorear sistemas solares. (Kodali y John, 2020) desarrollaron un sistema inteligente que monitorea variables eléctricas y controla la inclinación de los paneles solares utilizando AWS IoT Core y Amazon QuickSight. Su enfoque no solo permite mejorar la eficiencia energética, sino también integrar análisis avanzado de datos en tiempo real.

Por otro lado, (Cruz-Vázquez et al., 2021) propusieron una solución portátil para comunidades rurales. El sistema, basado en ESP32 y sensores ACS712, transmite los datos a AWS y visualiza información en la aplicación Blynk, permitiendo la supervisión sin necesidad de conexión constante a Internet.

b. Aplicaciones combinadas e híbridas.

El trabajo de (Huarcaya Carzola, 2023) se enfoca en un sistema híbrido de respaldo de energía para la conservación de vacunas en centros de salud de zonas rurales, utilizando paneles solares y un ESP32 para controlar y monitorear variables como voltaje, temperatura y humedad. El sistema integra plataformas como Node-RED, AWS y Cayenne, lo que permite el monitoreo remoto y el control automatizado de condiciones críticas.

Además, (Zakaria et al., 2023) estudiaron un sistema de monitoreo aplicado a impresoras 3D alimentadas por energía solar, destacando cómo el análisis del consumo energético puede correlacionarse con la eficiencia del sistema fotovoltaico en función de la carga conectada.

Estos trabajos, aunque orientados a sistemas solares completos, comparten elementos esenciales con los sistemas de monitoreo de convertidores tipo elevador. La capacidad de adquirir y visualizar variables eléctricas en tiempo real permite validar la eficiencia energética y ajustar el comportamiento de los convertidores en función de las condiciones de carga y generación.

IV. PLATAFORMAS EN LA NUBE Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

Una de las características más relevantes de los sistemas de monitoreo basados en IoT es su capacidad para enviar datos hacia plataformas en la nube, donde pueden ser almacenados, procesados y visualizados. La elección de la plataforma adecuada impacta directamente en la escalabilidad, accesibilidad y eficiencia del sistema.

a. Servicios avanzados como AWS.

En entornos industriales y de investigación avanzada, Amazon Web Services (AWS) ha demostrado ser una de las plataformas más robustas y escalables para el monitoreo energético. (Zakaria et al., 2023) integraron AWS IoT Core para la gestión de dispositivos, AWS Timestream para almacenamiento de series temporales y Grafana para la visualización de datos en tiempo real, lo que permitió realizar análisis detallados del consumo energético en procesos de manufactura aditiva.

De manera similar, (Kodali y John, 2020) emplearon AWS IoT Core y Amazon QuickSight para el monitoreo y análisis de sistemas solares, destacando la capacidad de integrar la plataforma con servicios analíticos que habilitan funciones predictivas y de optimización.

b. Plataformas accesibles y educativas.

En entornos académicos y prototipado rápido, plataformas como ThingSpeak han sido ampliamente utilizadas debido a su facilidad de uso y bajo costo. (Román-Reyes et al., 2024) implementaron un sistema de monitoreo doméstico utilizando el microcontrolador ESP32 y ThingSpeak para almacenamiento y visualización, complementando el análisis con MATLAB.

Por su parte, (Cruz-Vázquez et al., 2021) integraron la plataforma Blynk para crear una interfaz móvil que permitiera supervisar en tiempo real un sistema fotovoltaico portátil, sin necesidad de infraestructura compleja.

El análisis de las plataformas en la nube sugiere que la selección de la plataforma depende del contexto de uso:

- **AWS** ofrece alta disponibilidad, seguridad y capacidades de análisis avanzado, siendo óptima para aplicaciones industriales y de gran escala (Kodali y John, 2020; Zakaria et al., 2023).
- **ThingSpeak** es económica y fácil de integrar con MATLAB, ideal para educación y proyectos de bajo presupuesto (Román-Reyes et al., 2024).
- **Blynk** facilita el desarrollo de interfaces móviles sin conocimientos avanzados de programación, ideal para prototipos funcionales (Cruz-Vázquez et al., 2021).

Este análisis resulta crucial para diseñar sistemas de monitoreo remoto de convertidores, donde se requiere flexibilidad en la visualización, procesamiento eficiente y posibilidad de expansión futura.

V. APLICACIONES MÉDICAS CON ARQUITECTURA IOT REUTILIZABLE

Las aplicaciones médicas basadas en IoT han demostrado ser un terreno fértil para el diseño de sistemas de monitoreo remoto, debido a su alta demanda de confiabilidad, portabilidad y automatización. A pesar de que su enfoque principal no es el monitoreo energético, sus componentes técnicos son extrapolables a sistemas que supervisan convertidores eléctricos en tiempo real.

a. Monitorización de variables clínicas.

En el ámbito médico, las arquitecturas IoT han sido ampliamente utilizadas para el monitoreo de variables fisiológicas, ofreciendo principios técnicos extrapolables al monitoreo energético. (Mancías Zambrano y Ortíz Villegas, 2021) desarrollaron un módulo didáctico de telemedicina basado en ESP32, capaz de medir temperatura, frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, con visualización mediante AWS y Ubidots.

Asimismo, (Velpula y Kotti, 2023) diseñaron un sistema para monitorear el nivel de solución salina en hospitales, utilizando sensores de carga y un ESP8266. Los datos se enviaron a la plataforma ThingSpeak y se visualizaron en una aplicación móvil, implementando alertas automáticas ante niveles críticos.

Este enfoque demuestra la utilidad del monitoreo continuo y la generación de alertas automáticas, principios clave en la supervisión de convertidores.

b. Protocolos eficientes y comunicación segura.

(Ghosh et al., 2018) emplearon un ESP32 con sensores de carga y el protocolo MQTT-S para garantizar una comunicación eficiente y segura. Este sistema integró mecanismos de autenticación mediante mensajes hash, asegurando la integridad de los datos, lo que constituye una práctica aplicable en sistemas de monitoreo energético con requisitos de seguridad elevados.

c. Arquitecturas combinadas para aplicaciones críticas.

El trabajo de (Huarcaya Carzola, 2023), además de abordar energía renovable, incorpora un componente médico-social al monitorear condiciones ambientales críticas para la conservación de vacunas en zonas rurales. Su sistema combina el control energético con la

supervisión de temperatura y humedad, integrando Node-RED, AWS y Cayenne en una única arquitectura IoT.

Estos sistemas, aunque diseñados para fines médicos, comparten elementos clave con el monitoreo energético: uso de microcontroladores, adquisición de datos en tiempo real, protocolos ligeros como MQTT y almacenamiento en la nube. La adaptación de estas arquitecturas puede acelerar el desarrollo de soluciones para convertidores DC-DC que requieran supervisión remota y confiabilidad operativa.

VI. COMPARATIVA TÉCNICA DE SISTEMAS DE MONITOREO BASADOS EN IOT.

Tras el análisis de múltiples aplicaciones de monitoreo energético e IoT, es posible identificar similitudes clave y diferencias relevantes en cuanto a plataformas utilizadas, microcontroladores, sensores, protocolos y tipos de almacenamiento. Esta comparativa permite visualizar las tendencias actuales y tomar decisiones informadas al momento de diseñar nuevos sistemas aplicados al monitoreo de convertidores eléctricos.

a. Tendencias comunes identificadas.

Los microcontroladores ESP32 y ESP8266 son los más empleados debido a su bajo costo, conectividad Wi-Fi integrada y amplia comunidad de desarrollo (Abed y Naser, 2020; Román-Reyes et al., 2024).

En cuanto a sensores eléctricos, destacan el ACS712, el INA219 y el SCT-013 por su facilidad de integración y precisión aceptable en proyectos tanto académicos como industriales (Cruz-Vázquez et al., 2021; Zakaria et al., 2023).

Respecto a plataformas en la nube, AWS predomina en soluciones industriales por su escalabilidad y opciones de análisis avanzado (Kodali y John, 2020; Zakaria et al., 2023), mientras que ThingSpeak y Blynk son más frecuentes en aplicaciones educativas y prototipado (Cruz-Vázquez et al., 2021; Román-Reyes et al., 2024).

En protocolos de comunicación, MQTT y su variante MQTT-S son preferidos por su bajo consumo de recursos

y compatibilidad con entornos de hardware limitado (Ghosh et al., 2018; Velpula y Kotti, 2023).

b. Comparación de sistemas representativos.

Tab. 1 resume los sistemas más relevantes identificados en la revisión, detallando su aplicación, hardware, plataforma IoT, variables monitoreadas y tipo de almacenamiento.

Esta tabla refleja la diversidad de enfoques en el diseño de sistemas de monitoreo IoT, destacando la adaptabilidad de los componentes y la relevancia creciente de servicios en la nube como AWS en soluciones energéticas e industriales.

Tab. 1. Comparativa técnica de sistemas IoT aplicados al monitoreo.

Referencia	Aplicación principal	μC	Plataformas IoT	Variables medidas	Plataforma IoT
(Román-Reyes et al., 2024)	Monitoreo doméstico	ESP32	ThingSpeak + MATLAB	Corriente, voltaje, potencia	ThingSpeak
(Zakaria et al., 2023)	Industria (Impresión 3D)	ESP32 + INA219	AWS IoT + Grafana	Corriente, voltaje, potencia	AWS Timestream
(Mancías Zambrano y Ortiz Villegas, 2021)	Educación biomédica	ESP32	AWS + Ubidots	ECG, SpO ₂ , temperatura	AWS + dashboard
(Kodali y John, 2020)	Sistema solar inteligente	ESP8266	AWS IoT + QuickSight	Corriente, voltaje, temperatura	AWS
(Cruz-Vázquez et al., 2021)	Sistema portátil solar	ESP32	AWS + Blynk	Voltaje, corriente	AWS
(Huaracaya Carzola, 2023)	Monitoreo solar médico	ESP32	AWS + Node-RED	Voltaje, temperatura, humedad	AWS
(Ghosh et al., 2018)	Salud (suero intravenoso)	ESP32	MQTT-S	Peso (nivel de suero)	MQTT Broker

VII. CONCLUSIONES

La revisión de este estado del arte evidencia que la integración de tecnologías IoT con plataformas en la nube se ha consolidado como una estrategia eficaz para el monitoreo energético en distintos contextos de aplicación. Tanto en entornos industriales como académicos, el uso de microcontroladores como el ESP32 y ESP8266, junto con sensores eléctricos de bajo costo y protocolos eficientes como MQTT, ha permitido desarrollar sistemas accesibles, escalables y confiables. Aunque la mayoría de los trabajos analizados emplean microcontroladores de la familia ESP32 y ESP8266 por su bajo costo y conectividad integrada, también se identificaron aplicaciones con otros dispositivos de bajo

consumo, como Arduino UNO y Raspberry Pi, aunque en menor proporción.

En términos de infraestructura de software, AWS se posiciona como la plataforma más robusta para aplicaciones de gran escala, gracias a sus capacidades de análisis avanzado, alta disponibilidad y seguridad. Por otro lado, ThingSpeak y Blynk ofrecen soluciones más accesibles y de rápida implementación, ideales para entornos educativos o prototipos.

Asimismo, las arquitecturas IoT desarrolladas en aplicaciones médicas, aunque centradas en variables fisiológicas, presentan una base técnica directamente adaptable al monitoreo de convertidores DC-DC, al compartir elementos como la adquisición en tiempo real, la transmisión inalámbrica segura y la visualización remota.

La combinación de hardware embebido, sensores económicos y servicios en la nube está impulsando el desarrollo de sistemas de monitoreo remoto cada vez más prácticos y confiables. Estos avances no solo permiten mejorar la eficiencia energética y asegurar un funcionamiento estable, sino que también abren paso a nuevas posibilidades, como el uso de algoritmos predictivos y la optimización en tiempo real. Para investigaciones futuras, será clave explorar la integración de inteligencia artificial para anticipar fallas y diseñar interfaces gráficas más intuitivas y adaptables, que faciliten la supervisión y la toma de decisiones en distintos entornos, desde el hogar hasta la industria.

REFERENCIAS

- Abed, I. A., y Naser, H. Y. (2020). ESP32 Microcontroller Based Smart Power Meter System Design and Implementation. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*, 25(2), 136–143.
- Abir, S. M. A. A., Anwar, A., Choi, J., y Kayes, A. S. M. (2021). IoT-enabled smart energy grid: Applications and challenges. *IEEE Access*, 9, 50961–50981. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067331>

- Anbuselvan, N., Hemalatha, S., Lakshminarayanan, S., Sivanantham, E., Mohankumar, N., y R, T. (2024). Buck Boost Converter Control in an IoT-Based Wind System Using Supervised Learning Technique. *2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems (ISTEMS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISTEMS60181.2024.10560176>
- Cruz-Vázquez, J. K., Velasco-Pineda, M., y Ruiz-Ruiz, F. G. (2021). Monitoreo del voltaje de una placa solar y calidad luminosa usando Internet de las Cosas. *Nova Scientia*, 13(26), 1–16. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2684>
- Ghosh, D., Agrawal, A., Prakash, N., y Goyal, P. (2018, November 9). Smart saline level monitoring system using ESP32 and MQTT-S. *2018 IEEE 20th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services, Healthcom 2018*. <https://doi.org/10.1109/HealthCom.2018.8531172>
- Huarcaya Carzola, J. F. (2023). *Propuesta de sistema de respaldo de energía eléctrica con energía solar empleando monitoreo de sensores y control de iluminación mediante IoT para un puesto de vacunación ubicado en el pueblo de Chilata, provincia de Moquegua, 2022* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Católica de Santa María.
- Kaur, N., y Sood, S. K. (2020). An Energy-Efficient Architecture for the Internet of Things (IoT). *IEEE Systems Journal*, 11(2), 796–805. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2469676>
- Kodali, R. K., y John, J. (2020). Smart Monitoring of Solar Panels Using AWS. *2020 International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, PARC 2020*, 422–427.
- Mancías Zambrano, C. A., y Ortiz Villegas, M. Á. (2021). *Diseño e Implementación de Módulo Didáctico IoT Aplicado a Telemedicina con Hardware de Bajo Costo y Servicios Web en la Nube* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.
- Román-Reyes, J. E., González-Vargas, L. A., Alvarado-Tovar, N., y Manqueros-Avilés, V. E. (2024). Desarrollo de un Sistema IoT Básico para Monitoreo en Tiempo Real de Consumo y Demanda Energética Doméstica Usando Microcontrolador ESP32 y ThingSpeak de Matlab. *CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO*, 1(10), 129–138. <https://doi.org/10.62805/cid2024.cid032>
- Vélez Iñiguez, F. P. (2022). *Desarrollo de una Plataforma Basada en Internet de las Cosas para el Monitoreo y Registro de Información de Dispositivos Industriales* [Tesis de Maestría]. Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador.
- Velpula, N., y Kotti, D. (2023). *IoT-based Saline Volume Monitoring and Alert System* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Blekinge]. www.bth.se
- Witczak, D., y Szymoniak, S. (2024). Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/app14198943>
- Zakaria, S., Mativenga, P., y Ariff, E. A. R. E. (2023). An Investigation of Energy Consumption in Fused Deposition Modelling using ESP32 IoT Monitoring System. *Procedia CIRP*, 116, 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.045>

Sistema de Bajo Costo para el Control Gestual de Manos Robóticas Usando Visión Artificial

Urueta Daniel Edahi^{*1}, Lavín Jorge Enrique¹, Valois Marco Antonio¹, Juárez Menez Danna
Ruby¹

¹ Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Ingeniería en Tecnologías de la Información e Innovación
Digital, Carretera Federal Iguala-Taxco, Comunidad de Puente Campuzano.

* Autor de correspondencia: daniel.urueta@upeg.edu.mx

Resumen. El presente trabajo presenta un sistema de control gestual para teleoperación de servomotores, diseñado para ejecutarse como aplicación de escritorio y basado en el seguimiento de marcadores de mano de alta densidad mediante visión por computadora, junto con el cálculo de apertura por dedo mapeado a un rango de 0 a 180°. La metodología integra captura y detección de la mano, estimación del ángulo por dedo a partir de distancias entre puntos anatómicos, normalización y filtrado temporal para atenuar ruido, así como el envío de los cinco ángulos por puerto serial hacia una plataforma Arduino que acciona servomotores en tiempo real, priorizando la eficiencia computacional y la robustez ante variaciones de iluminación y oclusiones parciales. En pruebas de banco con escenarios controlados y distintos usuarios, el sistema mostró respuesta estable y control continuo de cinco grados de libertad, evidenciando su viabilidad técnica. La solución propuesta se perfila como una alternativa accesible y escalable para prototipado de manos robóticas, rehabilitación, educación y manipulación remota, con potencial de impacto social en contextos de recursos limitados.

Palabras clave. Control gestual, Mano robótica, Visión artificial.

I. INTRODUCCIÓN

La interacción humano-robot mediante control gestual ha emergido como una vía prometedora para manipulación remota, prototipado de efectores y asistencia en rehabilitación, con un interés sostenido por reducir barreras de uso y costo. La literatura reciente reporta avances en estimación de pose de la mano en tiempo real y en mapeo de gestos a actuadores, lo que refrenda que la seguridad y la eficacia operativa en entornos mecatrónicos dependen de interfaces intuitivas, robustas y de bajo umbral de adopción (Qi et al., 2024) (Gao et al., 2025). En paralelo, la disponibilidad de cámaras integradas en equipos de

cómputo personales y la madurez de modelos ligeros de visión por computadora han facilitado soluciones que prescinden de guantes instrumentados o sensores dedicados, sin renunciar al control continuo por dedo.

En los últimos años, fabricantes y desarrolladores han ofrecido alternativas basadas en guantes con IMUs, dispositivos ópticos dedicados y sensores de profundidad; no obstante, las soluciones puramente visuales ganan terreno por su portabilidad, menor mantenimiento y facilidad de despliegue en equipos convencionales. Estas tendencias se amplifican en aplicaciones educativas y de laboratorio, donde la reproducibilidad y el costo total de propiedad

condicionan la elección tecnológica. Aun así, persiste una adopción desigual ya que los dispositivos especializados suelen concentrarse en segmentos de mayor presupuesto, mientras que la investigación aplicada y la enseñanza requieren herramientas abiertas, configurables y compatibles con hardware cotidiano (Al Farid et al., 2022; T. Wang et al., 2022).

Este desbalance es más notorio en contextos con brecha digital y restricciones presupuestales. En México, y particularmente en entidades con menores niveles de equipamiento tecnológico, las plataformas para teleoperación de manos robóticas o para entrenamiento en control de actuadores resultan difíciles de adquirir o mantener. Por lo tanto, se hace necesario impulsar alternativas viables, eficientes y pertinentes al uso real como herramientas de bajo costo, que funcionen en computadoras comunes y que eleven el estándar de interacción humano-robot sin depender de periféricos propietarios ni de licencias (García-Gil et al., 2025; Phuong & Cong, 2024).

El presente trabajo muestra una aplicación de escritorio para control gestual de cinco servomotores mediante visión por computadora, diseñada para operar con cámaras convencionales y procesamiento local. El enfoque combina la estimación de 21 puntos clave de la mano con un indicador geométrico de apertura por dedo, mapeado a un rango de 0 a 180°, más una lógica temporal para estabilizar el comando. Los cinco ángulos resultantes se transmiten por puerto serial hacia una plataforma microcontrolada que acciona los servomotores en tiempo real, priorizando eficiencia computacional, baja latencia y resiliencia ante variaciones de iluminación u oclusiones parciales.

II. OBJETIVOS

a. General.

Desarrollar y validar una aplicación de escritorio para control gestual de cinco servomotores que, a partir de la estimación en tiempo real de puntos clave de la mano y del mapeo 0–180° por dedo, transmita comandos por puerto serial simulando así el movimiento de una mano robótica.

b. Específicos.

- Implementar la estimación de puntos clave de la mano y el cálculo de apertura por dedo mapeado de 0–180°.
- Enviar en tiempo real los cinco ángulos por puerto serial y accionar servomotores.
- Calibrar rangos de apertura y un suavizado temporal ligero para mejorar la estabilidad del control.
- Validar el prototipo en condiciones controladas y semi-controladas.
- Proveer una interfaz sencilla para la manipulación del usuario final.

III. MARCO TEÓRICO

a. Control gestual.

El control gestual utiliza los movimientos de la mano como interfaz natural para generar comandos en sistemas mecatrónicos, reduciendo la dependencia de periféricos dedicados y favoreciendo la portabilidad. En la presente propuesta, cada dedo se modela como un grado de libertad cuya apertura se estima a partir de relaciones geométricas entre puntos anatómicos de la mano y se mapea a un rango de 0 a 180°, directamente interpretable por servomotores. Este enfoque permite un control continuo por dedo, facilitando tareas de teleoperación básica, prototipado de efectores y actividades didácticas.

b. Visión por computadora.

Los avances en modelos ligeros de estimación de puntos clave permiten detectar la mano y recuperar en tiempo real la posición de marcadores anatómicos con precisión suficiente para calcular medidas de flexo-extensión por dedo en equipos de escritorio sin aceleración especializada. La métrica empleada se basa en distancias normalizadas entre la punta y la base proximal de cada dedo (tip–MCP), lo que mitiga efectos de escala y distancia a cámara. Tras la normalización, los valores se

proyectan linealmente al dominio angular 0–180° y se filtran con un paso bajo de primer orden o media móvil para estabilizar el control frente a variaciones de iluminación, pequeñas oclusiones y microtemblores. Este proceso visual es totalmente local, por lo que se preserva la privacidad y mantiene la operación con conectividad limitada o sin conexión a Internet.

c. MediaPipe.

El sistema adopta MediaPipe Hands por su arquitectura de dos etapas (detector de palma + regresor de landmarks) optimizada para ejecución en CPU y dispositivos sin GPU, alcanzando latencias sub-10 ms por cuadro en equipos convencionales y con 21 puntos por mano, lo que favorece el control continuo de articulaciones (Zhang et al., 2020). Alternativas como OpenPose/Hand (Cao et al., 2018) o HRNet (J. Wang et al., 2020) ofrecen alta precisión, pero con mayores requisitos de cómputo y despliegue.

La elección de MediaPipe Hands frente a alternativas como OpenPose/Hand, HRNet, HandPose y modelos con Transformers está fundamentada en (Cao et al., 2018; Pu et al., 2023; J. Wang et al., 2020; Zhang et al., 2020): (a) latencia sustancialmente menor en equipos CPU convencionales (30–60 FPS en laptop sin GPU vs 10–20 FPS en GPU con OpenPose), (b) menor dependencia de hardware propietario, (c) robustez ante oclusiones parciales y variaciones de iluminación, demostrado en pruebas con el conjunto FreiHand, y (d) licencia open-source y fácil despliegue. Aunque modelos basados en HRNet o Transformers ofrecen mayor precisión absoluta (mAP o PCK>0.9), los requerimientos de memoria y GPU limitan su aplicación en sistemas de bajo costo. MediaPipe Hands alcanza precisión media en PCK@0.2 (>0.85) y mantiene la operación estable en ambientes y usuarios diversos.

d. Sistemas embebidos para accionamiento.

La comunicación entre la aplicación de escritorio y la plataforma embebida se realiza por puerto serial, transmitiendo en cada ciclo los cinco ángulos

correspondientes a índice, medio, anular, meñique y pulgar. En el microcontrolador recibe, valida el rango y actualiza la posición de cinco servomotores mediante PWM, incorporando límites de seguridad y una tasa fija de actualización para evitar sobreesfuerzos mecánicos. Esta arquitectura PC-embebido permite mantener un equilibrio entre el costo, la simplicidad de integración y la capacidad de respuesta en tiempo real, ofreciendo así una solución accesible y replicable en entornos educativos y de prototipado.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Materiales

- Computadora de escritorio con webcam USB o laptop con cámara integrada y puerto USB libre.
- Microcontrolador Arduino Uno para recepción serial y control PWM.
- Servomotores de posición.
- Cables Dupont.
- Protoboard.
- Python 3.12.2 con OpenCV y biblioteca comunicación serial.
- Firmware en Arduino con Servo.h para recibir los ángulos y actualizar el PWM.

b. Métodos

- Desarrollar el software para capturar con webcam la detección de mano en tiempo real.
- Estimar puntos anatómicos de la mano por medio de MediaPipe Hands para la detección y regresión de 21 puntos clave tridimensionales (landmarks) de la mano a partir de imágenes RGB capturadas en tiempo real.
- Calcular la distancia normalizada punta–MCP por dedo (índice, medio, anular, meñique, pulgar) usando una el ancho de la palma como referencia interna de escala.
- Interpolar linealmente la métrica por dedo al rango 0–180° con parámetros mínimos–máximos previamente calibrados.

- Obtener los cinco ángulos en una cadena y enviarlos por puerto serial al microcontrolador.
- Recibir y validar rango para actualizar el PWM los servomotores a tasa fija (≈ 50 Hz).

a. Cálculo y normalización de ángulos

Para estimar la abertura de cada dedo, se calculan vectores articulados entre los landmarks MCP, PIP y TIP; el ángulo articular se obtiene usando producto punto y función atan2 entre los puntos relevantes para cada dedo (específicamente, TIP–PIP–MCP). El rango fisiológico de los dedos se calibra entre las posturas máxima apertura y cierre, normalizando los valores resultantes a un dominio de $0-180^\circ$, acorde con la capacidad de los servomotores estándar. El filtrado temporal mediante media móvil o paso bajo atenúa jitter y microtemblores sin demorar la respuesta. Este procedimiento garantiza la cobertura total de los gestos clave (apertura, cierre, pinza, garra) independientemente de la variabilidad individual.

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan las pruebas experimentales realizadas con el sistema propuesto, utilizando distintos usuarios y condiciones de uso. Se muestran las capturas de los resultados obtenidos durante la detección de mano en tiempo real y la transmisión de datos hacia la plataforma embebida.

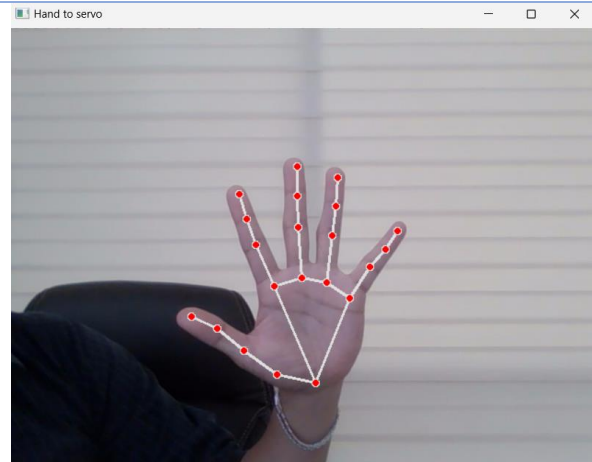


Fig. 1. Detección de puntos de referencia en la mano.

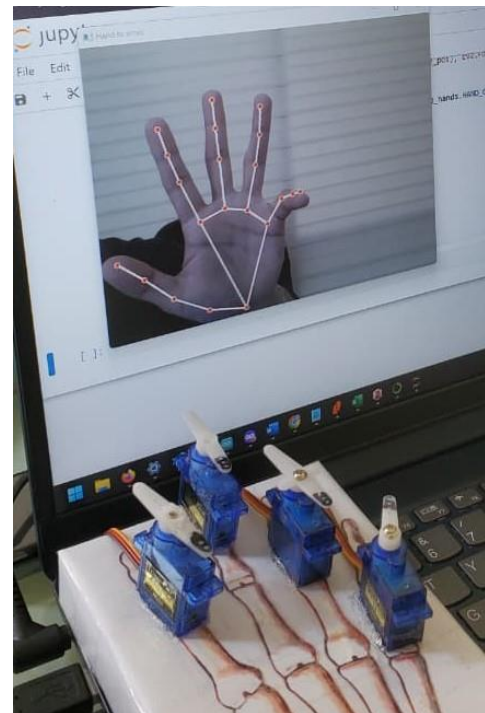


Fig. 2. Detección de mano y movimiento de un servomotor con un dedo.



Fig. 3. Detección de mano y movimiento de un servomotor con diferentes dedos.

Con estos resultados se evidencia la capacidad del prototipo para mantener estabilidad en el seguimiento, robustez frente a variaciones de condiciones y respuesta continua en el control de los servomotores.

La elección de servomotores como actuadores responde a su elevada relación par/peso, precisión angular controlable por PWM y amplia disponibilidad en el mercado, lo que facilita la integración en plataformas Arduino de bajo costo (Liu et al., 2023; Open Bionics, 2016). El mapeo landmarks a ángulos articulares y señales PWM consiste en transmitir los cinco ángulos resultantes vía puerto serial a microcontrolador, el cual actualiza individualmente la posición de cada servo, replicando gestos del usuario en tiempo real. Los servos permiten réplica fiel de movimientos para tareas de teleoperación, rehabilitación y prototipado HRI, tal como se demuestra en la mano robótica adjunta y sistemas comparables como la Ada Hand de Open Bionics, con arquitectura open-source y control similar.

a. Comparativas y métricas.

La evaluación del sistema se basa en métricas objetivas para detección de landmarks y control robótico: PCK@ τ , mAP de puntos clave, error medio de localización px/mm, y AUC-PCK para reproducibilidad (Papandreou et al., 2017) (Pu et al., 2023). En el control físico, se incluye el error angular medio ($^{\circ}$) entre gesto origen y postura final replicada, así como histéresis, repetibilidad y tiempo de asentamiento de los servos (Liu et al., 2023). Las pruebas reportan desempeño robusto (>30 FPS), error angular $<8^{\circ}$ e histéresis menor al 5% en condiciones estándar. Comparativamente, MediaPipe Hands en CPU muestra latencia inferior y robustez de detección superior a OpenPose (Cao et al., 2018) en PC sin GPU, validando su uso educativo y prototípico.

Sistema	FPS CPU	FPS GPU	PCK@0.2	mAP	Robustez oclusión	Licencia
MediaPipe	30–60	>60	0.85–0.88	~ 0.85	Alta	Apache 2
OpenPose/Hand	10–20	30–40	0.9	~ 0.90	Media	GPL
HRNet	<10	30	0.95	>0.92	Alta	MIT

Tabla. 4. Comparativa de sistemas y respuestas

a. Cálculo de costos.

El hardware propio utilizado comprende: 1 Arduino Uno ($\sim \$320$ MXN), 5 servomotores SG90 ($\sim \$60$ MXN c/u), cables Dupont, protoboard, totalizando un costo estimado máximo de $\sim \$620$ MXN. Alternativas como guantes instrumentados IMU/flex oscilan entre $\$190$ – 320 USD, mientras soluciones propietarias comerciales superan los $\$650$ USD. El ahorro porcentual es del 73%–92% respecto a opciones comerciales y del 83% frente a guantes IMU. Todo el software empleado es open-source y la interfaz es ejecutable en cualquier laptop con webcam, reduciendo así barreras de acceso y mantenimiento. A continuación, se muestra una tabla con los presupuestos aproximados de diferentes alternativas,

Componente	Modelo / Detalle	Cantidad	Precio unitario (MXN)	Precio total (MXN)	Precio total (USD)
------------	------------------	----------	-----------------------	--------------------	--------------------

Microcontrolador	Arduino Uno Rev3	1	320	320	16.1
Servomotores	SG90 estándar	5	60	300	15.1
Cableado y conectores	Cables Dupont, protoboard	N/A	N/A	100 (estimado)	5.05
Estructura	Impresión 3D / materiales reciclados	1	300	300	15.1
Total propuesta				1020	51.35
Alternativa 1	Guante IMU/Flex	1	3800–6300 (estimado)	3800–6300	190–315
Alternativa 2	Solución propietaria comercial	1	13000+	13000+	650+

Tabla. 2. Costos estimados y comparativa de presupuestos

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una aplicación de escritorio para control gestual de servomotores que integra estimación en tiempo real de puntos clave de la mano, cálculo de apertura por dedo y mapeo lineal 0–180°, con transmisión serial hacia una plataforma embebida. Las pruebas en escenarios controlados y semi-controlados mostraron control continuo por dedo, latencia baja y estabilidad suficiente para teleoperación básica y demostradores didácticos, evidenciando así la viabilidad técnica de la propuesta.

La simplicidad del sistema propuesto, el bajo consumo de capacidad de cómputo y el procesamiento local, favorecen la replicabilidad en laboratorios con recursos limitados y, al mismo tiempo, permiten documentar límites de uso y establecer parámetros de operación, promoviendo que el sistema pueda tener una adopción accesible sin depender de periféricos propietarios.

Finalmente, el sistema tiene valor formativo como caso de estudio en mecatrónica, al articular visión por

computadora, comunicación PC–microcontrolador y accionamiento eléctrico en un mismo proyecto.

El sistema implementado demuestra que el uso del pipeline MediaPipe Hands, combinado con un control basado en servomotores de bajo costo, permite una solución eficaz, precisa y accesible para el control gestual robótico de una mano mecánica. Las métricas evaluadas, incluyendo PCK, mAP, error angular y robustez ante oclusiones, validan un desempeño competitivo frente al estado del arte, con una latencia adecuada para teleoperación y propósitos educativos. La estrategia de normalización y filtrado de ángulos articulares garantiza estabilidad y replicabilidad de movimientos naturales.

Adicionalmente, el análisis económico evidencia un ahorro significativo de más del 80% respecto a alternativas basadas en guantes IMU o sistemas comerciales propietarios, lo cual facilita la escalabilidad y adopción en contextos académicos y de desarrollo experimental. Estas ventajas posicionan al sistema como un prototipo viable tanto para aplicaciones de rehabilitación, investigación en interacción humano-robot y enseñanza en control por computadora visual.

Para trabajos futuros se recomienda ampliar la base de datos de prueba con mayor diversidad de usuarios y gestos, optimizar la calibración automática de los rangos angulares y explorar nuevas arquitecturas neuronales para mejorar la precisión sin sacrificar rendimiento en hardware modesto.

REFERENCIAS

- Al Farid, F., Hashim, N., Abdullah, J., Bhuiyan, M. R., Shahida Mohd Isa, W. N., Uddin, J., Haque, M. A., & Husen, M. N. (2022). A Structured and Methodological Review on Vision-Based Hand Gesture Recognition System. *Journal of Imaging*, 8(6), 153.
<https://doi.org/10.3390/jimaging8060153>
- Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S.-E., & Sheikh, Y. (2018). OpenPose: Realtime Multi-Person 2D

- Pose Detection using Part Affinity Fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2929257>
- Gao, Z., Chen, J., Liu, Y., Jin, Y., & Tian, D. (2025). A systematic survey on human pose estimation: Upstream and downstream tasks, approaches, lightweight models, and prospects. *Artificial Intelligence Review*, 58(3), 68.
<https://doi.org/10.1007/s10462-024-11060-2>
- García-Gil, G., Del Carmen López-Armas, G., & De Jesús Navarro, J. (2025). Human-Machine Interaction: A Vision-Based Approach for Controlling a Robotic Hand Through Human Hand Movements. *Technologies*, 13(5), 169.
<https://doi.org/10.3390/technologies13050169>
- Liu, X., Chen, M., & Zhang, Y. (2023). Review on Servo Actuators for Robotic Hand Systems: Technical Aspects and Applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 157, 104199.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104199>
- Open Bionics. (2016). *Ada Hand—Open Bionics: Open-Source 3D Printed Robotic Hand*.
<https://openbionicslabs.com/blog/build-your-own-3d-printed-robotic-hand-in-under-an-hour>
- Papandreou, G., Zhu, T., Chen, L., Gidaris, S., Tompson, J., & Murphy, K. (2017). Pictorial Structures Revisited: People Detection and Articulated Pose Estimation. *arXiv preprint arXiv:1707.05988*.
<https://arxiv.org/abs/1707.05988>
- Phuong, L., & Cong, V. (2024). Control the robot arm through vision-based human hand tracking. *FME Transactions*, 52(1), 37–44.
<https://doi.org/10.5937/fme2401037P>
- Pu, M., Chong, C. Y., & Lim, M. K. (2023). Robustness Evaluation in Hand Pose Estimation Models using Metamorphic Testing. *arXiv preprint arXiv:2303.04566*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04566>
- Qi, J., Ma, L., Cui, Z., & Yu, Y. (2024). Computer vision-based hand gesture recognition for human-robot interaction: A review. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 1581–1606.
<https://doi.org/10.1007/s40747-023-01173-6>
- Wang, J., Sun, K., Cheng, T., Jiang, B., Deng, C., Zhao, Y., Liu, D., Mu, Y., Tan, M., Wang, X., Liu, W., & Xiao, B. (2020). Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition (HRNet). *TPAMI*.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.2986936>
- Wang, T., University of Leeds, Wan, Y., University of Leeds, Peers, C., University of Leeds, Sun, J., University of Leeds, Zhou, C., & University of Leeds. (2022). *Vision-based Gesture Tracking for Teleoperating Mobile Manipulators*. 52–53.
<https://doi.org/10.31256/Bj3Qo8Y>
- Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C.-L., & Grundmann, M. (2020). MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. *CVPR Workshop on Computer Vision*

for Augmented and Virtual Reality.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10214>

Detección y reconstrucción de líneas de acotamiento vial mediante técnicas de visión por computadora

Ayala García José Francisco^{*1}, Cerrano Valadés Miriam Guadalupe², Martínez Chávez María del Pilar², Gaytán Ponce Dulce María², Moreno Hernández Oscar Iván²

^{1,2} Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, Ingeniería en Sistemas Automotrices, Blvd. Cuitzeo de los Naranjos #401, Col. Cuitzeo de los Naranjos, CP. 36976, Abasolo, Guanajuato.

^{*} Autor de correspondencia: frank._.22@outlook.com, francisco.ag@abasolo.tecnm.mx

Resumen. Este trabajo presenta el diseño de un algoritmo desarrollado en Python para la detección y reconstrucción de líneas de acotamiento vial utilizando técnicas de visión por computadora. Su objetivo principal es contribuir a la seguridad vial mediante la identificación de los límites de carriles, ofreciendo una herramienta útil para aplicaciones de asistencia a la conducción.

El algoritmo comienza con la captura de videos mediante una cámara instalada en el interior del vehículo. A cada fotograma se le aplica un preprocesamiento para optimizar la detección, incluyendo la mejora de contraste mediante CLAHE y la conversión al espacio de color HSV, lo cual permite una mayor estabilidad frente a condiciones de iluminación variables como sombras, reflejos o baja visibilidad. Posteriormente, se emplean filtros de detección de bordes, específicamente Sobel y Canny, que permiten resaltar las líneas relevantes del carril; a continuación, la transformada de Hough identifica y selecciona los segmentos de más significativos, descartando información no útil del entorno.

Una aportación importante es la incorporación de una Región de Interés dinámica, que se ajusta según la geometría de los carriles detectados; este recurso facilita la reconstrucción visual, generando un área de análisis más coherente con la trayectoria del vehículo.

Los resultados confirman que el sistema es capaz de detectar y reconstruir de manera confiable los bordes de carriles en escenarios diversos, incluyendo carreteras rectas, curvas pronunciadas y entornos con obstrucciones parciales. En conclusión, la propuesta representa un avance significativo en la aplicación del procesamiento digital de imágenes para mejorar la seguridad vial.

Palabras clave. CLAHE, HSV, Sobel, Canny Transformada Hough.

I. INTRODUCCIÓN

La detección automática de carriles es un componente clave en los sistemas de asistencia a la conducción, ya que contribuye a reducir accidentes por salidas de vía. Aunque existen avances en visión por computadora aplicados a esta tarea, los algoritmos aún enfrentan limitaciones en condiciones reales de iluminación,

desgaste de marcas o presencia de obstáculos en el camino, es por eso que en este trabajo se propone un algoritmo que combina preprocesamiento de imagen, filtros de bordes y transformada de Hough, junto con una Región de Interés (ROI, por sus siglas en inglés *Region of Interest*) dinámica, para detectar y reconstruir líneas de acotamiento vial.

II. MÁRCO TEÓRICO.

El procesamiento digital de imágenes es un conjunto de técnicas y algoritmos orientados a la manipulación, análisis y mejora de imágenes digitales, con aplicaciones que abarcan desde el entretenimiento hasta la seguridad industrial y la conducción autónoma (Scatec, s. f.). En el ámbito vehicular, su uso resulta particularmente relevante para la detección de carriles, donde las marcas viales funcionan como referencias visuales esenciales para mantener la trayectoria del vehículo y asistir al conductor.

Uno de los elementos centrales en esta disciplina es la detección de bordes, entendida como la identificación de zonas con cambios o variaciones abruptas en la intensidad de los píxeles, lo que permite delimitar estructuras significativas dentro de una escena. Entre los métodos más destacados se encuentra el filtro Sobel, que estima gradientes en direcciones horizontales y verticales (Gonzalez & Woods, 2018), y el filtro Canny, ampliamente reconocido por su capacidad para producir bordes delgados y continuos mediante la combinación de suavizado gaussiano, cálculo de gradiente y umbrales adaptativos (Duque & Ospina, 2004).

Por su parte, la transformada de Hough constituye otra herramienta fundamental, ya que permite detectar líneas rectas a partir de los bordes previamente identificados. Su utilidad en visión por computadora se debe a la robustez con la que extrae patrones geométricos incluso en escenarios ruidosos (Duque & Ospina, 2004). No obstante, su efectividad puede verse reducida por interferencias como sombras, reflejos o desgaste de las marcas viales, lo que ha motivado la búsqueda de soluciones que integren preprocesamiento y filtrado adaptativo.

La selección del espacio de color es determinante para la segmentación de las señales viales. A diferencia del modelo RGB (por sus siglas en inglés *Red, Green, Blue*), que combina de manera directa los componentes rojo, verde y azul, el espacio Hue Saturation Value (HSV, por sus siglas en inglés) permite separar la información de

color de la iluminación, lo que favorece la detección de tonos específicos como blanco y amarillo bajo diferentes condiciones lumínicas (Trost, s. f.).

Finalmente, la definición de una ROI acota el procesamiento únicamente al área de la carretera donde se espera encontrar las líneas de carril. En trabajos previos se ha empleado un ROI estática; sin embargo, este enfoque puede resultar insuficiente en escenarios dinámicos. En este sentido, la implementación de una ROI dinámica representa un avance relevante, ya que ajusta el área de análisis en función de la geometría detectada del carril, reduciendo posibles errores y mejorando la estabilidad del sistema (Abdia, Abdallah & Meddeb, 2015).

En conjunto, estas técnicas conforman la base teórica sobre la cual se sustenta el desarrollo de este proyecto, integrando filtrado, segmentación y transformaciones geométricas con el propósito de lograr un sistema robusto y adaptable a condiciones reales de conducción.

III. METODOLOGIA.

El desarrollo del algoritmo se llevó a cabo en varias etapas secuenciales, diseñadas para garantizar una detección robusta de líneas de acotamiento en condiciones de conducción reales.

a. Adquisición de datos.

Se recopilieron imágenes y secuencias de video mediante una cámara digital instalada en el parabrisas del vehículo. La captura se realizó en condiciones climáticas óptimas y con visibilidad clara, a fin de contar con material de referencia para el análisis. La cámara utilizada opera en el espectro visible y permite obtener información adecuada en formato digital (Argüello, 2023).

b. Preprocesamiento.

Los fotogramas fueron sometidos a técnicas de mejora visual antes del análisis. En primer lugar, se aplicó la Ecuación Adaptativa del Histograma por Contraste (CLAHE, por sus siglas en inglés) en el canal de luminancia, lo que permitió resaltar detalles en zonas de

baja visibilidad (Gonzalez & Woods, 2018). Posteriormente y como se muestra en la Fig. 1, se realizó la conversión al espacio de color HSV que facilita la segmentación de tonalidades características de las marcas viales, al separar la información de color de la iluminación (Trost, s. f.).



Fig. 1. Conversión de RGB a HSV.

c. Detección de bordes.

Se emplearon filtros de detección de bordes ampliamente utilizados en visión por computadora, tales como: Sobel, para estimar gradientes de intensidad en direcciones horizontal y vertical, y Canny, que refina la detección a través de umbrales adaptativos y supresión de no-máximos (Duque & Ospina, 2004; Gonzalez & Woods, 2018). Esta combinación permitió obtener contornos más definidos y reducir el impacto de ruido visual. En la Fig. 2 se aprecia la aplicación de los filtros mencionados anteriormente, incluso la combinación de dos de ellos trabajando en paralelo.



Fig. 2. Aplicación de filtros de detección de bordes.

d. Reconstrucción de líneas.

Los bordes detectados fueron procesados con la Transformada de Hough, técnica robusta para la identificación de líneas rectas en imágenes digitales (Duque & Ospina, 2004). A partir de las coordenadas obtenidas, las líneas se clasificaron en laterales izquierda y derecha en función de su pendiente, descartando aquellas con longitudes insuficientes o con orientación no coherente con la geometría del carril.

e. Región de interés dinámica (ROI).

Una de las aportaciones principales de este trabajo fue la implementación de una ROI dinámica, la cual se actualiza en tiempo real según la posición y ángulo de las líneas detectadas. A diferencia de un ROI estático, este enfoque incrementa la estabilidad del sistema y reduce detecciones erróneas en escenarios con curvas o elementos distractores (Abdia, Abdallah & Meddeb, 2015).

En conjunto, la metodología integra técnicas de preprocesamiento, filtrado, análisis geométrico y adaptación espacial, con el propósito de lograr un sistema capaz de operar en condiciones reales de conducción.

El diagrama de flujo presentado en la Fig. 3 resume las etapas principales del algoritmo diseñado para la detección y reconstrucción de carriles. El proceso inicia con la lectura del archivo de video, donde se verifica la correcta apertura y adquisición de los fotograma; una vez validado, se obtienen las dimensiones del video y se define una ROI inicial, que delimita el área a analizar.

En cada iteración, se analiza un nuevo fotograma y se aplican técnicas de preprocesamiento orientadas a mejorar la calidad de la imagen. Primero, se utiliza el método CLAHE para realzar el contraste local y compensar variaciones de iluminación. Después, el fotograma se convierte al espacio de color HSV, lo cual facilita la segmentación de los colores característicos de las líneas viales. Adicionalmente, se aplican filtros morfológicos y de suavizado, que ayudan a eliminar ruido e irregularidades.

Posteriormente, se lleva a cabo la detección de bordes utilizando los operadores de Sobel y Canny, con el objetivo de resaltar las estructuras lineales presentes en la carretera. Los bordes resultantes son procesados mediante la Transformada de Hough, que permite identificar los segmentos de línea candidatos a representar carriles. Estos segmentos se clasifican como líneas del lado izquierdo o derecho en función de su pendiente.

El algoritmo evalúa si se han detectado líneas válidas en ambos lados del carril, en caso afirmativo, se ajusta una ROI dinámica, que se adapta a la geometría de los carriles identificados. Si no se encuentran líneas completas, se mantiene la ROI previamente calculada, asegurando continuidad en la reconstrucción.

Finalmente, las líneas y la ROI se dibujan sobre el fotograma, que es mostrado en pantalla y almacenado en el video de salida. El ciclo continúa hasta que se alcanza el final del archivo o el usuario interrumpe la ejecución. De esta manera, el sistema logra un balance entre robustez y adaptabilidad, asegurando un desempeño estable en escenarios de conducción rectos, curvos o con obstrucciones parciales.

diurna, sobre carreteras con tramos rectos y curvas, con el fin de validar el algoritmo. En las siguientes figuras se presenta una serie de resultados obtenidos, las líneas en color verde corresponden a la detección y reconstrucción de líneas continuas situadas a la derecha, por su parte las líneas azules corresponden a líneas discontinuas sobre el lado izquierdo, de igual manera se presenta en un recuadro en color amarillo la ROI; esta área delimita la zona del fotograma donde el algoritmo concentra el análisis, reduciendo falsos positivos en regiones del entorno que no corresponden a la carretera (como cielo, vegetación o edificaciones). El hecho de que la ROI sea dinámica significa que se ajusta en tiempo real a la geometría de los carriles detectados, desplazándose o modificando su inclinación conforme cambia la trayectoria de la vía, lo que asegura estabilidad en la reconstrucción incluso en curvas o con obstrucciones parciales.

En la Fig. 4 se muestra un tramo recto de carretera bajo condiciones de luz natural intensa y con buena visibilidad del pavimento, el algoritmo identificó de manera satisfactoria ambos carriles. La combinación de filtros Sobel y Canny, junto con la transformada de Hough, permitió una reconstrucción precisa de las líneas de acotamiento vial.

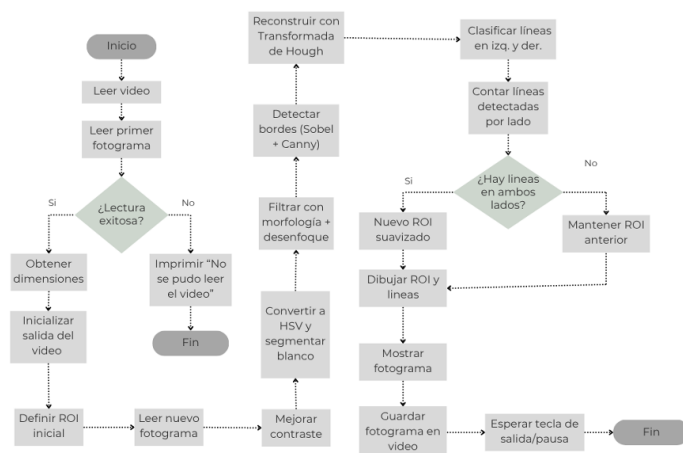


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo.

IV. RESULTADOS.

El algoritmo propuesto fue evaluado mediante la entrada de secuencias de video en distintos escenarios viales. Las pruebas se realizaron en condiciones de iluminación



Fig. 4. Trayectoria recta de carretera.

Sin embargo, existe presencia de falsos positivos como se observa en la Fig. 5 (a), es decir, líneas reconocidas fuera de la ROI; así mismo, existen zonas donde las marcas viales presentan desgaste o contrastan débilmente con el pavimento, ocasionadas por una

obstrucción parcial tal como lo es la sombra al transitar por debajo de un puente, esto evidencia la sensibilidad del sistema ante variaciones en la calidad de las líneas pintadas, como se muestra en la Fig. 5 (b).



Fig. 5 (a). Pendiente con salida curva. Fig. 5 (b) Salida lateral curva.

La Fig. 6 (a) ilustra el desempeño en una pendiente curva; en este caso, la implementación de la ROI dinámica fue esencial, ya que el área de análisis se ajustó de forma coherente a la geometría de la carretera. Aunque se observaron ligeras pérdidas en zonas donde las marcas viales estaban desgastadas y en el caso de la Fig. 6 (b) obstruidas por la sombra del camión, la trayectoria reconstruida se mantuvo estable, confirmando la capacidad del algoritmo para adaptarse a escenarios con mayor complejidad geométrica.

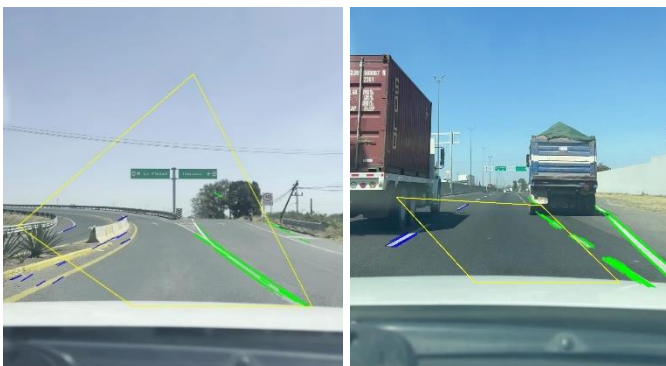


Fig. 6 (a). Pendiente con salida curva. Fig. 6 (b) Salida lateral curva.

V. CONCLUSIÓN

El trabajo presentado demostró la viabilidad de utilizar técnicas de visión por computadora para la detección y reconstrucción de líneas de acotamiento vial en tiempo real. La integración del preprocesamiento de imagen (CLAHE y conversión a HSV), junto con filtros de bordes

(Sobel y Canny) y la transformada de Hough, permitió obtener una buena detección de carriles en condiciones de iluminación diurna.

La principal aportación fue la implementación de una Región de Interés dinámica, capaz de adaptarse a la geometría de la carretera y mantener la continuidad de la reconstrucción en escenarios rectos, curvas y con obstrucciones parciales. Este enfoque incrementó la robustez del algoritmo frente a variaciones del entorno, reduciendo la posibilidad de obtener falsos positivos y garantizando estabilidad en la trayectoria detectada.

Si bien los resultados fueron satisfactorios, se identificaron limitaciones en escenarios con marcas viales muy desgastadas o con condiciones de iluminación adversas (reflejos intensos o sombras marcadas), donde se presentaron falsos positivos y pérdidas parciales en la detección.

En conclusión, el sistema desarrollado constituye un avance significativo en la aplicación del procesamiento digital de imágenes para la seguridad vial, aportando una base sólida para el desarrollo de sistemas de asistencia al conductor.

REFERENCIAS

- Abdia, L., Abdallah, F. B., & Meddeb, A. (2015). *In-Vehicle Augmented Reality Traffic Information System: A New Type of Communication Between Driver and Vehicle*. ScienceDirect.
- Argüello, F. (2023, junio 6). *Sensores de Imagen en la Cámara Digital*. Recuperado de <https://www.infotecnico.com/sensores-de-imagen-una-guia-esencial/>
- Duque, J. P. U., & Ospina, E. (2004). Implementación de la transformada de Hough para la detección de líneas para un sistema de visión de bajo nivel. *Scientia et Technica*, 1(24), 79–84.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- Scatec. (s. f.). ¿Qué es el procesamiento de imágenes? Recuperado de <https://www.scatec.es/que-es-el-procesamiento-de-imagenes>
- Trost, S. (s. f.). Modelo de color HSV. Recuperado de <https://es.sttmedia.com/modelo-de-color-hsv>

Estimación de propiedades fisicoquímicas en naranja (*Citrus × sinensis*) mediante modelado ANFIS y análisis de textura

Villaseñor-Aguilar Marcos Jesús^{*1}, Trejo Caballero Gerardo¹, López-Núñez Adolfo-Rafael², Guzmán Altamirano Ángel¹, Herrera-Hernández Maria-Jose¹

¹ TecNM/ ITs de Irapuato, División de Ing. Mecatrónica, Carr. Irapuato-Silao Km. 12.5, 36821 Irapuato, Gto.

² TecNM/ ITs de Irapuato, División de Ing. Electrónica, Carr. Irapuato-Silao Km. 12.5, 36821 Irapuato, Gto.

* Autor de correspondencia: marcos.va@irapuato.tecnm.mx

Resumen. Este trabajo presenta una metodología para la predicción de propiedades fisicoquímicas de naranjas “Navel”, orientada a estimar el índice de madurez, el contenido de grados Brix y la firmeza del fruto, mediante el uso de modelos de inferencia difusa adaptativa (ANFIS). Estos modelos matemáticos emplean como variables predictoras las componentes de color CIE-L*a*b* y características texturales individuales extraídas de la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (MCNG). Las imágenes utilizadas fueron adquiridas con una cámara comercial de bajo costo (Logitech C920), corregidas geométricamente y capturadas bajo condiciones controladas de iluminación y aislamiento. El conjunto de datos se dividió en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para validación. Se propusieron doce modelos ANFIS, cada uno evaluado mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). Los mejores resultados se obtuvieron en la predicción de madurez con el modelo basado en correlación ($R^2 = 0.883$, RMSE = 0.366), en grados Brix con homogeneidad ($R^2 = 0.831$, RMSE = 1.014), y en firmeza también con homogeneidad ($R^2 = 0.630$, RMSE = 0.779). Estos resultados demuestran la viabilidad de utilizar texturas individuales como entradas para sistemas de inferencia difusa, abriendo la posibilidad de aplicaciones prácticas en campo.

Palabras clave. Naranja, Madurez, Grados Brix, Firmeza, texturas, Anfis.

I. INTRODUCCIÓN

La industria agroalimentaria enfrenta una creciente necesidad de incorporar tecnologías avanzadas que optimicen los procesos de inspección y clasificación de frutas cítricas. México, como uno de los principales exportadores de naranja a nivel global —con más de 330 mil hectáreas cosechadas y una producción anual que supera los 4.5 millones de toneladas— se encuentra en una posición estratégica para implementar soluciones

tecnológicas que mejoren la eficiencia y calidad de sus productos (Secretaría de Agricultura, 2017).

La naranja destaca por su alto valor nutricional, al contener compuestos bioactivos como flavonoides, vitamina C, carotenoides, azúcares y fenoles, además de su versatilidad en aplicaciones industriales como jugos, mermeladas, aceites esenciales y concentrados. Sin embargo, los pequeños productores enfrentan limitaciones en el acceso a tecnologías especializadas y personal capacitado, lo que dificulta la adopción de

sistemas automatizados (Yang et al., 2017, Kowalska et al., 2023).

En este contexto, la Inteligencia Artificial (IA) y la Visión Computacional (VC) han demostrado ser herramientas eficaces para reducir estas barreras. La IA permite modelar procesos de razonamiento mediante algoritmos matemáticos, mientras que la VC simula la percepción visual humana a través del análisis de imágenes digitales. La integración de ambas disciplinas ha sido aplicada exitosamente en tareas como la detección de frutos, la estimación de madurez y el monitoreo de plagas (Fashi et al., 2019, Villaseñor-Aguilar et al., 2019).

Tradicionalmente, la evaluación de calidad en cítricos se ha basado en análisis sensoriales realizados por expertos, considerando atributos como apariencia, aroma, textura y sabor. Este enfoque se complementa con análisis fisicoquímicos que permiten evaluar parámetros como acidez, contenido vitamínico, azúcares y firmeza, todos influenciados por factores climáticos y prácticas agrícolas (Ali et al., 2021; Valero & Serrano, 2010; Pereira et al., 2020).

Diversas investigaciones han contribuido al desarrollo de sistemas automatizados para la evaluación de calidad. Villares et al. (2024) analizaron el color y la firmeza de la naranja mediante instrumentos especializados, identificando relaciones significativas entre madurez y almacenamiento. Nuño Maganda et al. (2024) lograron una precisión superior al 93 % en imágenes y 99 % en video utilizando el modelo SSD MobileNetV3, demostrando su aplicabilidad en tiempo real. Villaseñor-Aguilar et al. (2024) propusieron una metodología híbrida basada en redes neuronales, lógica difusa y descriptores CIE-Lab*, obteniendo correlaciones superiores a 0.7 en variables como grados Brix y firmeza.

En estudios comparativos, Olaniyi y Khashman (2020) destacaron el uso de Support Vector Machine (SVM) para análisis de textura, alcanzando una tasa de reconocimiento del 100 % en tan solo 24 segundos, superando modelos como BPNN (98.8 %) y RBFN (96.25 %). Este rendimiento posiciona al SVM como una solución eficiente para aplicaciones industriales.

Además del color, el Índice de Color de Cítricos (ICC = $100 \times a/L \times b$) se ha consolidado como un indicador sensible a la pigmentación y madurez del fruto, aunque puede omitir patrones estructurales relevantes. En este sentido, la Matriz de Coocurrencia de Niveles de Gris (MCNG) ha ganado protagonismo como técnica para analizar la textura superficial. Esta herramienta permite extraer descriptores como contraste, energía, homogeneidad y correlación, reflejando variaciones microestructurales asociadas al estado de frescura o deterioro. Kumar et al. (2015) aplicaron esta técnica para clasificar cítricos a partir de imágenes de vista única, logrando distinguir entre frutos sanos y defectuosos mediante el cálculo de disimilitud frente a muestras estándar.

Para su implementación se utilizó la caja de herramientas de MATLAB 2020a. La aportación de este trabajo consiste en la generación de un modelo de predicción de propiedades organolépticas mediante la calibración geométrica, la coloración y la textura del epicarpio del fruto. Esta propuesta servirá como antecedente para reducir la subjetividad y minimizar los tiempos en los procesos de clasificación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Fig. 1 se presenta la metodología propuesta para el desarrollo del modelo ANFIS. Este trabajo se basa en la metodología planteada por Villaseñor-Aguilar et al. (2020). La estructura general del modelo de predicción de propiedades fisicoquímicas incluye las siguientes etapas: selección de las muestras, adquisición de imágenes, segmentación de las muestras, calibración geométrica de cámara, conversión de imágenes RGB al espacio de color CIE-L*a*b*, obtención de la región de interés (ROI) y cálculo de promedios de los píxeles CIE-L*a*b*, conversión de imágenes RGB a escala de grises, extracción de texturas mediante el método GLCM, generación del modelo ANFIS y validación del modelo.

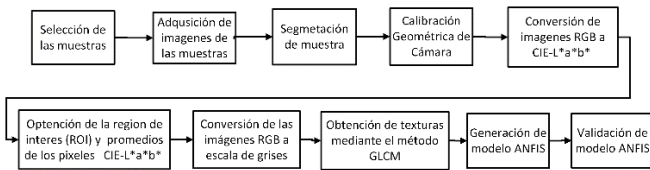


Fig. 1. Estructura general del sistema de predicción de propiedades fisicoquímicas.

Como parte del proceso experimental, se adquirieron 75 naranjas de la variedad “Navel” en un pequeño establecimiento del Mercado Hidalgo, ubicado en Irapuato, Guanajuato, México. Las muestras se caracterizan por presentar cuatro grados de madurez y tamaños uniformes, como se muestra en la Fig. 2. Cabe destacar que el análisis de sus propiedades fisicoquímicas se realizó posteriormente a la adquisición, bajo condiciones ambientales controladas y estables.



Fig. 2. Niveles de madurez empleados para la clasificación de las muestras.

La adquisición de imágenes se realizó con una cámara Logitech C920, capturando un total de 70 imágenes. Las muestras se colocaron a una distancia de 30 cm de la cámara; de estas imágenes, el 80 % se utilizó para entrenamiento y el 20 % restante para validación y pruebas. Las imágenes fueron almacenadas en formato JPG con una resolución de $480 \times 640 \times 3$ píxeles. Durante el proceso de captura, se empleó un subsistema de aislamiento compuesto por un chasis negro mate con dimensiones internas de $38 \text{ cm} \times 214 \text{ cm} \times 43 \text{ cm}$, con el

objetivo de eliminar las variaciones en la iluminación. Además, se utilizó un subsistema de iluminación consistente en un anillo LED circular de 30 cm de diámetro y 5.4 watts de potencia, con una intensidad aproximada de 200 lux. El procesamiento de las imágenes capturadas se llevó a cabo en una computadora portátil Acer Nitro AN515 (modelo: LAPTOP-5QVVUEQC), equipada con un procesador Intel Core i5-11400H, 16 GB de RAM y una GPU NVIDIA GeForce RTX 3050.

La calibración geométrica de la cámara se realizó empleando la herramienta “Calibrador de Cámara” de MATLAB. Para este proceso se utilizaron cinco imágenes de un patrón de tablero de ajedrez de 10×10 celdas, con un tamaño físico de celda de 10 mm, como se muestra en la Fig. 3. Se obtuvieron los parámetros intrínsecos, incluyendo las distancias focales [42.28, 42.35] y los coeficientes de distorsión radial $k_1 = 6.15 \times 10^{-5}$ y $k_2 = -3.04 \times 10^{-6}$.

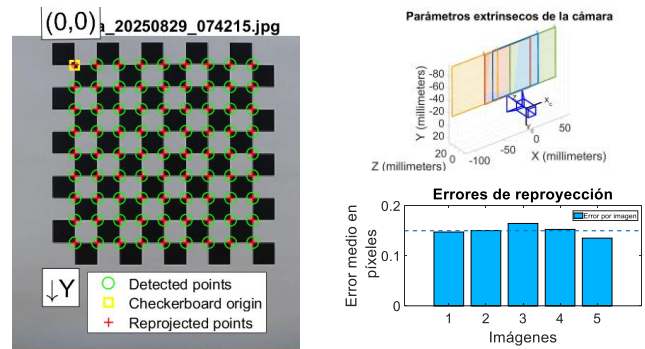


Fig. 3. Proceso de calibración geométrica de la cámara Logitech 920c con Matlab.

Una vez corregidas geométricamente las imágenes, se procedió a la segmentación de las muestras, como se muestra en la Fig. 4(a). A estas se les aplicó una máscara RGB utilizando un umbral de 10 a 255 para el canal rojo, y de 0 a 55 para los canales verde y azul, como se observa en la Fig. 4(b), con el objetivo de identificar los diferentes blobs presentes en cada muestra. Posteriormente, se aplicó un etiquetado de componentes con conectividad de 8 y se eliminaron las áreas menores a 20 000 píxeles, como se muestra en la Fig. 4(c).

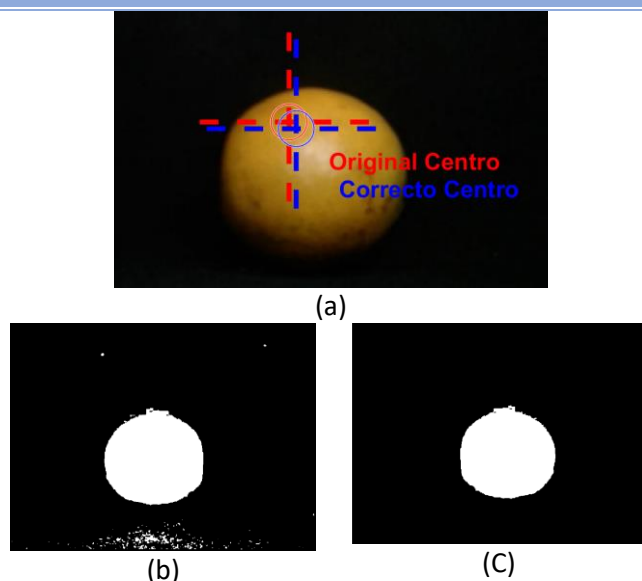


Fig. 4. Segmentación de muestras: (a) Imagen corregida mediante calibración geométrica; (b) detección de blobs mediante la aplicación de una máscara RGB; (c) extracción de la muestra tras la eliminación del ruido de fondo.

A continuación, se obtuvo el centroide de las muestras, como se muestra en la Fig. 5(a). A partir de este punto, se extrajo una región de interés (ROI) de 100×100 píxeles, como se muestra en la Fig. 5(b), y se realizó la conversión del espacio de color RGB a CIE-Lab*. De manera conjunta, se generó la imagen en escala de grises correspondiente a la ROI (100×100), como se muestra en la Fig. 5(c), y a partir de ella se calculó la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (MCNG) para obtener los parámetros de correlación, contraste, energía y homogeneidad. En la Tab. 1 se presentan los valores promedio de textura obtenidos de la MCNG para los cuatro niveles de madurez de las muestras de naranja.

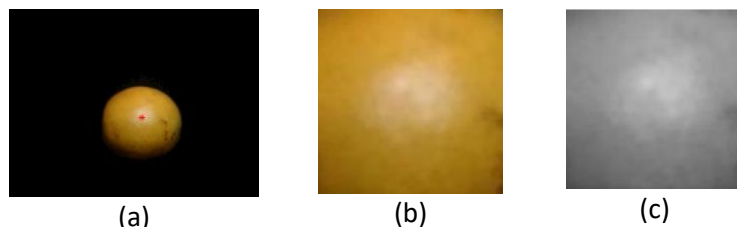


Fig. 6. Obtención de parámetros de la región de interés (ROI) de las muestras: (a) determinación del centroide de la muestra; (b) extracción de la región de interés ROI (100×100 píxeles); (c) conversión de la imagen a escala de grises.

Tab. 1. Valores promedio de textura para los cuatro niveles de madurez obtenidos a partir de la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (MCNG).

Textura por clase	1	2	3	4
Contraste	0.106	0.123	0.120	0.092
Correlación	0.944	0.941	0.922	0.940
Energía	0.254	0.235	0.247	0.263
Homogeneidad	0.949	0.263	0.941	0.954

En la Fig. 7 se muestra la arquitectura del sistema ANFIS propuesto para generar tres modelos destinados a predecir las variables de madurez, grados Brix y firmeza. La arquitectura propuesta utiliza como entradas las componentes L, a, b, junto con las características de textura derivadas de la MCNG: contraste, correlación, energía y homogeneidad. La primera capa corresponde a los nodos difusos, donde las variables lingüísticas se asocian mediante funciones de pertenencia de tipo combinación gaussiana. La segunda capa está conformada por un conjunto de 81 reglas difusas, generadas a partir de la combinación de las funciones de pertenencia de cada nodo, donde cada nodo representa una regla. La cuarta capa calcula la salida de cada regla utilizando funciones lineales o constantes. Finalmente, la quinta capa integra todas las salidas para generar la respuesta final del sistema, correspondiente al nivel de madurez, grados Brix y firmeza.

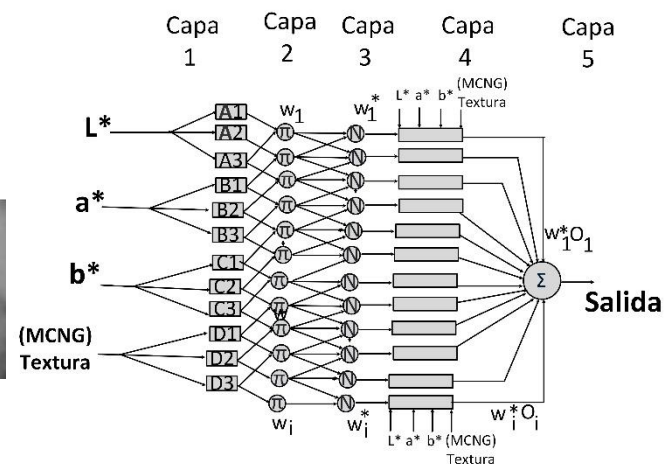


Fig. 7. Arquitectura propuesta del Sistema de Inferencia Neurodifusa Adaptativa (ANFIS) para predecir la madurez, los grados Brix y la firmeza.

El entrenamiento de los modelos se realizó utilizando la herramienta Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB. El conjunto de datos se dividió en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para validación. En la sección siguiente se presentan los resultados de los modelos propuestos .

III. RESULTADO

Las Fig. 8 al 13 en esta sección permiten visualizar el desempeño de los modelos ANFIS en la predicción de las propiedades fisicoquímicas de las naranjas Navel, en concordancia con los resultados numéricos presentados en la Tab. 2. La Fig. 8 muestra la predicción de madurez generada por los modelos ANFIS 1 al 4, cada uno basado en una textura individual (contraste, correlación, energía y homogeneidad). En esta figura, el eje x representa las muestras evaluadas, mientras que el eje y muestra los valores de madurez predichos por cada modelo. La Fig. 9 presenta la comparación de los errores cuadráticos medios (RMSE) correspondientes a los modelos ANFIS 1 al 4, destacando que el modelo basado en correlación obtuvo el mejor desempeño con un R^2 de 0.883 y un RMSE de 0.366.

Tab. 2. Resultados del entrenamiento de los modelos ANFIS para la predicción de madurez, grados Brix y firmeza, utilizando como entradas las componentes de color CIE-L*a*b* y las características texturales individuales.

ANFIS	Textura	Salida	R^2	RMSE
1	CON	Madurez	0.673	0.613
2	COR	Madurez	0.883	0.366
3	ENE	Madurez	0.800	0.480
4	HOM	Madurez	0.875	0.378
5	CON	Grados Brix	0.679	1.397
6	COR	Grados Brix	0.813	1.066
7	ENE	Grados Brix	0.668	1.420
8	HOM	Grados Brix	0.831	1.014
9	CON	Firmeza	0.432	0.965
10	COR	Firmeza	0.618	0.791
11	ENE	Firmeza	0.597	0.8128
12	HOM	Firmeza	0.630	0.779

Nota: CON = Contraste, COR = Correlación, ENE = Energía, HOM = Homogeneidad.

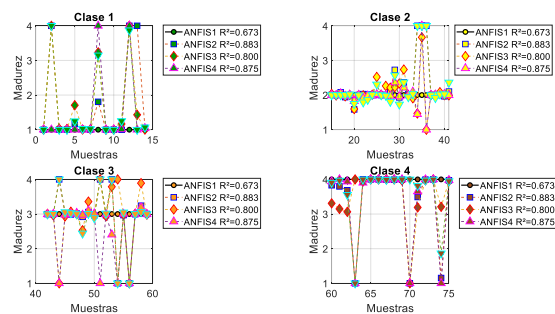


Fig. 8. Niveles de madurez predichos por los modelos ANFIS 1 a 4.

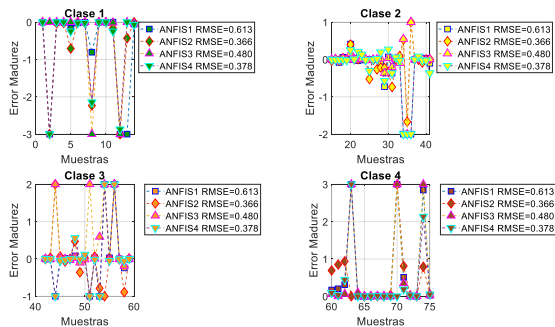


Fig. 9. Valores del error cuadrático medio (RMSE) correspondientes a las predicciones de madurez generadas por los modelos ANFIS 1 a 4.

De forma análoga, la Fig. 10 muestra la predicción de los grados Brix obtenida por los modelos ANFIS 5 al 8, mientras que la Fig. 11 compara sus respectivos valores de RMSE. En este caso, el modelo basado en homogeneidad presentó el mejor ajuste, con un R^2 de 0.831 y un RMSE de 1.014, lo que indica una alta capacidad de predicción para esta variable.

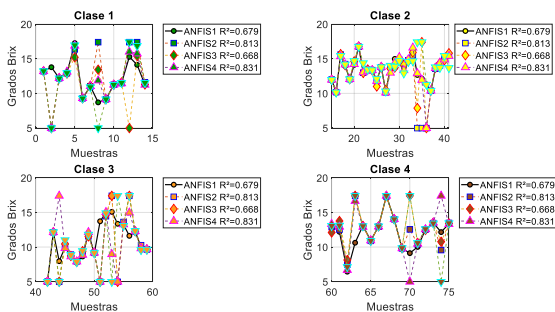


Fig. 10. Grados Brix predichos por los modelos ANFIS 5 a 8.

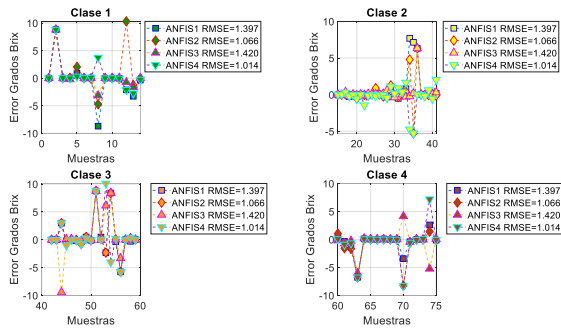


Fig. 11. Valores del error cuadrático medio (RMSE) correspondientes a las predicciones de grados Brix generadas por los modelos ANFIS 5 a 8.

Finalmente, la Fig. 12 presenta la predicción de firmeza realizada por los modelos ANFIS 9 al 12, y la Fig. 13 muestra la comparación de sus errores RMSE. Aunque la firmeza mostró menor correlación con las texturas analizadas, el modelo basado en homogeneidad nuevamente destacó con un R^2 de 0.630 y un RMSE de 0.779, siendo el más preciso dentro de este grupo.

Estas figuras permiten validar visualmente la capacidad predictiva de cada modelo ANFIS y refuerzan la utilidad de las características texturales extraídas de la región de interés (ROI) como variables de entrada para estimar propiedades internas del fruto. La Tab. 2 resume estos resultados, facilitando la comparación cuantitativa entre modelos y texturas.

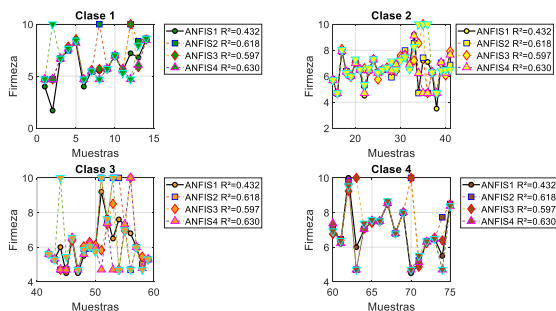


Fig. 12. Predicción de Firmeza de los modelos ANFIS 9 a 3.

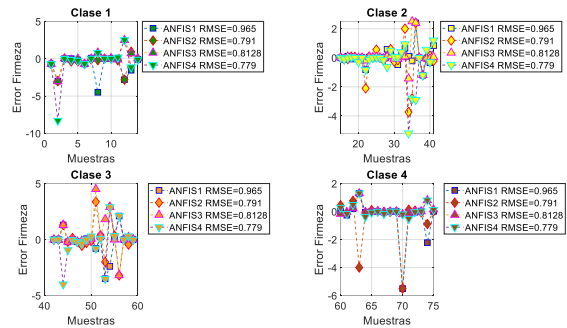


Fig. 13. Valores del error cuadrático medio (RMSE) correspondientes a las predicciones de Firmeza por los modelos ANFIS 9 a 13.

IV. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

La metodología propuesta demuestra que es posible predecir propiedades fisicoquímicas de naranjas Navel mediante el análisis de la coloración del epicarpio, la cual está estrechamente relacionada con los cambios internos que ocurren durante las distintas etapas de madurez. Estos cambios afectan directamente las propiedades organolépticas del fruto, como la dulzura y la firmeza, y pueden ser inferidos a través del procesamiento de imágenes RGB mediante técnicas de análisis de color y textura, utilizando modelos de inferencia difusa adaptativa (ANFIS).

Los modelos desarrollados emplearon como variables predictoras las componentes de color CIE-L*a*b* y características texturales individuales extraídas de la Matriz de Co-ocurrencia de Niveles de Gris (MCNG). De acuerdo con los resultados obtenidos, se logró una correlación estadística significativa en los modelos basados en correlación para madurez ($R^2 = 0.883$, RMSE = 0.366) y en homogeneidad para grados Brix ($R^2 = 0.831$, RMSE = 1.014) y firmeza ($R^2 = 0.630$, RMSE = 0.779), lo que evidencia la relevancia de estos descriptores en la caracterización visual del epicarpio.

La correlación refleja patrones estructurales en la superficie del fruto, vinculados con la organización celular y la distribución de pigmentos, mientras que la homogeneidad indica uniformidad visual, asociada a estados avanzados de madurez y consistencia superficial. Estas propiedades texturales permiten inferir

condiciones internas del fruto de forma no destructiva, abriendo posibilidades para aplicaciones prácticas en campo.

Como línea futura de investigación, se plantea extender el análisis hacia la superficie total del fruto, así como incorporar la medición de otras propiedades fisicoquímicas de interés nutricional y comercial, como la acidez, la vitamina C y la luteína, compuestos presentes en cítricos y relevantes para la industria alimentaria. Esta metodología servirá como base para el diseño de equipos portátiles de bajo costo, con aplicaciones in situ en procesos de cosecha, selección y comercialización, contribuyendo al desarrollo de tecnologías accesibles para la agricultura de precisión.

REFERENCIAS

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). Potencial de los cítricos en México: Parte I. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257073/Potencial-Citricos-parte-uno.pdf>
- Yang, C., Chen, H., Chen, H., Zhong, B., Luo, X., & Chun, J. (2017). Antioxidant and anticancer activities of essential oil from Gannan Navel orange peel. *Molecules*, 22(8), 1391. <https://doi.org/10.3390/molecules22081391>
- Kowalska, M., Konopska, J., Feszterová, M., Zbikowska, A., & Kowalska, B. (2023). Quality assessment of natural juices and consumer preferences in the range of citrus fruit juices. *Applied Sciences*, 13(1), 765. <https://doi.org/10.3390/app13010765>
- Fashi, M., Naderloo, L., & Javadikia, H. (2019). The relationship between the appearance of pomegranate fruit and color and size of arils based on image processing. *Postharvest Biology and Technology*, 154, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.04.010>
- Villaseñor-Aguilar, M. J., Botello-Álvarez, J. E., Pérez-Pinal, F. J., Cano-Lara, M., León-Galván, M. F., Bravo-Sánchez, M. G., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2019). Fuzzy classification of the maturity of the tomato using a vision system. *Journal of Sensors*, 2019, Article 3175848. <https://doi.org/10.1155/2019/3175848>
- Ali, M. M., Anwar, R., Yousef, A. F., Li, B., Luvisi, A., De Bellis, L., Aprile, A., & Chen, F. (2021). Influence of bagging on the development and quality of fruits. *Plants*, 10(2), 358. <https://doi.org/10.3390/plants10020358>
- Valero, D., & Serrano, M. (2010). *Postharvest biology and technology for preserving fruit quality*. CRC Press.
- Pereira, C., Martín, A., López-Corrales, M., Córdoba, M. d. G., Galván, A. I., & Serradilla, M. J. (2020). Evaluation of the physicochemical and sensory characteristics of different fig cultivars for the fresh fruit market. *Foods*, 9(5), 619. <https://doi.org/10.3390/foods9050619>
- Villares, J., Cobos, M., Vázquez, L., Sarmiento, R., Maita, F., Freire, C., Lascano, A., & Alvarado, J. (2024). Evaluación de parámetros de calidad de naranja (*Citrus × sinensis*) en tres estados de madurez. *Bionatura*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.21931/RB/2024.09.01.10>
- Nuño Maganda, A., Martínez, J., & López, R. (2024). Detección en tiempo real de frutas cítricas mediante SSD MobileNetV3 en imágenes y video. *Revista de Inteligencia Artificial Aplicada*, 6(2), 45–56.
- Villaseñor-Aguilar, M. J., Cano-Lara, M., Trejo-Caballero, G., Padilla-Medina, J. A., Barranco-Gutiérrez, A. I., & Manríquez-Padilla, C. G. (2024). Análisis del índice de color de los cítricos (ICC) para la clasificación de madurez utilizando redes neuronales artificiales y tratamiento de imágenes. *Repositorio Institucional TecNM*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/10621>
- Olaniyi, E. O., & Khashman, A. (2020). Análisis del índice de color de los cítricos (ICC) para la clasificación de madurez utilizando redes neuronales artificiales y tratamiento de imágenes. *Repositorio Institucional TecNM*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/10621>
- Olaniyi, E. O., & Khashman, A. (2020). Automatic system for grading banana using GLCM texture feature extraction and neural network arbitrations. *Journal of*

Food Process Engineering, 43(6), e12575.
<https://doi.org/10.1111/ifpe.12575>

Kumar, C., Chauhan, S., Alla, R. N., & Gurram, M. (2015). Classifications of citrus fruit using image processing - GLCM parameters. 2015 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP), 7322820.
<https://doi.org/10.1109/iccsp.2015.7322820>

Villaseñor-Aguilar, M. J., Bravo-Sánchez, M. G., Padilla-Medina, J. A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R. G., García-Rodríguez, F. J., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) by artificial vision system for quality control. Applied Sciences, 10(15), 5097.
<https://doi.org/10.3390/app10155097>

Más allá del modelo clásico: Dinámica glucosa-insulina con cálculo fraccionario

Lavín Delgado Jorge Enrique^{*1}, Urueta Hinojosa Daniel Edahi¹, Soto Mendiola Rosa Maria², Salgado Díaz Jorge Alfonso³

¹ Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Dirección de Ingeniería en Tecnologías de la Información e Innovación Digital, Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

² Universidad Autónoma del Estado de Guerrero, Facultad de Ciencias y Tecnologías de la Información, Acapulco de Juárez, Guerrero, México.

³ Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Dirección de Comercio Internacional y Aduanas, Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

*jlavin@upeg.edu.mx

Resumen. El modelado matemático de la interacción glucosa-insulina constituye una herramienta clave para comprender los mecanismos de regulación metabólica, aunque los enfoques clásicos basados en derivadas enteras resultan limitados al no considerar los efectos de memoria y no localidades presentes en los sistemas fisiológicos. El objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica glucosa-insulina mediante un modelo fraccionario que emplea la derivada de Caputo-Fabrizio, la cual se distingue por su núcleo exponencial no singular que permite representar de manera eficiente la memoria de corto y mediano plazo. Se formuló un sistema de ecuaciones diferenciales fraccionarias con parámetros fisiológicos validados en la literatura, y se resolvió numéricamente a través del método predictor-corrector de Adams–Bashforth–Moulton adaptado a este tipo de derivada. Los resultados evidenciaron que el modelo con Caputo-Fabrizio describe con mayor fidelidad la respuesta dinámica frente a perturbaciones como ingesta de glucosa o administración de insulina, al capturar fenómenos de retardo y adaptación más cercanos a la realidad biológica que los obtenidos con el modelo clásico. Además, se observó que el orden fraccionario influye de manera significativa en la estabilidad y en la amplitud de las oscilaciones de las concentraciones, ofreciendo un marco flexible para la simulación tanto de estados fisiológicos como de condiciones patológicas, incluida la diabetes mellitus. En conclusión, el uso de la derivada de Caputo-Fabrizio en el modelado glucosa-insulina amplía las capacidades predictivas del enfoque clásico, consolidándose como una alternativa robusta para el análisis y la propuesta de estrategias en el ámbito biomédico.

Palabras clave. *Dinámica glucosa-insulina, Derivada de Caputo-Fabrizio, Modelado fraccionario, Sistemas biológicos.*

I. INTRODUCCIÓN

La regulación de la glucosa en sangre es un proceso central para mantener el equilibrio metabólico y evitar complicaciones graves, como las asociadas con la

diabetes mellitus tipo 1 y tipo 2. Por décadas, modelos clásicos como el minimalista de Bergman han permitido describir la homeostasis glucémica y las respuestas fisiológicas frente a perturbaciones. Estas formulaciones, a menudo basadas en ecuaciones diferenciales

ordinarias de orden entero, han sido extensamente usados para simular ingestas de glucosa, respuestas posprandiales e impactos de diferentes tratamientos. Sin embargo, los modelos clásicos tienen limitaciones al capturar de manera fiel los efectos de memoria y persistencia metabólica inherentes a los sistemas fisiológicos. En respuesta, el cálculo fraccionario ha ganado interés, especialmente mediante derivadas de tipo Caputo y Riemann-Liouville, al mejorar la descripción de retardos y dinámicas complejas. En años recientes, la derivada de Caputo-Fabrizio, con núcleo exponencial no singular, ha emergido como una alternativa atractiva porque evita singularidades y representa de forma eficiente memorias de corto y mediano plazo. En (Uçar, 2020) fue introducida por primera vez el sistema fraccional de regulación glucosa-insulina utilizando la derivada de Caputo-Fabrizio. Se aportan soluciones especiales, el análisis de estabilidad y la unicidad de la solución mediante la teoría del punto fijo de Banach. Además, se presentan resultados numéricos que muestran la relación entre la glucosa, la insulina y las células beta bajo diferentes órdenes fraccionales. En (Alhazmi, 2024,) fue presentado un modelo matemático fraccional no lineal con cinética de células beta y retroalimentación glucosa-insulina para describir la dinámica de glucosa e insulina en plasma. Se analizan la existencia, unicidad, no negatividad y acotación de las soluciones, evaluando el modelo con tres operadores diferenciales fraccionales (Caputo, Caputo-Fabrizio y Atangana-Baleanu). Se implementa un método numérico de Euler eficiente para aproximar los sistemas de orden fraccional y se identifican comportamientos asintomáticos característicos que no aparecen en modelos de orden entero. Además, se estudian la estabilidad local, global y la estabilidad de Hyers-Ulam, complementadas con simulaciones numéricas bajo los tres enfoques. El estudio presentado en (R. Dubey, 2021) generaliza el modelo mínimo de Bergman para glucosa-insulina mediante la derivada fraccional de Caputo-Fabrizio, incorporando un nuevo componente dietético $D(t)$ esencial en la dinámica glucémica. El modelo modificado se resuelve utilizando la transformada de Sumudu y procedimientos de iteración por punto fijo. Además, se analiza la existencia y unicidad de las soluciones con el teorema del punto fijo, complementadas con representaciones numéricas y

gráficas. Se comparan los parámetros obtenidos con datos experimentales, y los resultados muestran que el modelo modificado ofrece un mejor ajuste que el modelo original de Bergman. En (Lekdee, 2019) fue desarrollado un modelo fraccionario con retardo de la interacción glucosa-insulina, formulado en el sentido de la derivada fraccionaria de Caputo con órdenes inconmensurables, a partir de la versión clásica de primer orden. En primer lugar, se establecen las propiedades de no negatividad y acotación de las soluciones, garantizando la viabilidad biológica del modelo. Posteriormente, se realiza un análisis de estabilidad y bifurcación, separando en partes reales e imaginarias la ecuación característica asociada e introduciendo el tiempo de retardo como parámetro de bifurcación. Se demuestra que la estabilidad asintótica del sistema y la aparición de una bifurcación de Hopf dependen tanto del retardo como de los órdenes fraccionarios. Además, se muestra que la génesis de la bifurcación está directamente relacionada con el valor de dichos órdenes, lo que aporta información relevante sobre los efectos de memoria y persistencia en la dinámica glucosa-insulina. Finalmente, se presentan simulaciones numéricas implementadas mediante el esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth-Moulton, que validan los resultados teóricos obtenidos y evidencian la capacidad del modelo para reproducir comportamientos dinámicos complejos observados en sistemas fisiológicos. En conjunto, estos estudios sustentan la motivación de este trabajo: aprovechar las ventajas de la derivada de Caputo-Fabrizio para representar con mayor fidelidad la dinámica glucosa-insulina en contextos fisiológicos y patológicos. El objetivo de este trabajo es desarrollar y analizar un modelo de dinámica glucosa-insulina basado en la derivada de Caputo-Fabrizio, evaluando su precisión frente al enfoque clásico. Se presentará la formulación matemática, el método numérico utilizado y los resultados de simulaciones bajo distintas perturbaciones fisiológicas. Finalmente, se discutirán las implicaciones clínicas y matemáticas, destacando el potencial de esta aproximación para orientar estrategias de diagnóstico y tratamiento en endocrinología.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

a. Modelo clásico glucosa-insulina.

El mantenimiento de la homeostasis de la glucosa en sangre depende de la interacción dinámica entre la secreción pancreática de insulina, la captación de glucosa por los tejidos periféricos y la producción hepática. Para comprender estos mecanismos, diversos modelos matemáticos han sido propuestos, entre los cuales el modelo minimal de Bergman constituye uno de los más utilizados debido a su simplicidad y capacidad para capturar los aspectos esenciales del metabolismo glucosa-insulina. Este modelo ha servido como punto de partida para numerosos estudios orientados a caracterizar tanto estados fisiológicos como patológicos, incluida la diabetes mellitus. En su formulación original, el modelo está basado en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que describen la evolución de tres variables principales: la concentración de glucosa en el plasma sanguíneo en mg/dl $G(t)$, la concentración de insulina en el plasma sanguíneo en $\mu\text{U/ml}$ $I(t)$ y la insulina intersticial en $1/\text{min}$ $X(t)$. El sistema puede expresarse como:

$$\frac{dG(t)}{dt} = -p_1[G(t) - G_b] - X(t)G(t) + D(t), \quad (1)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = -p_2X(t) + p_3[I(t) - I_b], \quad (2)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = -n[I(t) - I_b] + u(t), \quad (3)$$

donde G_b e I_b son los niveles basales de glucosa e insulina, respectivamente, n es la constante de tiempo para la desaparición de la insulina, p_1 , p_2 y p_3 son la tasa constante de captación de glucosa independiente de la insulina en los músculos y el hígado, la tasa de disminución de la capacidad de captación de glucosa tisular y el aumento dependiente de la insulina de la capacidad de captación de glucosa en el tejido por unidad de concentración de insulina por encima del nivel basal respectivamente. La entrada de control $u(t)$ en $\mu\text{U}/(\text{ml}/\text{min})$ indica la tasa de inyección de insulina y $D(t)$ muestra la glucosa extraída de las comidas, cuya medición es incierta, como una perturbación. El

parámetro $D(t)$ se define mediante la siguiente función exponencial.

$$D(t) = Ae^{-Bt}, \quad (4)$$

donde A y B son dos constantes positivas.

b. Derivada fraccionaria de Caputo-Fabrizio.

La derivada de orden $\alpha \in [0,1]$ de una función $f(t)$, según Caputo-Fabrizio, se define como:

$${}^{CF}D_t^\alpha [f(t)] = \frac{M(\alpha)}{1-\alpha} \int_0^t f'(\theta) e^{\frac{\alpha(t-\theta)}{1-\alpha}} d\theta, \quad (5)$$

donde $M(\alpha)$ es una función de normalización, usualmente seleccionada como $M(\alpha) = 1$. Esta derivada tiene núcleo exponencial no singular y captura memoria de corto/mediano plazo.

III. FORMULACIÓN DEL MODELO FRACCIONARIO

El modelado matemático de la interacción glucosa-insulina tiene como propósito capturar los mecanismos de regulación homeostática que permiten mantener la concentración de glucosa en sangre dentro de rangos fisiológicos. El modelo clásico propuesto por Bergman describe esta dinámica mediante un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, en el cual se representan tres compartimentos principales: glucosa plasmática, insulina plasmática y actividad insulínica remota. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes, ya que asume una respuesta instantánea del sistema y no considera los efectos de memoria o dependencia histórica que caracterizan a los procesos metabólicos. Para superar estas limitaciones, en este trabajo se propone una extensión fraccionaria del modelo clásico empleando la derivada de Caputo-Fabrizio, cuyo núcleo exponencial no singular permite representar de manera más realista los efectos de memoria de corto y mediano plazo en la regulación glucosa-insulina. A diferencia de la derivada de Caputo tradicional, que posee un núcleo con singularidad en el origen, la derivada CF evita problemas de divergencia e interpreta mejor fenómenos donde la influencia del pasado se atenúa de manera exponencial.

$${}^{CF}_0 D_t^\alpha [G(t)] = -p_1 [G(t) - G_b] - X(t)G(t) + \dots + D(t), \quad (6)$$

$${}^{CF}_0 D_t^\alpha [X(t)] = -p_2 X(t) + p_3 [I(t) - I_b], \quad (7)$$

$${}^{CF}_0 D_t^\alpha [I(t)] = -n [I(t) - I_b] + u(t), \quad (8)$$

Este modelo introduce un orden fraccionario α que controla el grado de memoria del sistema: valores cercanos a 1 reproducen la dinámica clásica, mientras que valores menores enfatizan los efectos de memoria y retardos fisiológicos. Esta formulación permite representar de forma más realista fenómenos como la respuesta tardía de los tejidos periféricos a la insulina y la adaptación dinámica frente a perturbaciones externas. En resumen, el modelo fraccionario basado en la derivada de Caputo-Fabrizio constituye un marco matemático flexible y robusto para analizar la homeostasis glucosa-insulina, proporcionando una generalización del modelo clásico y ofreciendo un mayor poder descriptivo de la dinámica metabólica en condiciones tanto fisiológicas como patológicas.

IV. MÉTODO NUMÉRICO

La resolución de sistemas con derivadas fraccionarias requiere métodos capaces de incorporar los efectos de memoria y no-localidad. En este trabajo se empleó el esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth-Moulton adaptado a la derivada de Caputo-Fabrizio. El procedimiento consta de una etapa predictora explícita y una etapa correctora implícita, que en conjunto garantizan estabilidad y precisión. En este contexto, para una ecuación diferencial fraccionaria de orden $\alpha \in [0,1]$ en la forma:

$${}^{CF}_0 D_t^\alpha [y(t)] = f(t, y(t)), \quad y(0) = y_0, \quad (9)$$

Etapa predictora:

$$y_p(t_{k+1}) = y_p(t_k) + h \sum_{j=0}^m b_j f(t_{k-j}, y(t_{k-j})), \quad (10)$$

Etapa correctora:

$$y_p(t_{k+1}) = y_p(t_k) + h \left[\sum_{j=0}^m a_j f(t_{k-j}, y(t_{k-j})) + \dots + f(t_{k+1}, y_p(t_{k+1})) \right], \quad (11)$$

donde los coeficientes a_j y b_j dependen del orden del método. El intervalo de integración se discretiza como:

$$t_k = kh, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

donde h es el paso de integración.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de evaluar el desempeño del modelo fraccionario propuesto, se realizaron simulaciones numéricas empleando el esquema predictor-corrector ABM adaptado a la derivada de Caputo-Fabrizio. Se consideraron parámetros fisiológicos validados en la literatura para individuos en condiciones normales y con resistencia a la insulina. El paso de integración se estableció en $h = 0.01$ y el intervalo de simulación fue de 0 a 300 minutos, cubriendo el rango típico de una curva de tolerancia a la glucosa. Para llevar a cabo las simulaciones numéricas del modelo fraccionario glucosa-insulina se utilizaron parámetros fisiológicos reportados en la literatura, los cuales se presentan en la Tabla 1. Estos valores corresponden a condiciones basales en sujetos sanos y han sido ampliamente empleados en estudios previos para validar la dinámica metabólica del sistema (R. Bergman, 1979).

Tab. 1. Parámetros fisiológicos utilizados en la simulación.

Parámetro	Valor	Unidades
p_1	0.025	min^{-1}
p_2	0.0003	min^{-1}
p_3	0.005	$\text{mU}^{-1} \cdot \text{ml} \cdot \text{min}^{-2}$
n	0.025	min^{-1}
G_b	90	mg/dl
I_b	10	$\mu\text{U/ml}$
	75	mg/dl
α	[0.85, 0.90]	-

a. Respuesta ante ingesta de glucosa.

La Fig. 1 muestra la evolución temporal de la glucosa plasmática posterior a una ingesta oral de glucosa (75 g). Se observa que el modelo fraccionario ($\alpha = 0.90$) reproduce con mayor realismo la fase de absorción rápida y el posterior descenso hacia valores basales, en comparación con el modelo clásico. El orden fraccionario modula la velocidad de estabilización, evidenciando un mejor ajuste a datos clínicos reportados.

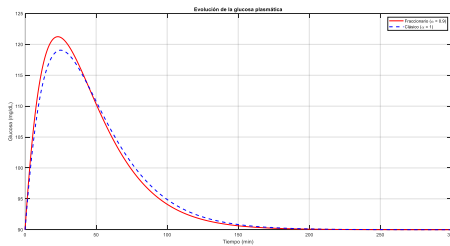


Fig. 1. Evolución de la glucosa plasmática en respuesta a una ingesta oral de glucosa.

b. Dinámica de la insulina.

La Fig. 2 ilustra la respuesta de la insulina sérica frente a la misma perturbación. El modelo fraccionario muestra oscilaciones más suaves y retardadas, coherentes con la cinética real de secreción pancreática. En contraste, el modelo clásico tiende a sobreestimar los picos iniciales y a subestimar la fase de adaptación.

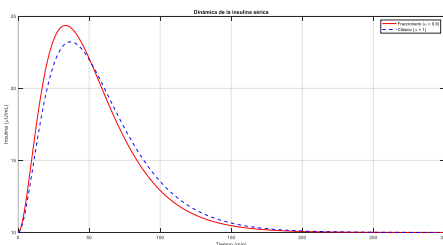


Fig. 2. Respuesta dinámica de la insulina sérica.

c. Influencia del orden fraccionario.

En la Fig. 3 se explora el efecto del orden fraccionario α . Valores próximos a 1 generan respuestas similares al modelo clásico, mientras que reducciones en $\alpha \in [0.85, 0.90]$ introducen retardos y oscilaciones

amortiguadas, lo que permite capturar fenómenos fisiológicos de memoria a corto y mediano plazo.

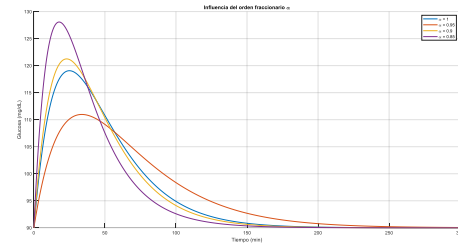


Fig. 3. Comparación de la dinámica glucosa-insulina para distintos valores de α .

d. Simulación de un estado patológico.

La Fig. 4 presenta la simulación bajo condiciones de resistencia a la insulina. El modelo fraccionario reproduce una hiperglucemia sostenida y una respuesta insulínica elevada, patrones característicos de la diabetes tipo 2. Este resultado respalda la capacidad del enfoque propuesto para representar tanto estados fisiológicos como patológicos.

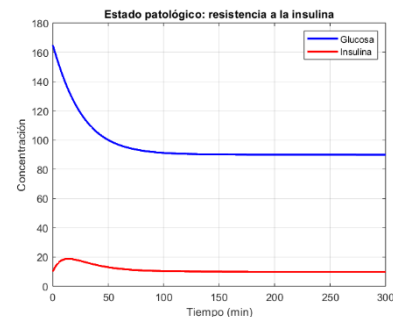


Fig. 4. Dinámica glucosa-insulina en un individuo con resistencia a la insulina.

VI. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra de manera concluyente que la incorporación del cálculo fraccionario, específicamente mediante la derivada de Caputo-Fabrizio, establece un marco matemático más flexible y robusto para el modelado de la dinámica glucosa-insulina. La superioridad descriptiva del modelo propuesto se fundamenta en un riguroso análisis de doble contraste.

Generalización del enfoque clásico. El modelo fraccionario supera las limitaciones inherentes del

enfoque de orden entero ($\alpha=1$), que funge como referencia fundamental. Se valida que el modelo clásico carece de la capacidad para incorporar los efectos de memoria y dependencia histórica esenciales en los procesos metabólicos, lo que resulta en la sobreestimación de los picos dinámicos y la subestimación de la adaptación fisiológica.

Fidelidad al comportamiento fisiológico realista. El mejor ajuste se basa en la capacidad del modelo fraccionario para reproducir perfiles dinámicos validados experimentalmente. Los resultados evidencian que el modelo fraccionario capta los fenómenos de retardo y oscilaciones amortiguadas coherentes con la cinética real de secreción pancreática y la respuesta tardía de los tejidos periféricos a la insulina.

En este contexto, el orden fraccionario se consolida como un parámetro crítico que modula de forma significativa la estabilidad del sistema y la amplitud de las oscilaciones. Se observó que valores intermedios de α reproducen con fidelidad los perfiles dinámicos, mientras que desviaciones extremas pueden simular comportamientos patológicos asociados a la diabetes mellitus. Finalmente, la implementación numérica a través del esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth-Moulton adaptado a la derivada de Caputo-Fabrizio demostró ser eficiente y estable, confirmando su idoneidad para la resolución de sistemas no locales.

En resumen, el modelo fraccionario amplía las capacidades predictivas del marco clásico, constituyendo una herramienta poderosa para la caracterización de la homeostasis glucémica y el diseño de estrategias terapéuticas personalizadas en el ámbito biomédico (S. Uçar, 2020).

VII. TRABAJO FUTURO.

El presente trabajo abre diversas líneas de investigación que pueden fortalecer y ampliar el análisis de la dinámica glucosa-insulina bajo un enfoque fraccionario. En primer lugar, se considera relevante explorar la incorporación de otras definiciones de derivadas fraccionarias no locales, como las de Atangana-Baleanu y Caputo-Hadamard, con el fin de comparar su desempeño frente a la derivada de Caputo-Fabrizio y evaluar su capacidad para capturar distintos tipos de memoria biológica. En segundo lugar, resulta necesario validar experimentalmente los resultados obtenidos, (R. Dubey,

2021) contrastando las simulaciones con datos clínicos de pacientes sanos y con diagnóstico de diabetes mellitus, lo que permitirá estimar de manera más realista los parámetros del modelo y establecer intervalos fisiológicamente coherentes para el orden fraccionario. Otro aspecto a considerar es la extensión del modelo hacia sistemas multihormonales que incluyan la interacción de glucagón, incretinas y cortisol, ampliando así la descripción de la regulación metabólica. Finalmente, se plantea como línea de trabajo el diseño de algoritmos de control óptimo fraccionario orientados a la administración personalizada de insulina en sistemas de páncreas artificial, lo cual representa un puente directo entre el modelado matemático y la práctica clínica.

REFERENCIAS

- Alhazmi, M. (2024,). Comparing the Numerical Solution of Fractional Glucose–Insulin Systems Using Generalized Euler Method in Sense of Caputo, Caputo–Fabrizio and Atangana–Baleanu. *Symmetry*, 1--15. doi: <https://doi.org/10.3390/sym16070919>
- Lekdee, N. S. (2019). Bifurcations in a delayed fractional model of glucose–insulin interaction with incommensurate orders. *Advances in Difference Equations*, 2019(318), 1-22. doi:Solution of Modified Bergman Minimal Blood Glucose-Insulin Model Using Caputo-Fabrizio Fractional Derivative
- R. Bergman, Y. I. (1979). Quantitative estimation of insulin sensitivity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 236(6), 667-677. doi:<https://doi.org/10.1152/ajpendo.1979.236.6.E667>
- R. Dubey, D. B. (2021). Solution of Modified Bergman Minimal Blood Glucose-Insulin Model Using Caputo-Fabrizio Fractional Derivative. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 128(3), 1247-1263.

doi:<https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.01522>

4

- S. Uçar, N. Ö. (2020). Novel analysis of the fractional glucose–insulin regulatory system with non-singular kernel derivative. *The European Physical Journal Plus*, 135(414), 1-18.
doi:<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00420-w>
- Uçar, S. Ö. (2020). Novel analysis of the fractional glucose–insulin regulatory system with non-singular kernel derivative. *The European Physical Journal Plus*, E667–E677.
doi:<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00420-w>

Órtesis de Rodilla con Rigidez Ajustable Mediante Freno de Disco por Fricción

Sánchez-Angeles Alexis^{*1}, Núñez-Altamirano Diego Alfredo², Capilla González Gustavo²

¹ Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Doctorado en Ingeniería Mecánica, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5. C.P. 36885. Salamanca, Gto. México

² Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de Ingeniería Mecánica, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5. C.P. 36885. Salamanca, Gto. México

* Autor de correspondencia: a.sanchezangeles@ugto.mx

Resumen. Se presenta una órtesis de rodilla con rigidez ajustable mediante freno por fricción y un marco para convertir sus parámetros en decisiones clínicas sin necesidad de instrumentación. El procedimiento integra un análisis estático que vincula el torque aplicado con la fuerza normal del freno; y la formulación dinámica que involucra los términos inerciales al aplicar un perfil cinemático de quinto grado. Los resultados muestran en general dependencia casi lineal entre el torque aplicado y la fuerza normal; y se visualizó que, para fases en movimiento, los picos de torque coinciden con aceleración elevada y fuerza normal alta. La evaluación estructural indica zona segura en el elemento de frenado, sin embargo, fue encontrada una condición crítica en la superficie que se utiliza para frenar, lo cual lleva a recomendar que se eviten combinaciones extremas y operar dentro del límite de diseño.

Palabras clave. Órtesis de rodilla, Freno por fricción, Rigidez ajustable, Manufactura aditiva.

I. INTRODUCCIÓN

En adultos mayores, la artrosis de rodilla (AR) representa una causa frecuente de dolor crónico y limitación funcional. A medida que la población envejece, el impacto de esta condición se vuelve aún más significativo. De acuerdo con el *Global Burden of Disease*, se informó que en 2020 había cerca de 595 millones de personas con algún tipo de artrosis, siendo la rodilla la localización más común. Además, se proyecta un aumento importante en las próximas décadas (GBD 2021 Osteoarthritis Collaborators, 2023). Un metaanálisis global estimó que cerca del 23 % de las personas mayores de 40 años padecen artrosis de rodilla, lo que en 2020 equivalía a unos 654 millones de casos (Cui et al., 2020). Esta cifra, más allá de la magnitud, manifiesta el impacto en la funcionalidad de las personas, pues según la OMS, la enfermedad compromete de forma significativa la calidad de vida y la autonomía de quienes la padecen ya que actualmente no se dispone de un

tratamiento capaz de modificar su curso evolutivo (World Health Organization, 2023).

Dentro del manejo no quirúrgico, las guías clínicas coinciden en recomendar educación, ejercicio y control del peso como pilares fundamentales, aunque algunas incluyen dispositivos de soporte como complemento (Bannuru et al., 2019; Overton et al., 2022). Sin embargo, existen discrepancias entre guías respecto al tipo de órtesis recomendadas, con variaciones en la preferencia por modelos de descarga en varo/valgo, soportes tibiofemorales o patelofemorales. Esta falta de consenso se atribuye a la calidad desigual de los estudios disponibles y a problemas de tolerancia y adherencia, lo que dificulta la elección individualizada en contextos donde se busca evitar la cirugía.

En este contexto, los hallazgos de la presente investigación permiten identificar el papel de estos dispositivos. Se ha observado que los efectos de

rodilleras u ortesis plantares sobre dolor y función son básicos y, en muchos casos, inciertos a mediano plazo. Así mismo, la evidencia disponible suele ser baja o moderada, y los problemas de uso se relacionan sobre todo con comodidad y ajuste (Duivenvoorden et al., 2015). Esto no significa que los dispositivos carezcan de utilidad. Más bien indica que conviene ajustar la indicación, el diseño y la personalización para aprovechar su potencial en los pacientes adecuados.

En ese sentido, la manufactura aditiva representa una vía prometedora para responder a estas necesidades, puesto que, mediante el uso de impresión 3D es posible crear ortesis personalizadas, acortar tiempos de diseño y ajuste, y explorar geometrías complejas con menos peso. Aun así, persisten retos importantes: estandarización, control de calidad y validación clínica (Choo & Choi, 2020).

Sin embargo, más allá del diseño y la fabricación, la falta de herramientas claras para traducir parámetros mecánicos del dispositivo es una brecha significativa en reglas de prescripción clínicas que sean sencillas y reproducibles.

En este contexto, el presente artículo busca articular esa conexión al proponer un enfoque para vincular los parámetros mecánicos de una órtesis de rodilla con freno ajustable con criterios operativos de ajuste clínico, facilitando una adopción informada por la biomecánica y orientada a la seguridad del usuario.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Descripción del dispositivo y criterios de diseño

Se diseñó y construyó una órtesis de rodilla de rigidez ajustable mediante freno mecánico por fricción para controlar la flexo-extensión en un arco aproximado de 0°–140°. Durante la fase conceptual se compararon cinemáticas (cuatro barras, biela-manivela) y se eligió una revoluta simple con freno por su baja complejidad y facilidad de ajuste clínico.

El dispositivo se organiza en tres subensambles, el mecanismo principal, articulación auxiliar para acomodo geométrico y moldes personalizados. El freno modula la

rigidez efectiva y permite bloquear la posición angular del ensamble durante ejercicios de rehabilitación.



Fig. 1. Diseño de la órtesis de rodilla (Sánchez-Angeles, 2025).

b. Principio de frenado y variable de control

El freno opera por fricción en un disco de radios interno r y externo R . La fuerza normal F_N se aplica mediante un tornillo ajustador y resortes, actuando como variable de control (regulada por el clínico) que comprime el conjunto de frenado. Con una fricción cinética μ_k y la suposición de distribución uniforme, el torque de fricción se expresa como:

$$\tau_f = \frac{1}{2} \mu_k F_N (R + r) \quad (1)$$

c. Modelo estático

Para estimar el torque aplicado τ_{apl} requerido para romper el equilibrio en un ángulo de flexión θ , se consideró el diagrama de cuerpo libre (ver Fig. 2) con las contribuciones de: (a) fricción del freno τ_f , (b) peso de la órtesis $\vec{W}_o$ con brazo $\vec{r}_o$, (c) peso de la pierna $\vec{W}_p$ con brazo $\vec{r}_p$, y (d) $\vec{r}_{apl}$.

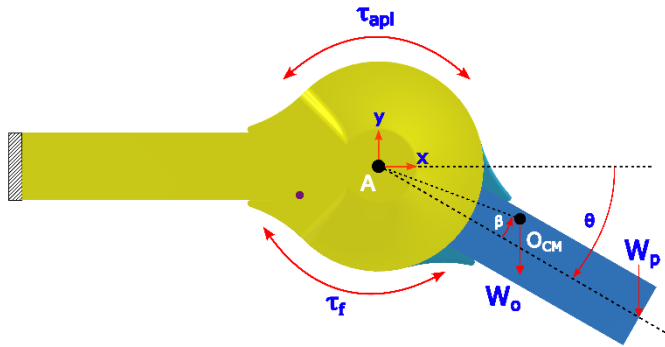


Fig. 2. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo (Sánchez-Ángeles, 2025).

El equilibrio rotacional alrededor del punto A se formuló como:

$$\sum \vec{M}_A = \vec{\tau}_f + \vec{\tau}_{apl} + \vec{r}_o \times \vec{W}_o + \vec{r}_p \times \vec{W}_p = 0 \quad (2)$$

y se despejó τ_{apl} en función de F_N , geometría (R, r, L_o, L_p, β) y θ .

d. Modelo dinámico

Para describir el comportamiento en movimiento, se reformuló la ecuación de momentos incorporando inercia rotacional I_{zz} y efecto traslacional mL^2 asociado al centro de masa, de modo que:

$$\sum M_A = \vec{\tau}_f + \vec{\tau}_{apl} + \vec{r}_o \times \vec{W}_o + \vec{r}_p \times \vec{W}_p = I_{zz} \ddot{\theta} + mL^2 \ddot{\theta} \quad (3)$$

e. Perfil de movimiento para la simulación

Las simulaciones dinámicas emplearon un perfil polinómico de quinto grado que garantiza condiciones de reposo al inicio y al final (posición, velocidad y aceleración nulas). Este perfil se define para un intervalo angular θ : $\theta_0 \rightarrow \theta_f$ en un tiempo T , y de él se derivan $\dot{\theta}(t)$ y $\ddot{\theta}(t)$, los cuales son usados para el término inercial. Las ecuaciones generales y condiciones de contorno se muestran en extenso en el capítulo 4 de la tesis de Sánchez-Ángeles (2024).

f. Materiales, fabricación y ensamblaje del prototipo

El prototipo se concibió mediante uso escaneo 3D para la precisión anatómica y fabricación aditiva de componentes estructurales, particularmente ABS. El método de ensamblaje prioriza ajustes rápidos por parte del fisioterapeuta (ensamble/desensamble sencillo) y verificación dimensional posterior.

g. Supuestos de modelado y control de variables

- Fricción μ_k constante en el rango operativo; torque medio usando $\frac{1}{2}(R + r)$.
- Fuerza normal F_N como entrada (ajustada por tornillo y resortes), con lectura directa para la “perilla” de rigidez.
- Alineación equivalente de un eje en la articulación ortésica para la lectura clínica (el detalle policéntrico de la rodilla se trata como aproximación a un eje).

h. Análisis de elemento finito

Se efectuó un análisis estático lineal en Autodesk Fusion 360® para estimar las tensiones equivalentes de von Mises y el factor de seguridad (FS) de los componentes. El material se modeló como ABS con comportamiento elástico lineal isotrópico, empleando propiedades medidas experimentalmente: módulo de Young $E = 1.24 \text{ GPa}$, límite de fluencia $\sigma_y = 19.21 \text{ MPa}$ y resistencia última $\sigma_u = 21.04 \text{ MPa}$ (Sánchez-Ángeles, 2024).

III. RESULTADOS

a. Relación estática entre torque aplicado y fuerza normal

La evaluación del equilibrio de momentos mostró una dependencia casi lineal entre el torque aplicado τ_{apl} y la fuerza normal F_N del freno; además, la pendiente aumenta con el ángulo de flexión θ . En términos operativos, a mayor θ se requiere un F_N más alto para sostener o inmovilizar, mientras que F_N menor favorece el inicio de movimiento. Esta tendencia se aprecia en la familia de curvas $\tau_{apl}(F_N | \theta)$ y en el cruce con $\tau = 0$ que define el umbral bloqueo–movimiento en cada θ .

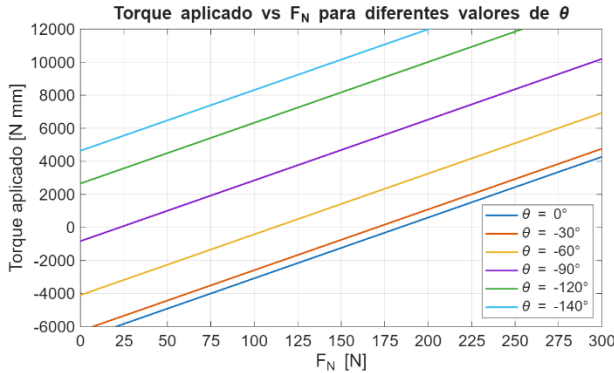


Fig. 3. Curvas $\tau_{apl}-F_N$.

b. Respuesta dinámica de torque con perfil suave (quinto grado)

Al incorporar los términos inerciales $(I_{zz} + mL^2)\ddot{\theta}(t)$ en la ecuación de momentos y emplear un perfil polinómico de 5° grado (reposo en los extremos), el torque aplicado crece con la aceleración angular $\ddot{\theta}$ y con F_N . El perfil fue seleccionado por su suavidad y para evitar cambios bruscos de aceleración durante la rehabilitación.

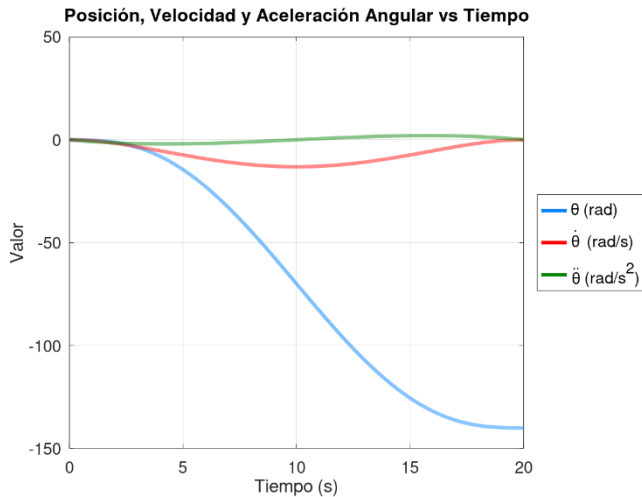


Fig. 4. Trayectorias $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ de un ciclo (5° grado).

c. Superficie de respuesta y límites de diseño

La superficie de respuesta $\tau_{apl}(t, F_N)$ evidencia una tendencia casi lineal entre torque y F_N a lo largo del tiempo, y un comportamiento no lineal entre torque y

tiempo atribuido a los efectos inerciales del perfil. En el artículo se reporta un máximo cercano a 15 000 N·mm, por encima del límite de diseño de 12 000 N·mm definido en el análisis estructural (FEA), señalando combinaciones extremas a evitar (alto F_N + alta $\ddot{\theta}$).

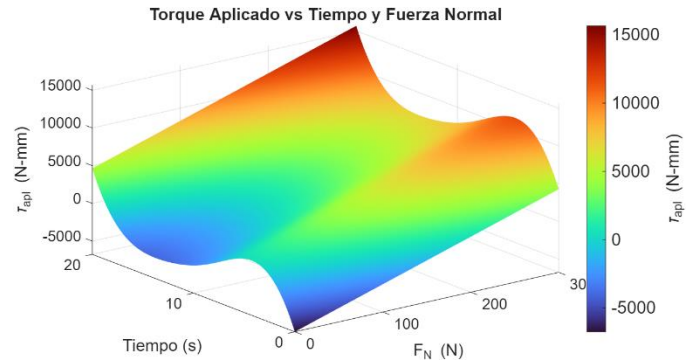


Fig. 5. Superficie de respuesta del torque.

d. Observaciones de manufactura vinculadas al desempeño

El análisis por elementos finitos indica margen amplio en el anillo de freno ($FS \approx 8.08$), condición crítica en el disco de la tibia ($FS \approx 0.996$) bajo el caso límite asociado a 12 000 N·mm y seguridad adecuada en el disco del fémur ($FS \approx 2.23$). Estas observaciones son consistentes con la superficie dinámica y orientan a no operar en la región de picos. La discusión completa de localización de máximos y mínimos y sus implicaciones de diseño se encuentra desarrollada en Sánchez-Ángeles (2024).

IV. DISCUSIÓN

Los hallazgos estáticos y dinámicos permiten traducir el modelo mecánico en decisiones clínicas reproducibles. La relación casi lineal entre τ_{apl} y F_N , con pendientes crecientes al aumentar θ , legitima usar F_N como perilla de rigidez que desplaza el umbral bloqueo-movimiento por ángulo; esto hace “legible” la órtesis para fisioterapeutas y técnicos sin instrumentación adicional. En movimiento, la no linealidad temporal de $\tau_{apl}(t)$ se explica por los términos inerciales del perfil de 5° grado: los picos aparecen cuando coinciden $\ddot{\theta}$ elevada y F_N alto; de ahí que el tiempo de ejecución T sea un regulador práctico de aceleraciones y, por tanto, de esfuerzo.

Desde la óptica estructural, los resultados de FEA orientan una zona operativa segura: el anillo de freno conserva amplio margen, mientras que el disco tibial se acerca al límite bajo el caso crítico; por ello conviene evitar combinaciones de F_N alto + $\ddot{\theta}$ alta y priorizar transiciones graduales.

a. Guía operativa de ajuste

1. Definir objetivo y ángulo (θ): “movimiento asistido” vs. “sostén/bloqueo”. Usar la familia de curvas $\tau_{apl} - F_N$ por θ para ubicar el umbral $\tau=0$ del ángulo elegido.
2. Ajustar F_N al lado deseado del umbral (bajo para paso, alto para sostén). Calibrar F_N con la compresión del resorte (ley de Hooke) para obtener ajustes repetibles entre sesiones.
3. Elegir el tiempo T del movimiento (si aplica): aumentar T reduce $\ddot{\theta}$ y atenúa picos de $\tau_{apl}(t)$; mantener T más corto exige revisar F_N a la baja.
4. Evitar combinaciones extremas (alto F_N + alta $\ddot{\theta}$): segmentar rangos (p. ej., $0^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 60^\circ$) o reducir F_N en tránsito y recuperarlo en reposo. Operar dentro de la zona segura marcada por el límite de diseño del torque.

b. Alcances y limitaciones

La lectura clínica propuesta asume μ_k constante en el rango operativo y un eje único equivalente para la articulación (la rodilla es policéntrica), además de separar el umbral cuasiestático del régimen dinámico; estas simplificaciones favorecen la interpretabilidad, pero no capturan toda la variabilidad entre el dispositivo y usuario ni la dependencia de materiales o condiciones de contacto.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo organiza un planteamiento mecánico de órtesis de rodilla con freno por fricción en un marco operativo apto para su adopción clínica. La contribución central no reside en nuevas derivaciones, sino en

estructurar la toma de decisiones de ajuste a partir de parámetros explícitos, con énfasis en que esto sea reproducible y seguro.

La formalización del ajuste en parámetros observables y documentables permite estandarizar la configuración entre operadores y sesiones, disminuir ambigüedades en la prescripción y facilitar evaluaciones. Este enfoque es coherente con escenarios de rehabilitación con recursos acotados, al no requerir instrumentación adicional para su implementación.

Para el uso de este dispositivo se sugiere: (i) elaborar un protocolo local de 1–2 páginas que defina roles, verificación previa y criterios de suspensión; (ii) establecer una curva de calibración del freno (relación vueltas–compresión–fuerza normal) obtenida en banco simple y con tolerancias definidas; y (iii) utilizar un formato de registro breve por sesión que documente objetivo terapéutico, configuración aplicada y observaciones de tolerancia/adherencia.

REFERENCIAS

- Bannuru, R. R., Osani, M. C., Vaysbrot, E. E., Arden, N. K., Bennell, K., Bierma-Zeinstra, S. M., ... McAlindon, T. E. (2019). OARS guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis. *Osteoarthritis and Cartilage*, 27(11), 1578–1589. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2019.06.011>
- Choo, T.-G., & Choi, S.-B. (2020). Review of 3D printing technology and its applications in orthopedics. *Annals of Palliative Medicine*, 9(6), 4036–4045. <https://doi.org/10.21037/apm-20-791>
- Cui, A., Li, H., Wang, D., Zhong, J., Chen, Y., & Lu, H. (2020). Global, regional prevalence, incidence and risk factors of knee osteoarthritis in population-based studies. *eClinicalMedicine*, 29, 100587. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2020.100587>
- Duivenvoorden, T., Brouwer, R. W., van Raaij, T. M., Jakma, T. S., Verhagen, A. P., Verhaar, J. A. N., & Bierma-Zeinstra, S. M. A. (2015). Braces and orthoses for treating osteoarthritis of the knee.

Cochrane Database of Systematic Reviews, 3, CD004020.

<https://doi.org/10.1002/14651858.CD004020.pub3>

- GBD 2021 Osteoarthritis Collaborators. (2023). Global, regional, and national burden of osteoarthritis, 1990–2020 and projections to 2050: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Rheumatology*, 5(9), e508–e522. [https://doi.org/10.1016/S2665-9913\(23\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S2665-9913(23)00163-7)
- Overton, C., Neogi, T., Niu, J., et al. (2022). Osteoarthritis treatment guidelines from six professional societies: Similarities and differences. *Current Rheumatology Reports*, 24(8), 366–378. <https://doi.org/10.1007/s11926-022-01066-1>
- Sánchez-Angeles, A. (2024). *Design and prototyping of an active lower limb orthosis* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de Guanajuato.
- Sánchez-Angeles, A., Capilla-González, G., & Núñez-Altamirano, D. A. (2025). Design and prototyping of an active knee orthosis: A dynamic and mechanical study. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 39(6), 3547–3554. <https://doi.org/10.1007/s12206-025-0546-1>
- World Health Organization. (2023). *Osteoarthritis* (fact sheet). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/osteoarthritis>

Generación de Patrones Subacuáticos Producidos por Frecuencias Címáticas

Moreno Corona Irvin Elí^{*1}, Reyes Medina Perla Ximena¹, Martínez Jiménez Leonardo², Rostro González Horacio^{3,4}, Edgar Alvarado Méndez⁴, Cano Lara Miroslava^{*1}

¹ TecNM/ITS de Irapuato, Ing. Mecatrónica, Irapuato, Gto.

² Universidad de Guanajuato/DEM, DICIS, Ing. Electrónica, Yuriria, Gto.

³ Universitat Ramon Llull/Escuela de Ingeniería, Grupo de Investigación GEPI, Barcelona, España.

⁴ Universidad de Guanajuato/DICIS, Ing. Electrónica, Salamanca, Gto.

* Autor de correspondencia: LIS22110305@irapuato.tecnm.mx, miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

Resumen. El comportamiento natural de diversos fenómenos se rigen en las frecuencias de resonancia, las cuales, se pueden proyectar para observar cómo se visualizan de forma tangible. En este estudio se realizó la construcción de un sistema címático de frecuencias producidas propiamente en el fluido del agua. El sistema genera ondas sonoras de un altavoz y con frecuencias variables que, al transmitir las vibraciones hacia un contenedor que almacena agua, genera una diversidad de patrones característicos con formas simétricas únicas de patrones subacuáticos en un rango de frecuencias de 35 a 120Hz. Cada patrón se genera en condiciones específicas de frecuencia, volumen, amplitud y luz de tono morado y blanco donde, mediante una cámara, se captura su imagen y se clasifica según su frecuencia. En particular se presentan tres patrones característicos en duplas para observar si son proporcionales (35 & 70Hz, 40 & 80Hz y 60 & 120Hz) donde las frecuencias (70Hz, 80Hz y 120Hz) son inferencias teóricas para complementar a las frecuencias de estudio respecto a su procesamiento de imagen usando la transformación del espacio de color HSV, donde se logra identificar los colores principales del patrón subacuático. Así pues, se estudia la morfología del patrón (contorno de la forma y ondulaciones); se presentan crestas y valles en la imagen que son los elementos que le dan la forma única al patrón.

Palabras clave. Frecuencia, Címática, Patrones Subacuáticos, HSV.

I. INTRODUCCIÓN

La frecuencia ha sido un objeto de estudio entre muchos ámbitos de la rama del conocimiento, como lo es la ingeniería de materiales, civil y mecánica, así como en la medicina moderna. Sin embargo, al ser un fenómeno que está presente en la mayoría de los objetos y fenómenos físicos, dejamos de lado el potencial de esta misma en la aplicación a otros enfoques de estudio.

Los materiales, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos, responden a estímulos vibratorios de diferentes maneras

según su estructura molecular, densidad, elasticidad y forma. Uno de los conceptos fundamentales para entender esta interacción es el de la frecuencia natural de un material o sistema. Cada objeto tiene una o más frecuencias a las que tiende a oscilar cuando es perturbado; estas se conocen como frecuencias de resonancia (Arce M., 2011).

El agua tiene propiedades físicas que la hacen especialmente sensible a la vibración y a las frecuencias sonoras. Su alta capacidad de transmisión de ondas y su

densidad permiten observar fácilmente los efectos de la vibración sobre su superficie. Cuando ondas sonoras (o cualquier otra fuente de vibración) interactúan con una superficie de agua, se generan patrones que cambian con la frecuencia aplicada. Este estudio está basado en la llamada cimática, que es el estudio visual de cómo el sonido y las vibraciones afectan y estructuran la materia. (Journey of Curiosity, 2010).

Diversos autores han trabajado con estas ondas cimáticas y observado las diferentes condiciones que dan la característica única al patrón que se forma. Mediante la vibración vertical se obtienen ondas de Faraday donde se identifican diversas variables que afectan a la formación de estas como la frecuencia, amplitud, volumen del líquido, temperatura y presión atmosférica. El diámetro del recipiente son los determinantes más influyentes en la morfología de los patrones (Merlin and Rupert, 2017).

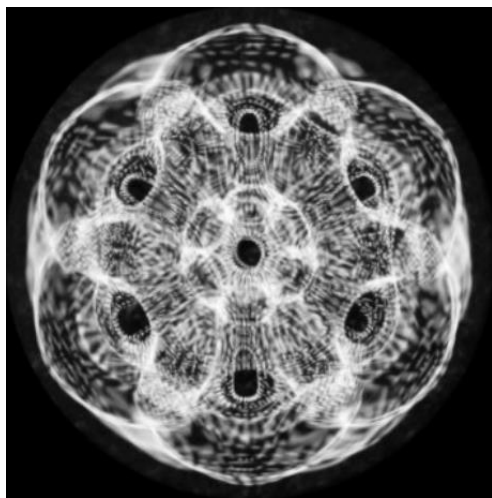


Fig. 1. Formación de un patrón de simetría séxtuple a una frecuencia de 56Hz (Merlin and Rupert, 2017).

La reproducción simulada de estos patrones tiene ciertas dificultades debido a la complejidad de los patrones que se observan. Los modelos matemáticos requieren un enfoque diferente para comprender completamente estos fenómenos, ya que los modelos matemáticos numéricos deben procesar infinita cantidad de valores para la recreación del patrón o la reducción de los efectos de la teoría del caos dentro de estas formaciones (Val Baker et al., 2023).

Sin embargo, la utilización de la cimática tiene potencial dentro de los métodos de comunicación óptica en espacio libre, donde ciertas frecuencias acústicas, mediante patrones de onda visibles en líquidos, pueden interactuar intensamente con partículas en suspensión como niebla o vapor de agua. Esta propiedad se aprovecha para despejar el camino de propagación de un rayo láser en sistemas FSO, los cuales suelen verse degradados por condiciones atmosféricas adversas (Cameron et al., 2024).

El análisis de estas vibraciones también puede aplicarse a otro tipo de fluidos, por ejemplo, de líquidos newtonianos bajo vibraciones controladas. La diversificación de técnicas como el uso de placas metálicas y bañeras vibrantes es esencial para la observación de cambios en la morfología de los patrones, desarrollando estructuras nodales únicas. (Lega L., 2015).

La segmentación es una técnica utilizada en el procesamiento de imágenes para separar ciertas regiones de, por lo general, un color en una imagen. La transformación del espacio de color juega un papel importante en la técnica de segmentación. El espacio de color HSV (Hue, Saturation, Value) representa los colores de una manera que se alinea estrechamente con la percepción humana. A diferencia del RGB, que se centra en mezclar colores primarios, el HSV separa el color en sus tres componentes (Dijin, 2024).

- **Hue (Matiz):** Representa los colores primarios (rojo, verde, azul) con todos los matices intermedios que podemos percibir cuando los situamos en el círculo cromático. Queda normalizado que el rojo primario se sitúa a 0°, el verde primario a 120° y el azul primario a 240°, volviendo al rojo cuando regresamos al origen del círculo a 360° (Almonacid, 2012).

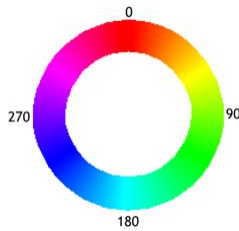


Fig. 2. Círculo cromático de matices del espacio de color HSV (Almonacid, 2012).

- **Saturation (Saturación):** Representa la “cantidad de color”. El valor mínimo de saturación para cualquier color es el gris, mientras que el máximo es el color más puro, más “intenso”. Se representa en escala de 0 a 100% (Almonacid, 2012).
- **Value (Luminosidad):** Podríamos entenderlo como la cantidad de luz. Cualquier color al aumentar su cantidad de luz tiende al blanco. Si, por el contrario, la cantidad de luz disminuye tenderá al negro. El rango de valores es en porcentaje: 0% luminosidad mínima (negro) y 100% luminosidad máxima (blanco) (Almonacid, 2012).

El estudio presentado tiene como finalidad la generación y análisis de los patrones subacuáticos mediante el procesamiento de imágenes, obteniendo máscaras del mismo patrón para una observación más detallada. El desarrollo de un sistema cimático que permita la variación de frecuencias utilizando la vibración de un altavoz y la difracción de luz que incide sobre el líquido que permite detallar aún más la forma del fenómeno presente en la superficie del agua.

II. MATERIALES

Se presentan los materiales utilizados para el desarrollo del sistema generador de frecuencias, el cual, es de suma importancia para este estudio.

Tab. 1. Materiales utilizados para el sistema cimático.

Material	Cantidad
----------	----------

Altavoz tipo Woofer (tonos medios) con impedancia de 8 Ω	1
Madera tipo MDF con grosor de 3 mm	1 placa de 60 x 60 cm
Amplificador marca Hi – Fi, modelo AK – 380. Potencia máxima de audio de 400 W por canal	1
Aro de tipo LED Blanco de 10 in de diámetro 1/RGB de 3.5 in de diámetro	1
Cámara Nikon Coolpix L320	1
Tripié para cámara y aros de luz	1
Cable RCA para audio	1
Recipiente de plástico de forma circular con 7 cm de diámetro.	1

III. METODOLOGÍA

Se detalla mediante etapas la metodología seguida para el desarrollo del estudio.

a. Desarrollo del sistema cimático

Mediante el uso de un programa CAD, se realiza el modelo correspondiente de la base (mm) para el altavoz. Se realizan cortes rectangulares y cuadrados. Esto le dará altura a la misma y permite que la vibración de la membrana no se disperse en la superficie donde esté apoyada. La base (color negro) tiene una elevación mínima de 2 cm con respecto a la superficie y con orificios en la parte inferior de la base para permitir la entrada de aire a la membrana del altavoz.

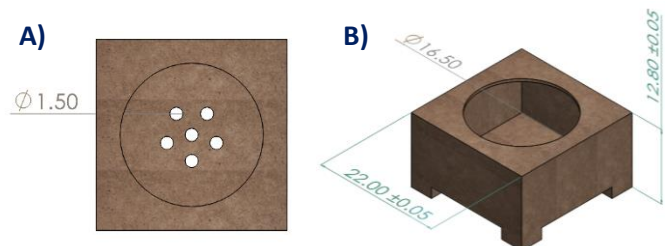


Fig. 3. A) Vista superior de la base. B) Vista isométrica de la base.

El altavoz se fija mediante tornillos a la base para evitar cualquier movimiento que afecte la vibración y, posteriormente, a la imagen del fenómeno címático. El recipiente de 7 cm de diámetro (color negro) se fija en la parte superior de la bocina y se procura que esté nivelado.



Fig. 4. Sistema electrónico de frecuencias címáticas con un altavoz y recipiente colocado en la base.

La bocina se conecta a un canal del amplificador con un cable de audio RCA que se conecta al jack hembra del celular, en el cual se varían las frecuencias que recibe el altavoz.



Fig. 5. Conexiones del amplificador con la bocina y celular para emitir la frecuencia.

Mediante un tornillo sin cabeza se une el aro de luz RGB dentro del aro de luz Blanco, con el fin de crear un contraste de colores que incida sobre el agua para que la cámara pueda captar diferentes zonas que podrían estar ocultas si únicamente se utiliza un solo contraste de color.

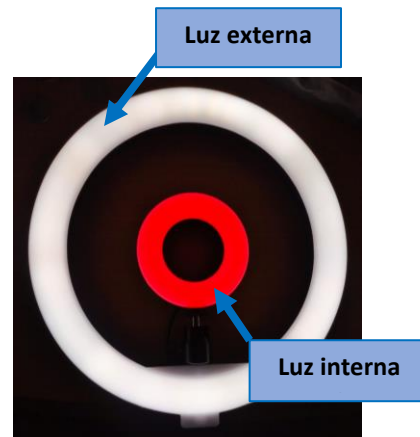


Fig. 6. Posicionamiento de los aros de luz para la visualización de patrones ocultos.

Los aros de luz y la cámara se colocan en el centro del recipiente con un trípode para capturar el patrón que se genera en la superficie del agua reflejado al momento de emitir la señal de frecuencia en el rango de 35 a 120 Hz. Ver Fig. 6.



Fig. 7. Componentes en conjunto para el funcionamiento del sistema címático.

b. Fluido y elección de color

Se utiliza agua destilada para evitar los minerales pesados o residuos que puedan estar presentes en el agua de grifo. Para la reflexión de la luz, se utiliza colorante negro de grado alimenticio para que el agua tenga un color oscuro en relación de 60 mL/1 gota.

Para realizar el contraste en la iluminación se emplea el blanco para la reflexión y un secundario de color morado.

c. Rango de frecuencias y preprocesamiento de imágenes

El sistema se genera en una prueba general para mantener las condiciones ambientales y el control de las frecuencias del sonido hacia el sistema cimático. La amplitud del volumen es de 25% y el rango de frecuencia de 35 – 120Hz. Para analizar los fenómenos de patrones subacuáticos en el agua se trabaja con la imágenes adquiridas en las frecuencias de 35, 40 y 60Hz.

d. Procesamiento de imagen

Se transforma el espacio de color de RGB a HSV ya que se maneja el matiz (hue), saturación (saturation) y luminosidad (value), los cuales son parámetros representativos en las imágenes obtenidas de las frecuencias.

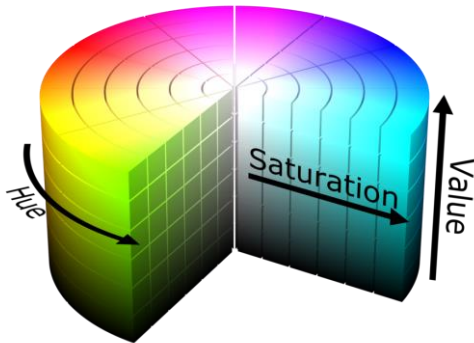


Fig. 8. Figura 3D en representación del espacio de color HSV (Datumizer, 2015).

La transformación de este espacio de color se rige por cuatro variables principales que son el rojo (R), verde (G) y azul (B) y una variable C que representará la diferencia de umbral máximo y mínimo.

$$R' = R/255 \quad (1)$$

$$G' = G/255 \quad (2)$$

$$B' = B/255 \quad (3)$$

Las ecuaciones Ec. (1), Ec. (2) y Ec.(3) pretenden normalizar el valor RGB a valores entre 0 y 1 únicamente por conveniencia ya que es más fácil trabajar con valores pequeños. Se utilizan valores máximos y mínimos mediante el cálculo estadístico para obtener una diferencia de umbral:

$$C_{max} = \max (R', G', B') \quad (4)$$

$$C_{min} = \min (R', G', B') \quad (5)$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min} \quad (6)$$

Con estos parámetros es posible obtener los valores H (Hue – Matiz), S (Saturation – Saturación) y V (Value – Luminosidad) con las siguientes ecuaciones:

$$H = \begin{cases} 0^\circ, \Delta = 0 \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{G' - B'}{\Delta} \bmod 6 \right), C_{max} = R' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{B' - R'}{\Delta} + 2 \right), C_{max} = G' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{R' - G'}{\Delta} + 4 \right), C_{max} = B' \end{cases} \quad (7)$$

(Valores 0 a 360°)

$$S = \begin{cases} 0, C_{max} = 0 \\ \frac{\Delta}{C_{max}}, C_{max} \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

(Valores de 0 a 100%)

$$V = C_{max} \quad (9)$$

(Valores de 0 a 100%)

De esta manera se identifica la saturación, brillo y, principalmente, el matiz que facilita la elección de rangos de color en el patrón formado por las frecuencias 35, 40 y 60Hz.

En Python 3.13, junto con la librería OpenCV, Numpy y Matplotlib, las componentes H, S, V se separan para reordenar los pixeles y normalizar los valores para identificar el rango de color que se está manejando en la imagen. Se selecciona un valor de color mínimo (H_{MIN}) y máximo (H_{MAX}) para la extracción de los pixeles que cumplan con el rango de color establecido entre los valores máximo y mínimo y generar una máscara que represente el área de los tonos de color de la imagen.

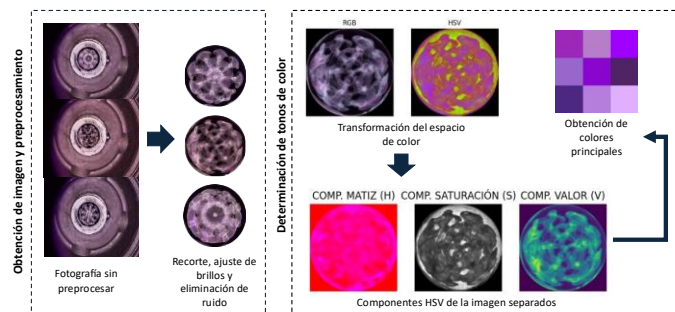


Fig. 9. Etapas de obtención de imagen y determinación de tonos de color.

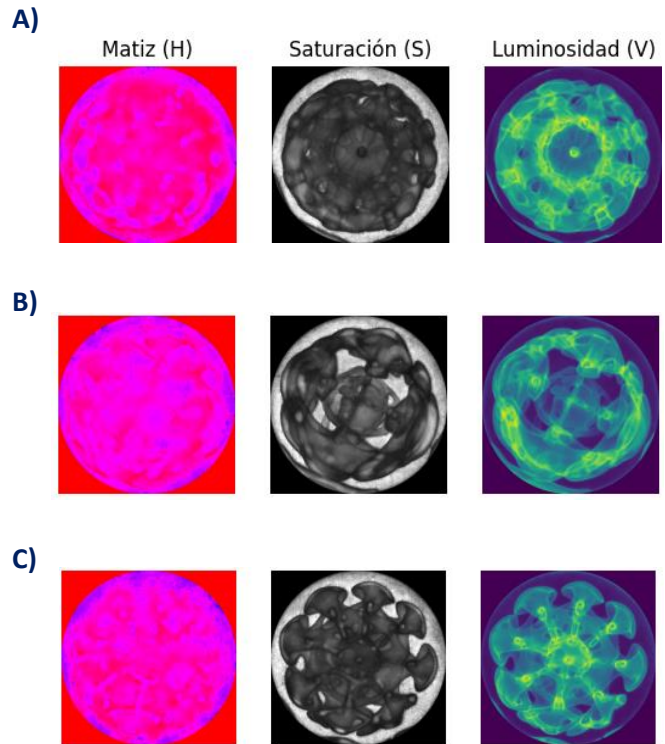
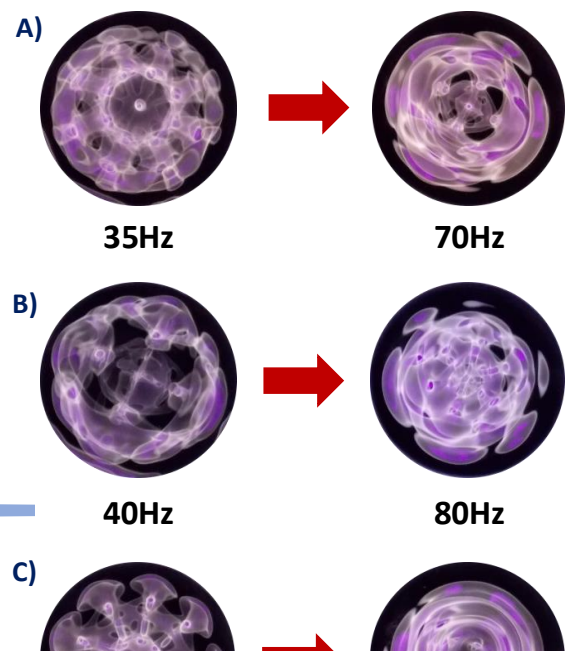


Fig. 11. Componentes HSV de los patrones de A) 35Hz, B) 40Hz y C) 60Hz.

IV. RESULTADOS

Los patrones generados por las frecuencias de 35, 40 y 60Hz se muestran en la Fig. 10. Se comparan las imágenes preprocesadas con su frecuencia dupla (con el motivo de observar alguna proporción, doblar la frecuencia base resulta más sencillo para observación) respectiva en donde es posible observar que no comparten ninguna proporción en cuanto a generación de figuras.



Tonos Morados

75

50

30

Tab. 3. Intervalos de límite máximos para los tres tonos principales.

Utilizando los patrones de 35Hz, 40Hz y 60Hz se realiza el procesamiento correspondiente al cambio del espacio de color obteniendo sus componentes H (Matiz), S (Saturación), V (Luminosidad) de cada frecuencia en la Fig. 11.

Mediante la componente H de cada patrón, se normalizan los valores RGB de cada pixel de la imagen para generar un plano tridimensional que contenga los colores principales de cada patrón, en donde los ejes representarán el valor H, S, V correspondientes.

El color de cada uno de los puntos en la Fig. 12 es el color RGB original pero representado en valores HSV, con el fin de identificar los colores tal cual en la imagen. Los tres colores principales en cada imagen son tonos oscuros (negro, morado intenso), tonos blancos (gris claro, blanco) y tonos violeta (de izquierda a derecha en la etiqueta: morado, lila, berenjena, púrpura).

La región de color de estas tres imágenes se encuentran en un rango determinado, en donde se escoge un valor máximo y un valor mínimo para los tres colores principales:

Tab. 2. Intervalos de límite mínimos para los tres tonos principales.

Límites Mínimos			
Tono principal	H	S	V
Tonos Oscuros	0	0	0
Tonos Blancos	0	0	10

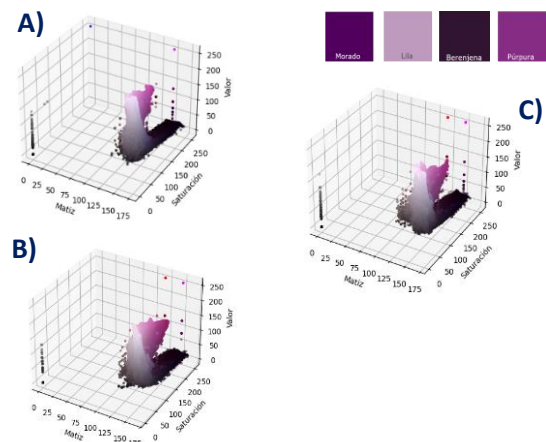


Fig. 12. Mapa de colores presentes en las imágenes de los patrones de A) 35Hz, B) 40Hz y C) 60Hz.

Límites Máximos			
Tono principal	H	S	V
Tonos Oscuros	180	255	40
Tonos Blancos	180	40	200
Tonos Morados	155	255	255

Establecidos los límites, se utiliza el comando visto en la sección de la metodología para obtener las tres máscaras (máscara de tonos oscuros, máscara de tonos blancos y máscara de tonos morados) de cada frecuencia. De la Fig. 13 a Fig. 15 se muestran las máscaras correspondientes a 35, 40 y 60Hz, en donde esta obtención de las máscaras pretende identificar mediante el color, las diferentes regiones del patrón de las frecuencias, constituyéndose en valles (zonas donde el color es oscuro) y crestas (zonas donde el color es luminoso, que son los tonos blancos y tonos violeta).

La cresta es el punto más alto de la onda y el valle el punto más bajo, que son partes fundamentales de las ondas. Existe una relación dentro de los patrones de las frecuencias con estas propiedades de onda, ya que al ser sometidas a una frecuencia, el agua genera un movimiento oscilatorio adoptando esas características. Estas formas de los patrones de frecuencia se constituyen por un conjunto de varias ondas que chocan entre sí formando las simetrías vistas en el agua. Es importante seccionar estas zonas para la identificación de la forma a tratar, por ello la elección de colores fue minuciosa para dividir estas regiones en tres tipos de máscaras de colores principales en el patrón de la frecuencia correspondiente.

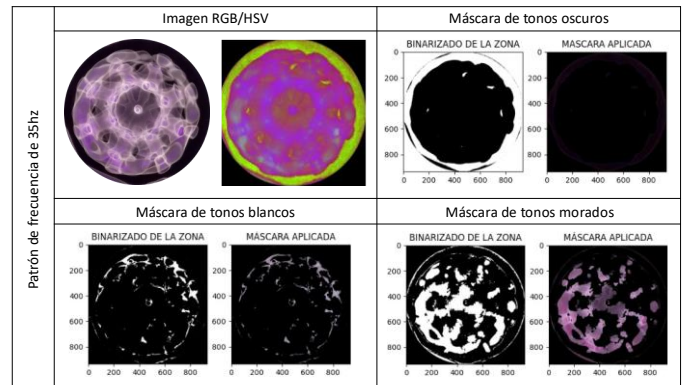


Fig. 13. Máscaras de los colores principales de la imagen con el patrón de frecuencia de 35Hz.

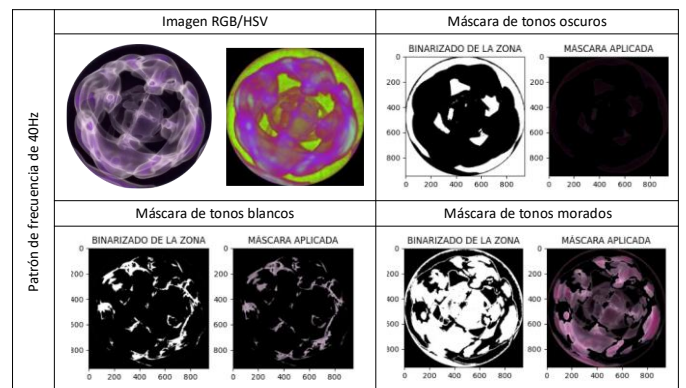


Fig. 14. Máscaras de los colores principales de la imagen con el patrón de frecuencia de 40Hz.

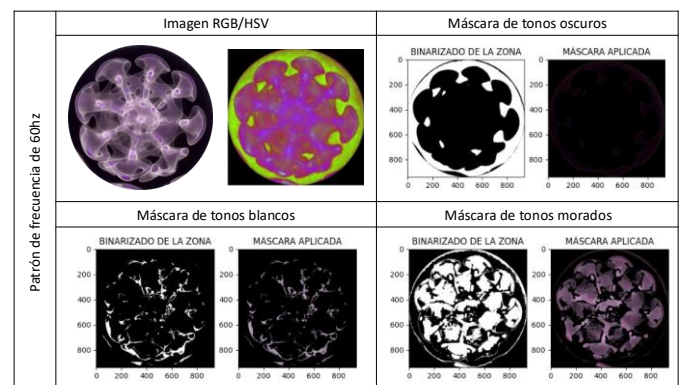


Fig. 15. Máscaras de los colores principales de la imagen con el patrón de frecuencia de 60Hz.

V. TRABAJO A FUTURO

Teniendo las diversas morfologías se continua el trabajo con la identificación de las crestas y valles de la imagen

mediante OpenCV, remarcando las áreas oscuras (valles) y las zonas luminosas (crestas). De igual forma, se pretende abarcar un enfoque orientado a, ya sea cuestiones en la ingeniería de materiales, principalmente análisis de estructuras o como medio físico de separación de partículas.

El tener un ambiente más controlado del sistema cimático para evitar ruido externo que afecta a la generación de los patrones mediante la utilización de sensores de vibración, más contrastes lumínicos y mejoras en la segmentación de colores en la imagen.

VI. CONCLUSIONES

El estudio de las frecuencias y vibraciones en diversos elementos provee información de su frecuencia de resonancia y su frecuencia natural. En el agua, al ser un elemento adaptable a las condiciones de vibración, forma patrones únicos que representan a la frecuencia establecida. Mediante el desarrollo de un sistema cimático de frecuencias variables se pueden estudiar diversos patrones generados, contemplando visualmente figuras simétricas. Cada patrón es único con respecto a su frecuencia ya que no existe proporcionalidad en cuanto a la morfología del patrón. El uso del procesamiento de imagen aporta más información con respecto a cómo está conformado, gracias a la difracción y contrastes de luz en el agua se perciben varios tonos de colores que representan valles o crestas. Los colores que se forman en la imagen presentan varias tonalidades e intensidades lumínicas, por lo cual trabajar en el espacio de color HSV es favorable para la identificación de estos, y, así, segmentar el patrón con respecto a sus tonos principales de color para la identificación de diferentes regiones.

En base al prototipo generado se le da relevancia para el estudio de frecuencias cimáticas aplicadas a fluidos, destacándose como un banco didáctico/experimental de vibro-acústica con visión computacional, el cual, ayudará al estudio de vibraciones basándose en elementos visuales (en este caso los patrones simétricos generados), que, con ayuda de la visión computacional,

se puede determinar el comportamiento que tiene la frecuencia aplicada.

Esta investigación es aplicable a la Ingeniería Mecatrónica en diversos ámbitos en donde se estudie la vibración. Por ejemplo, el estudio de las vibraciones y frecuencias naturales en piezas mecánicas que estén sometidas a un sistema vibratorio. También la caracterización de actuadores acústicos se deriva de este proyecto, los cuales pueden ser aplicados a sistemas de detección (similar a los sensores ultrasónicos). Otro punto aplicable es el estudio de la óptica, en específico a la detección aplicada en patrones ópticos, en donde tiene relevancia en cámaras de visión de artificial de sistemas de clasificación de objetos. De igual manera, no se puede dejar de lado al preprocesamiento para el control, en donde es necesario para mantener normalizadas las variables usadas para el cumplimiento del objetivo del sistema.

Finalmente, esta investigación abre muchos caminos a los que se puede enfocar y servir como una herramienta de apoyo a investigadores e ingenieros que se dediquen al estudio de la óptica, acústica y vibraciones.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto 22883.25-PD del Instituto Tecnológico Superior de México.

REFERENCIAS

Arce, M. (2011, noviembre). Cimática: Las formas e imágenes del sonido, una aproximación desde la experiencia personal. ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/303547983_Cimatica_las_formas_e_imagenes_del_sonido_una_aproximacion_desde_la_experiencia_personal

Journey of Curiosity. (2010). What is Cymatics? Recuperado de <https://journeyofcuriosity.net/pages/what-is-cymatics-how-to-explained>

Sheldrake, M., & Sheldrake, R. (2017). Determinants of Faraday wave-patterns in water samples oscillated vertically at a range of frequencies from 50–200 Hz. *WATER*, 9, 1–27. Recuperado de <https://doi.org/10.14294/WATER.2017.6>

Val Baker, A. K. F., Csanád, M., Fellas, N., Atassi, N., & Oomen, P. (2023, octubre). Resonant phenomena of Faraday waves: Reproducibility. *OSF Preprints*. Recuperado de <https://doi.org/10.31219/osf.io/dsvgc>

Cameron, A., Ghassemlooy, Z., Mansour Abadi, M., & Fu, Y. Q. (2024, julio). Cymatics and their potential applications in free space optical communications. *Proceedings of the 2024 14th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/CSNDSP60683.2024.10636371>

Lega Lladós, F. (2015). Creación sonora sobre fluidos. *BRAC - Barcelona Research Art Creation*, 3(2), 122–158. Recuperado de <https://doi.org/10.17583/brac.2015.1390>

Datumizer. (2015, diciembre). HSV color solid cylinder. *WikimediaCommons*. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HSV_color_solid_cylinder.png#filehistory

Dijin, D. (2024, octubre). A Beginner's Guide to understand the HSV Color Model. *Medium*. Recuperado de <https://medium.com/@dijdomv01/a-beginners-guide-to-understand-the-color-models-rgb-and-hsv-244226e4b3e3>

Almonacid, C. (2012, diciembre). Descripción del modelo de color HSL (Hue, Saturation, Lighthness). *Universidad Autónoma de Madrid – Servicio de Cartografía (SCUAM)*. Recuperado de <https://guiadigital.uam.es/SCUAM/documentacion/color.php>

Análisis de movimiento de dedos y traducción del lenguaje de señas por visión computacional

Aguilar Delgado Malcom I.^{*1}, Meza Vallejo Maria F.¹, Razón González Juan Pablo², Estrada Gutiérrez Juan C.³, Barajas Elías Azucena⁴, Rodríguez Bravo Humberto¹, Cano Lara Miroslava^{*1}

¹ TecNM/ITESI, Depto. Mecatrónica, ² TecNM/ITESI, Depto. Electromecánica, ³ Universidad de Guadalajara/CUCI, Depto. de Ciencias Tecnológicas, ⁴ TecNM/ITESI, Depto. de Tutorías

* Autor de correspondencia: LIS22110660@irapuato.tecnm.mx, miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

Resumen. Actualmente se buscan técnicas de visión computacional e inteligencia artificial que permita entender e investigar la información de los movimientos del cuerpo humano. En este trabajo se evalúa el reconocimiento de ángulos y movimiento en la región de los brazos y manos. Se busca aprovechar una herramienta para implementar el software de Python MediaPipe en conjunto con una Cámara Web HD full genérica para proponer un estudio y comprensión de los movimientos de brazos y dedos en una persona. Para la identificación de los puntos tanto de los brazos, como de las manos se identifica las landmarks (puntos) que tiene cada uno, para posteriormente realizar un vector para el cálculo de ángulos internos. La comparación de los ángulos entre dedos se registran y analizan para identificar posteriormente las formas gestuales de la mano tales como puño, amor y paz, rock and roll, ok y excelente. Este estudio investiga la dinámica del lenguaje de señas coloquiales donde el sistema de captura de movimiento registrar y mide los ángulos y desplazamientos de las articulaciones en los brazos, especificando la comprensión de los grados entre cada dedo y la clasificación del gesto. Está orientado a que no dependa de tanta complejidad en base a costos o sensores complejos, esto con el objetivo de hacerlo con equipos más convencionales.

Palabras clave. Gestos de manos, Ángulo-Señas, Visión computacional

I. INTRODUCCIÓN

Mediante el uso de sistemas especializados, es posible obtener un análisis cinemático que emplea cámaras y sistemas de captura de movimiento para registrar y medir los ángulos y desplazamientos de las articulaciones (Quito, 2024), lo que permite un análisis detallado del comportamiento articular y muscular en distintos contextos.

Dependiendo de la tecnología empleada, existen diferentes métodos para realizar la captura de movimiento:

Tipos de tecnología de captura:

- Óptico pasivo: Utiliza cámaras infrarrojas que siguen los reflejos de marcadores colocados en el cuerpo del sujeto.
- Óptico activo: Emplea sensores LED que emiten luz y son rastreados por cámaras especializadas cuando se activan.

- **Vídeo sin marcadores:** Este tipo de captura no requiere marcadores físicos, ya que usa software avanzado para rastrear el movimiento directamente.
- **Inercial:** Los sensores inerciales se adhieren al cuerpo del sujeto y miden aceleración y velocidad angular, transmitiendo estos datos a un ordenador sin necesidad de cámaras (TAI, 2024).

Existen nuevas técnicas de Motion Capture, en la que cámaras y software de inteligencia artificial pueden realizar un enfoque de captura de movimiento sin la necesidad de marcadores. El software permite que, mediante algoritmos, se analice al usuario que realiza las acciones, identificando formas humanas, movimientos, expresiones y gestos (IDIS, 2025).

Los gestos con las manos se refieren a la forma en que las mueves. Movimientos sencillos pueden expresar emociones, pensamientos e incluso información. Son fundamentales para la comunicación y pueden variar según el lugar del mundo en el que te encuentres (Laguaite, 2023). Con los dedos de las manos (vease Fig.1) podemos hacer infinidad de gestos que según el país de dónde provenimos tendrán un significado u otro (Cristina Álvarez, 2013).



Fig. 1. Nombre de los dedos en la mano

Algunos ejemplos de señas que se pueden hacer con las manos son:

1. Excelente o Perfecto. Juntar el dedo pulgar con el dedo índice de una mano
2. Ok. Levantar el dedo pulgar
3. Paz. Levantar el dedo índice y el dedo medio de una mano haciendo una V
4. Rock and Roll (I love you). Levantar el dedo índice, el dedo meñique y el dedo pulgar
5. Poder. Todos los dedos doblados hacia la palma y el pulgar retraído, mostrando los nudillos.



Fig. 2. Ejemplos de señas o gestos realizados por la mano

El presente proyecto surgió ante la necesidad de disponer de una herramienta accesible y precisa para la medición de los ángulos articulares del brazo y los dedos, con el objetivo de facilitar el análisis, monitoreo y retroalimentación en procesos de control y rehabilitación del miembro superior. La propuesta se orienta hacia el desarrollo de un sistema que no dependa de sensores físicos complejos o costosos, sino que utilice equipos convencionales como una cámara web y algoritmos de procesamiento de imagen para llevar a cabo la captura y análisis del movimiento.

II. MARCO TEÓRICO

a. Visión Computacional

La visión computacional (VC) es un campo de la inteligencia artificial que se enfoca en dotar a las computadoras de la capacidad de interpretar y comprender el mundo visual. En este proyecto, se utiliza para identificar puntos específicos del cuerpo humano (articulaciones) a partir de imágenes obtenidas por una cámara. El uso de sistemas accesibles y económicos como cámaras convencionales y bibliotecas de visión computacional ha abierto nuevas oportunidades en entornos académicos y de bajo presupuesto para desarrollar sistemas MoCap funcionales.

b. Captura de movimiento

La captura de movimiento (también denominada mocap o Mocap) es el proceso de registrar digitalmente el movimiento de las personas. Se utiliza en el entretenimiento, los deportes, las aplicaciones médicas, la ergonomía y la robótica. En la realización de películas y el desarrollo de juegos, se refiere a la grabación de las acciones de los actores para las animaciones o los efectos visuales (Trigital, 2021).

c. Detección de articulaciones

La detección de manos es una técnica que identifica y localiza la posición de una o ambas manos en una imagen o secuencia de video. Es fundamental para aplicaciones como control por gestos, realidad aumentada, rehabilitación física y videojuegos.

d. MediaPipe

En el campo en constante evolución de la inteligencia artificial (IA) y visión por computador (VC), MediaPipe (MP) se destaca como un conjunto de herramientas esencial para desarrolladores y entusiastas de la inteligencia artificial. Diseñado por Google, ofrece un conjunto de soluciones de aprendizaje automático listas para usar para analizar y procesar transmisiones de vídeo en tiempo real (Nanobaly, 2024). Incluye modelos de aprendizaje automático optimizados para tareas como el reconocimiento facial, la estimación de pose y la detección de manos.

Al proporcionar soluciones prediseñadas y optimizadas, MP reduce el tiempo y el esfuerzo necesarios para integrar capacidades complejas de procesamiento visual en las aplicaciones. Además, su arquitectura modular permite una fácil personalización y una integración fluida con otras tecnologías, como la realidad aumentada, las aplicaciones de salud y mucho más (Nanobaly, 2024).

e. MediaPipe Hands

MediaPipe Hands es una solución de alta fidelidad para el seguimiento de manos y dedos. Emplea aprendizaje automático para inferir 21 puntos (landmarks) de referencia 3D de una mano a partir de un solo fotograma, vease la Fig. 3. Esta información es esencial para analizar la postura de la mano y calcular ángulos articulares (Sphinx, 2023).



Fig. 3. Landmarks de la mano con 21 puntos de referencia

MP Hands utiliza una canalización de aprendizaje automático (ML) compuesta por varios modelos que trabajan en conjunto: un modelo de detección de palma que opera sobre la imagen completa y devuelve un cuadro delimitador de la mano orientado; y un modelo de puntos clave de la mano que opera sobre la región recortada de la imagen definida por el detector de palma y devuelve puntos clave 3D de alta fidelidad de la mano (Sphinx, 2023).

f. MediaPipe Pose

MediaPipe Pose es una herramienta robusta y versátil para la estimación de poses. Su facilidad de uso y compatibilidad multiplataforma la hacen ideal para diversas aplicaciones, como videojuegos, fitness, realidad aumentada e imágenes médicas de esta manera se puede crear soluciones innovadoras que rastrean y analizan con precisión los movimientos del cuerpo humano.

La cabeza, los hombros, los codos, las muñecas, las manos, las caderas, las rodillas y los tobillos son solo algunos de los 33 puntos (landmarks) de referencia 3D del cuerpo humano que MP stance puede identificar para estimar la postura de una persona, vease la Fig. 4 (CodeTrade India, 2024).

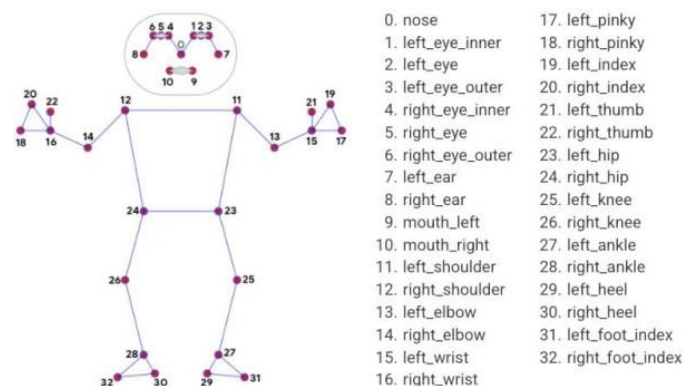


Fig. 4. Landmarks del cuerpo humano con 33 puntos de referencia

g. Cálculo de ángulos usando vectores

Para calcular el ángulo entre dos partes del dedo y los brazos, se utilizan vectores formados entre tres landmarks consecutivos. Si tenemos los puntos A, B y C:

1. Se forma el vector AB (de A a B) y BC (de B a C).
2. El ángulo entre estos vectores se calcula con la fórmula del producto punto:

$$= \cos^{-1} \left(\frac{|\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}|}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \right) \quad (1)$$

En la Ec.(1), se hace uso de las landmark de las partes de los dedos y de los brazos que forman vectores del MP. Los ángulos de los dedos se pueden medir con un goniómetro para una medición precisa o de manera aproximada donde un ángulo entre dos dedos puede ser de 30°, 45°, 60° o hasta 90° entre el pulgar y el meñique, abriendo la mano completamente.

III. METODOLOGÍA

Se inicio la captura de imagen con la cámara predeterminada de la laptop. Sin embargo, para mejorar la calidad se emplea una segunda cámara (Cámara Web HD Full Genérica). En el diagrama de flujo de la Fig. 5 se observa la secuencia de acciones desde la captura de movimiento hasta la detección de ángulos y reconocimietno de señas.

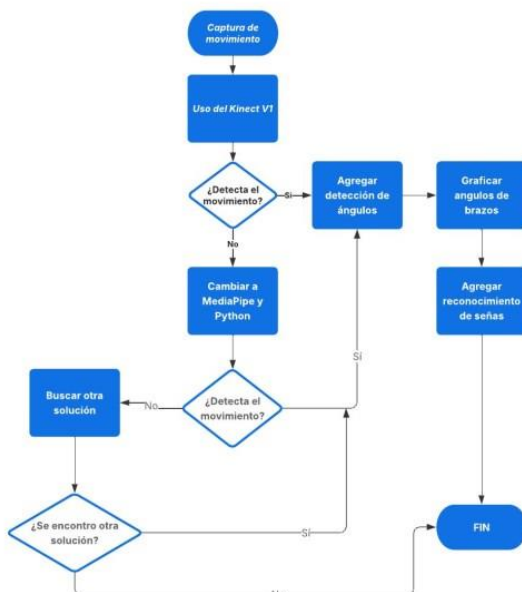


Fig. 5. Diagrama de Flujo del Análisis de movimientos dedos y traducción del lenguaje de señas por visión computacional

a. Esqueleto humano

En la primera parte MP de Python identifica las partes del cuerpo entero. En la Fig. 6a se muestra un esqueleto humano sobresaliendo las landmarks en un sujeto prueba. Posteriormente, se configuran los ángulos internos de cada mano, con el objetivo de verificar el cálculo de ángulos usando los vectores (ver Fig. 6b).

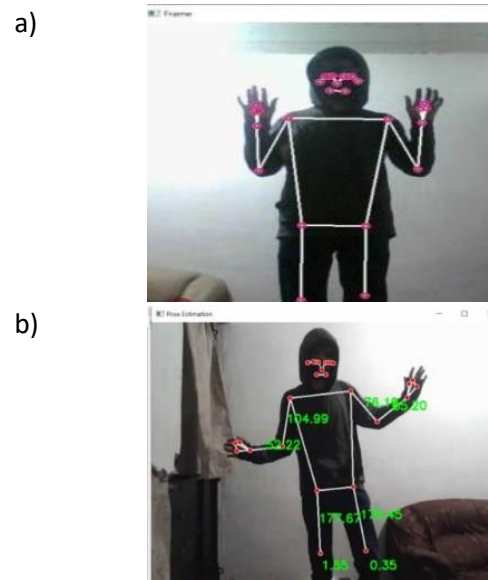


Fig. 6. a) Landmarks del cuerpo humano. b) Ángulos internos

Tab. 1. Ángulos mostrados en la Fig. 6b

	Lado Izquierdo	Lado Derecho
Codo	52.22°	55.20°
Hombro	104.99°	76.19°
Cadera	177.67°	179.45°
Rodilla	1.55°	0.35°

b. Identificación de manos

Para idenfificar los nodos de las regiones de las manos se visualiza las landmarks de la mano donde en los dedos no muestran separación, como la mano abierta (ver Fig. 7).



Fig. 7. Prueba de landmarks de manos (abierta y cerrada)

c. Identificación de brazos y manos

Para el análisis de los ángulos en brazos y mano, se selecciona en la captura de imagen la región de los brazos del cuerpo humano, excluyendo el resto del esqueleto. Se generan vectores en las secciones de hombro-codo y codo-muñeca. Así como mostrar las landmarks de las manos (ver Fig. 8). Se utilizan los nodos del hombro-codo para formar un vector AB, y los nodos de codo-muñeca para formar un vector BC. El cálculo de los ángulos internos se obtiene en la Ec.(1)



Fig. 8. Prueba de identificación de vectores y

El ángulo interno entre los brazos (brazo con señalamiento azul para el lado izquierdo y verde para el brazo del lado derecho). En la Fig. 9 se muestra en una gráfica dinámica que representa el movimiento de ángulo en los vectores entre el brazo y antebrazo. Si se flexiona el brazo, el ángulo interno será menor; por lo tanto se mostrará en la gráfica un valor menor.

Mientras que si se extiende el brazo, el ángulo interno será mayor, por lo tanto se mostrará un valor mayor en la gráfica.

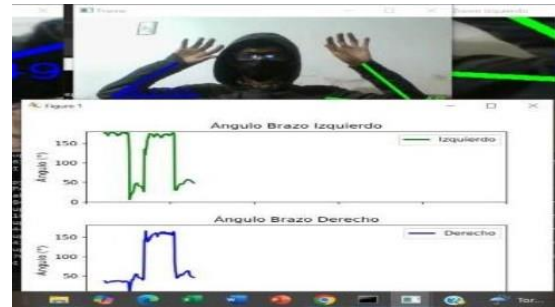


Fig. 9. Prueba de gráfica de ángulo de ambos brazos

d. Parámetros en manos/dedos

En el programa se identifican los dedos de la mano y se elimina el resto de la mano (la palma). En el estudio computacional se muestra una ventana para cada mano (izquierda-derecha), así como el cálculo de ángulo entre cada dedo como se muestra en la Tab. 2 (Fig. 10).

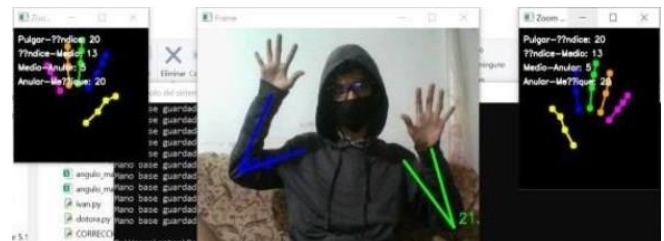


Fig. 10. Prueba de separación de brazos y manos, calculo de ángulos entre los dedos

Tab. 2. Ángulos entre dedos en cada mano

Separación	Mano Izquierda	Mano Derecha
Pulgar-índice	20°	20°
Índice-Medio	13°	13°
Medio-Anular	5°	5°
Anular-Meñique	20°	20°

e. Radio y ángulo entre los dedos

La referencia solicitada a la herramienta del software, fue radio entre los dedos a medir, esto asemejando de mejor manera el ángulo que se mide (Fig. 11).

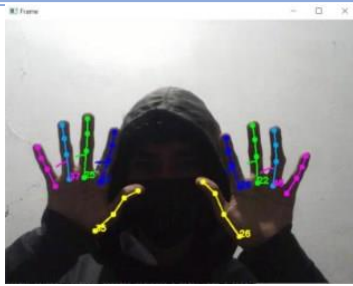


Fig. 11. Prueba de ángulo entre los dedos

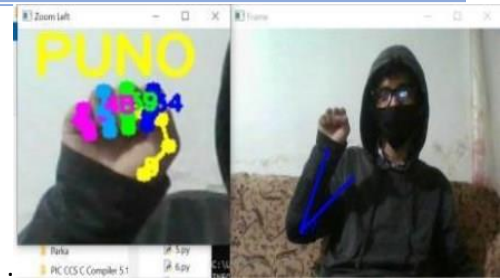


Fig. 12. Prueba de identificación de señal puño

Tab. 3. Ángulos mostrados en la apertura de dedos de la Fig. 11

	Mano Izquierda	Mano Derecha
Rosa	37°	46°
Verde	25°	22°
Azul	27°	26°
Amarillo	35°	26°

f. Análisis de señas en manos

Por último se completa el estudio con señas o gestos mediante las manos. En el código, se asigna una variable a cada señal de mano y es guardado por el software internamente en la unidad, a continuación se muestra el nombre asignado a cada señal (Tab. 4).

Tab. 4. Variables para cada señal o gesto realizado por la mano

Variable	Significado de la señal
P	PUNO (Puño por la ñ)
K	OK
R	ROCK AND ROLL
A	AMOR Y PAZ
E	EXCELENTE

La variable tecleada debe corresponder a la señal que se esta realizando, esto para que el software detecte correctamente la señal mediante los ángulos obtenidos en dicho gesto.

g. Señales o gestos almacenados

Se almacenan los gestos realizados en un archivo *.xlsx con la información de los ángulos de modo que puedan mantener esos valores y sus estimaciones.

Utilizando las variables de la Tab. 4, la prueba almacena las señas y se teclea la variable. Después 5 segundos se realiza la estimación de ángulos (ver Fig. 13).

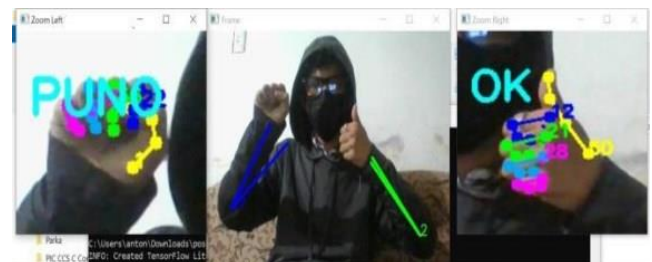


Fig. 13. Prueba de señal o gesto almacenado por ambas manos

IV. RESULTADOS

La visualización en la ventana principal, los brazos representan el ángulo interno entre cada uno. Ventanas alternas muestran cada mano con el movimiento de cada dedo, así como su ángulo (mano izquierda y derecha) (ver Fig. 14). La captura de movimiento de las manos puede abarcar diferentes señas con sus respectivos ángulos entre los dedos. En la Fig. 15, se representa la variedad de señas trabajadas, desde elaborar un puño, ok, rock and roll, amor y paz, y excelente identificando los ángulos en cada efecto de mano.

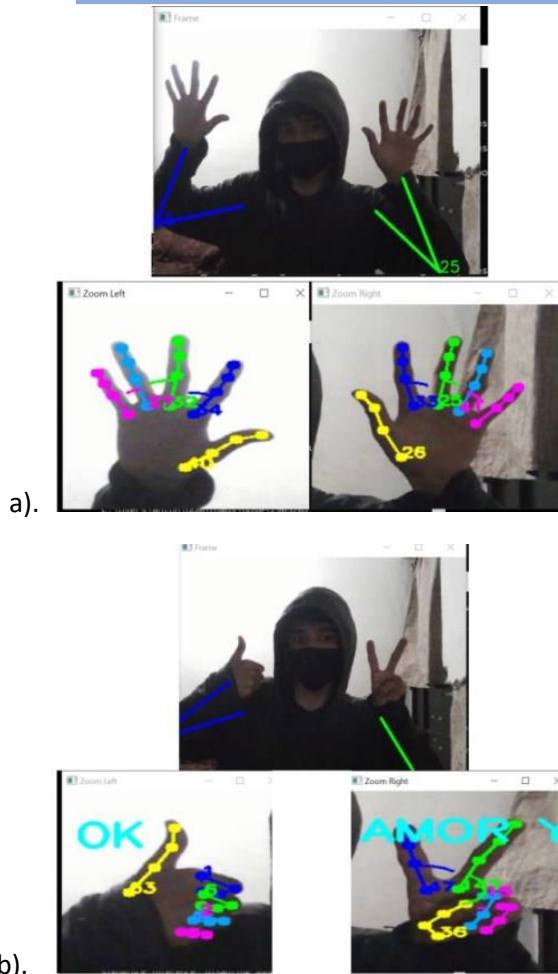


Fig. 14. Resultado de los vectores entre brazos para analizar su ángulo, a). ángulos creados entre dedos. b). señas identificadas en cada mano

La formación de estos gestos se representan en Fig. 15:

- a).Puño. Todos los dedos doblados hacia la palma, el pulgar sobresaliendo.
- b).Amor y Paz. Dedo Medio y Dedo Índice levantado mientras que el resto se encuentran doblados.
- c).Ok. Dedo pulgar levantado, mientras el resto de los dedos se encuentran doblados.
- d).Rock and Roll. Dedo meñique, Dedo índice y dedo pulgar levantado mientras que el resto se encuentran doblados
- e).Excelente. Dedo Meñique, Dedo Anular y Dedo Medio levantado, mientras las puntas del Dedo Índice y Dedo pulgar se juntan.

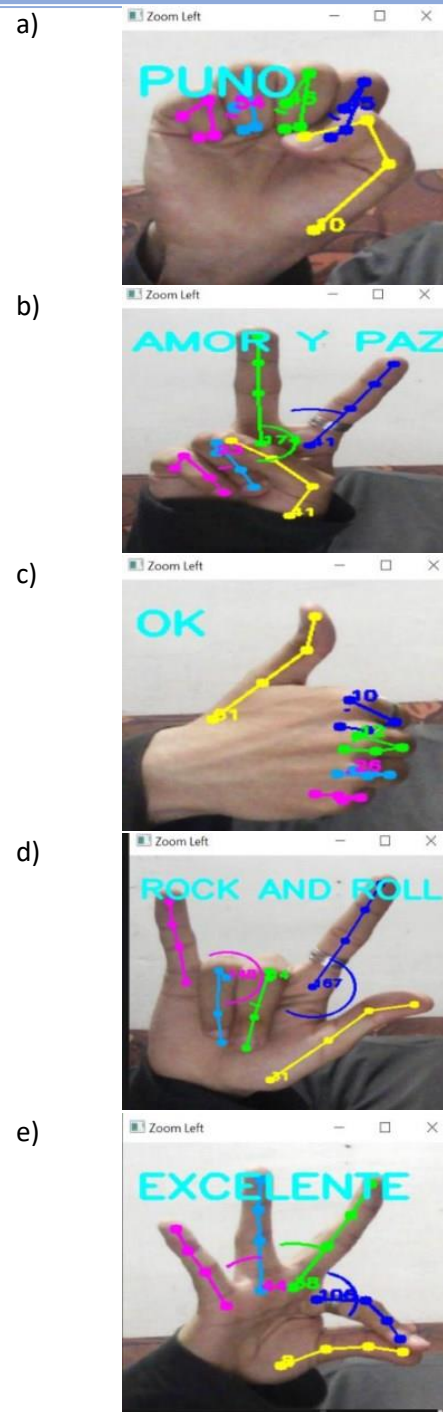


Fig. 15. Gestos registrados por visión computacional

V. CONCLUSIÓN

Se presentan resultados del movimiento de manos donde la visión computacional puede llegar a expandirse y tener mejoras para abarcar más funcionalidades, entre algunas de estas, añadir más variables a diferentes señas o gestos, reducir el margen

de error en la medición de ángulos. La medición de ángulos tiene un margen de error de 5° comprobado con un goniómetro, su captura de movimiento es en tiempo real por medio de Python y MP, lo cual facilita comprender de mejor manera el comportamiento del cuerpo humano, así como características que en este caso se basó en la obtención de ángulos internos.

Analizar los gestos o señas realizadas por la mano tiene como beneficio que se puede comprender de mejor manera el mensaje que se quiere dar a conocer, dándole un significado a cada una de las señas. Los ángulos están ajustados para diferentes personas, es decir que cualquier persona que llegue a utilizarlo marca el ángulo interno que entre los dedos y entre los brazos. Se puede aplicar en el estudio de comportamientos de extremidades del cuerpo para una rehabilitación, así como en la comunicación con personas con discapacidad del habla.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto 2283.25-PD del Instituto Tecnológico Superior de México.

REFERENCIAS

Álvarez, C. (2013, septiembre 22). Significado de los gestos con las manos. Mundo Deportivo. <https://www.mundodeportivo.com/uncomo/salud/articulo/significado-de-los-gestos-con-las-manos-21355.html>

Aillón Orbe, A. A. A. O., & Álvarez Riofrío, C. L. A. R. (2024). SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO PARA UN LABORATORIO DE ANÁLISIS DE LA MARCHA [Trabajo de titulación, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28303/1/TTQ1634.pdf>

Motion Capture. (s/f). Proyectoidis.org. (marzo 16, 1963). de <https://proyectoidis.org/motion-capture/>

TAI. (2024, octubre 22). ¿Qué es el motion capture y cómo funciona? TAI ARTS. <https://taiarts.com/blog/motion-capture/>

India, C. (2024, julio 23). Implementation of human pose estimation using MediaPipe. Medium. <https://medium.com/@codetrade/implementation-of-human-pose-estimation-using-mediapipe-23a57968356b>

Laguaite, M. (s/f). 5 types of hand gestures to use when speaking. Yoodli.Ai. (2023, enero 11), de <https://yoodli.ai/blog/5-types-of-hand-gestures-to-use-when-speaking>

layout: forward target: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker title: Hands parent: MediaPipe Legacy Solutions nav_order: 4 — MediaPipe v0.7.5 documentation. (s/f). Readthedocs.io. Recuperado el 15 de septiembre de 2025, de <https://mediapipe.readthedocs.io/en/latest/solutions/hands.html>

MediaPipe: una herramienta clave para visión artificial. (s/f). Innovatiana.com. (2024, agosto 21), de <https://www.innovatiana.com/es/post/mediapipe-101>

(S/f). Trigital.es. Recuperado el 15 de septiembre de 2025, de <https://trigital.es/mocap-como-funciona-la-captura-de-movimiento-y-que-aplicaciones-tiene-para-la-industria/>