



Dimensiones de la Computación,  
una Exploración en Inteligencia  
Artificial, Datos Masivos y  
Protección Digital

Gustavo Trinidad Rubín Linares

# **DIMENSIONES DE LA COMPUTACIÓN, UNA EXPLORACIÓN EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL, DATOS MASIVOS Y PROTECCIÓN DIGITAL**

María del Carmen Santiago Díaz

Gustavo Trinidad Rubín Linares

Ana Claudia Zenteno Vázquez

Judith Pérez Marcial

**(Editores)**

Gustavo Trinidad Rubín Linares

**(Coordinador)**

*María del Carmen Santiago Díaz, Gustavo Trinidad Rubín Linares, Ana Claudia Zenteno Vázquez,  
Judith Pérez Marcial*  
(editores BUAP)

*Gustavo Trinidad Rubín Linares*  
(coordinador BUAP)

*María del Carmen Santiago Díaz, Gustavo Trinidad Rubín Linares, Ana Claudia Zenteno Vázquez, Judith Pérez Marcial, Nicolás Quiroz Hernández, Rogelio González Velázquez, Luis Enrique Colmenares Guillén, Pedro García Juárez, Maya Carrillo Ruiz, Beatriz Beltrán Martínez, José Andrés Vázquez Flores, Paola Eunice Rivera Salas, José de Jesús Lavalle Martínez, Abraham Sánchez López, Ana Luisa Ballinas Hernández, Meliza Contreras González, Luis Carlos Altamirano Robles, Germán Ardul Muñoz Hernández, María Claudia Denicia Carral, David Eduardo Pinto Avendaño, Carmen Cerón Garnica, Alba Maribel Sánchez Gálvez, María Eugenia Narciza Sully Sánchez Gálvez, Gilberto Lorenzo Martínez Luna, Mario Rossainz López, Pedro Bello López, Guillermo De Ita Luna, Mariano Larios Gómez, Miguel Angel Peña Azpiri, Hermes Moreno Álvarez, Raúl Antonio Aguilar Vera, Julio César Díaz Mendoza, Juan Pablo Ucán Pech, Víctor Manuel Morales Rocha, Carina Toxqui Quitl, Alfonso Padilla Vivanco, Heidy Marín Castro, Carlos Soubervielle Montalvo, Abelardo Gómez Andrade, Amilcar Meneses Viveros, Abel Alejandro Rubín Alvarado, Miguel Morales Sandoval, Oleg Starostenko Basarab, Lorna Verónica Rosas Téllez, María Concepción Landa Arnaiz, Francisco Marroquín Gutiérrez, Jéssica Nayeli López Espejel*  
(revisores)

Primera edición: 2025

ISBN: 978-607-8975-83-9

**Montiel & Soriano Editores S.A. de C.V.**

15 sur 1103-6 Col. Santiago Puebla, Pue.

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

*Rectora:*

Dra. María Lilia Cedillo Ramírez

*Secretario General:*

Mtro. Damián Hernández Méndez

*Vicerrector de Investigación y Estudios de Posgrado:*

Dr. Ygnacio Martínez Laguna

*Directora de la Facultad de Ciencias de la Computación:*

M.I. María del Consuelo Molina García

# Contenido

**Prefacio**.....5

**Sensor de Evaluación de Calidad del Aire en Ambientes Interiores por medio de IoT**

*Bárbara Emma Sánchez Rinza*

*Gabriela Martínez Rosas*

*Marco Antonio Mora Ramírez*.....6

**Protocolo de Pruebas para un Nanosatélite Didáctico**

*Javier Alonso López Quintero*

*María del Carmen Santiago Díaz*

*Ana Claudia Zenteno Vázquez*

*Gustavo Trinidad Rubín Linares*.....20

**Plataforma Biónica de Asistencia para Extremidades: Avances en Fisioterapia Mediante Tecnología Biónica**

*Mariano Larios Gómez*

*Julio César Álvarez Galicia*

*Carmen Cerón Garnica*

*Gerardo Martínez Guzmán* .....30

**Computational in Silico Study of Nicotine-induced Pulmonary Microinfarctions**

*Anayeli Martínez Benítez*

*Rafael Izazaga Pérez*

*Leopoldo Altamirano Robles*

*Raquel Díaz Hernández* .....47

**Sistema de Control Gestual en Tiempo Real para un Brazo Robótico Colaborativo mediante Visión Artificial**

*Luis Armando Guzman Gomez*

*Abel Alejandro Rubín Alvarado*

*Saulo Abraham Gante Díaz*

*Jonathan Axel Cruz Vazquez*

*Juan Humberto Sossa Azuela* .....58

**Generación de Ambientes Virtuales Utilizando Sensores Ambientales y Procesamiento de Imágenes**

*Cristian Esau Ortiz Aguila*

*Emiliano Revuelta Aburto*

*María del Carmen Santiago Díaz*

*Ana Claudia Zenteno Vázquez*

*Gustavo Trinidad Rubín Linares* .....74

**Metaheurística Reducida en Parámetros para Resolver el Problema de Asignación Cuadrática mediante Python**

*Alhely González Luna*

*Rogelio González Velázquez*  
*Abraham Sánchez López*  
*María Beatriz Bernabé Loranca* .....84

**Del Código a la Conciencia: Herramienta Tecnológica para Evaluar Hábitos Sostenibles**

*Roberto Carlos Hernández Aparicio*  
*María del Carmen Santiago Díaz*  
*Ana Claudia Zenteno Vázquez*  
*Gustavo Trinidad Rubín Linares*  
*Judith Pérez Marcial* .....95

**Gesture Classification Using Smartwatch Sensors: A Systematic Mapping Study**

*Miguel Angel Castillo Sanchez*  
*Antonio Armando Aguilera Güemez*  
*Edwin Jesús León Bojórquez*  
*Raúl Antonio Aguilar Vera*.....107

**Desarrollo de un Robot Autónomo de Exploración Terrestre**

*Dulce Paulina Olvera Alvarado*  
*Daniel Isay López del Castillo*  
*William Ortega Marín*  
*María del Carmen Santiago Díaz*  
*Ana Claudia Zenteno Vázquez*  
*Gustavo Trinidad Rubín Linares*.....122

**Revisión Preliminar del Estado del Arte de Procesamiento de Lenguaje Natural y Aprendizaje Automático Aplicados a Sistemas de Recomendación en el Dominio de Reclutamiento en Puestos Laborales de Alta Demanda**

*Omar Atriano Venta*  
*Perfecto Malaquias Quintero Flores*  
*Rodolfo Eleazar Pérez Loaiza*  
*Oscar Atriano Ponce*.....132

## Prefacio

El crecimiento de la Inteligencia Artificial (IA) en la última década ha sido tan acelerado que, aun siendo testigos cotidianos de su evolución, resulta difícil dimensionar todo su potencial. Tecnologías que hace apenas unos años parecían propias de la ciencia ficción —como las interfaces conversacionales avanzadas— hoy forman parte de nuestra vida diaria. Herramientas como ChatGPT demostraron que es posible interactuar con modelos capaces de dialogar, generar documentos, crear presentaciones profesionales, analizar imágenes y videos, y asistirnos en tareas que van mucho más allá de simples actividades escolares.

Este salto tecnológico no surgió de la noche a la mañana. Es el resultado de años de investigación en modelos de lenguaje, arquitecturas neuronales, aprendizaje profundo y cómputo a gran escala. Al mismo tiempo, ha requerido la convergencia de disciplinas que ya no pueden concebirse por separado: la Ciencia de Datos, responsable de procesar y dar sentido a volúmenes colosales de información, y la Ciberseguridad, indispensable para salvaguardar la integridad, privacidad y confiabilidad de los sistemas que utilizamos. Administrar cientos de miles de millones de parámetros y atender a millones de usuarios mensuales no sería posible sin la integración armónica de estas tres dimensiones tecnológicas.

Mientras estas líneas se escriben, nuevos modelos, plataformas y competidores emergen en tiempo real: tecnologías como Gemini (antes Bard), Claude, Llama y otras iniciativas globales enriquecen el ecosistema y demuestran que la innovación en IA es dinámica, diversa y cada vez más accesible. Sin embargo, su adopción efectiva requiere algo más que entusiasmo: demanda una formación sólida, un aprendizaje acelerado y la capacidad crítica para comprender no solo cómo funcionan estas herramientas, sino también sus implicaciones éticas, sociales y científicas.

En este contexto, para la comunidad académica y científica recae una responsabilidad especial. Somos mediadores entre la tecnología y la sociedad; debemos analizar, cuestionar, contextualizar y orientar el uso adecuado de estas herramientas. Nuestro papel es impulsar su apropiación consciente, promover su análisis riguroso y formar a nuevas generaciones capaces de utilizarlas, mejorarlas e incluso replantearlas.

Este libro es, precisamente, una aportación en esa dirección. Reúne trabajos cuidadosamente seleccionados que exploran la IA, los Datos Masivos y la Protección Digital desde perspectivas diversas pero complementarias. Presenta investigaciones actuales, propuestas metodológicas, reflexiones críticas y aplicaciones prácticas en campos que van desde la educación y la industria hasta la medicina y la ingeniería de software.

Nuestra intención es que esta obra sirva como referencia académica, punto de partida para nuevas investigaciones y fuente de inspiración para estudiantes, docentes y profesionales que buscan profundizar en las tecnologías que están moldeando el presente y definiendo el futuro.

Invitamos al lector a recorrer estas páginas con una mirada curiosa y abierta. La computación contemporánea no es solo un conjunto de herramientas: es un ecosistema en efervescencia, un campo de posibilidades y un espacio donde la creatividad, el rigor y la innovación se encuentran para transformar la realidad.

**María del Carmen Santiago Díaz  
Gustavo Trinidad Rubín Linares**

# **Sensor de Evaluación de Calidad del Aire en Ambientes Interiores por medio de IoT**

## **IoT-Based Sensor for Indoor Air Quality Assessment**

Bárbara Emma Sánchez Rinza<sup>1</sup>, Gabriela Martínez Rosas<sup>2</sup>, Marco Antonio Mora Ramírez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Claudio. C.P. 7200 Puebla, Pue., México.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias De La Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Claudio. C.P. 7200 Puebla, Pue., México.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Claudio. C.P. 7200 Puebla, Pue., México.

barbara.sanchez@correo.buap.mx, mr224470259@alm.buap.mx,  
marco.morar@correo.buap.mx

### **Abstract**

This work proposes the development of a distributed system to evaluate indoor air quality, using a BME680 environmental sensor and an ESP32 microcontroller with Wi-Fi connectivity. The device will enable real-time measurement of parameters such as temperature, humidity, atmospheric pressure, and volatile organic compounds (VOC) index, providing useful information about the state of the indoor environment. The system will be oriented toward remote data visualization through a simple mobile application, facilitating its application in homes, classrooms, offices, among others, and promoting the integration of IoT technologies in environmental monitoring.

### **Resumen**

Este trabajo propone el desarrollo de un sistema distribuido para evaluar la calidad del aire en espacios cerrados, utilizando un sensor ambiental BME680 y un microcontrolador ESP32 con conectividad Wi-Fi. El dispositivo permitirá medir en tiempo real parámetros como temperatura, humedad, presión atmosférica e índice de compuestos orgánicos volátiles (VOC), proporcionando información útil sobre el estado del ambiente interior. El sistema estará orientado a la visualización remota de los datos a través de una aplicación móvil sencilla, favoreciendo su aplicación en hogares, salones escolares, oficinas, entre otros, y fomentando la integración de tecnologías IoT en el monitoreo ambiental.

Keywords and phrases: Internet de las Cosas, Arduino, Calidad del Aire.

## **1 Introducción**

La calidad del aire es un aspecto fundamental para garantizar condiciones saludables en espacios interiores. En lugares donde las personas pasan varias horas al día o donde se concentran diversas actividades, como hogares, oficinas o salones escolares, una ventilación deficiente puede afectar la concentración e incluso provocar molestias como fatiga, dolores de cabeza, dificultad para concentrarse e incluso complicaciones respiratorias a largo plazo. A pesar de que estos cambios en el ambiente no siempre son perceptibles a simple vista, su impacto en la salud y el confort diario puede ser significativo [1]. Por ello, resulta necesario contar con herramientas accesibles que permitan monitorear y evaluar constantemente la calidad del aire en interiores, con el fin de tomar decisiones oportunas que mejoren las condiciones del entorno.

Para atender esta problemática, se plantea la implementación de un sistema de monitoreo ambiental diseñado específicamente para espacios interiores, el cual estará conformado por un microcontrolador ESP32 y un sensor ambiental BME680. Se propone ya que, se ha documentado que la tecnología de IoT puede permitir el monitoreo de la calidad del aire en espacios interiores con sensores económicos [2]. Sin embargo, a diferencia de otros estudios que se centran en innovaciones tecnológicas o en sensores avanzados, este trabajo se enfoca en su aplicación práctica. El prototipo no pretende presentar un dispositivo nuevo ni una metodología inédita, sino ofrecer una solución funcional, accesible y fácil de replicar. Su valor principal reside en servir como herramienta educativa y de transferencia tecnológica, mostrando cómo componentes IoT al alcance de todos pueden integrarse en entornos cotidianos como escuelas, hogares u oficinas. De este modo, el proyecto acerca el monitoreo ambiental a lugares donde habitualmente no existen sistemas especializados, fomentando la apropiación social de la tecnología y promoviendo una mayor conciencia sobre la calidad del aire interior.

Este sistema propuesto funcionará mediante el uso de conectividad Wi-Fi, aprovechando las capacidades del microcontrolador ESP32, que se encargará de recolectar los datos ambientales proporcionados por el sensor BME680. Este sensor permite medir temperatura, humedad, presión atmosférica e índice de compuestos orgánicos volátiles (VOC). Una vez obtenidos los datos, el ESP32 los enviará a un servidor MQTT, donde quedarán almacenados y disponibles para su consulta. Posteriormente, una aplicación móvil se conectará a este servidor para procesar y visualizar la información en tiempo real, facilitando así el monitoreo continuo y accesible del ambiente interior desde cualquier dispositivo con conexión a internet.

## **2 Marco de Referencia**

La calidad del aire, tanto en interiores como en exteriores, se ha convertido en un tema crítico por su impacto directo en la salud pública. Organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) señalan la importancia de mantener bajo control las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ya que niveles elevados pueden provocar el denominado Síndrome del Edificio Enfermo, con efectos negativos en el bienestar de las personas que habitan o trabajan en espacios cerrados [3] [4]. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) también ha establecido lineamientos que regulan contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono, ozono y material particulado, con el fin de proteger tanto la salud humana como el medio ambiente [5].

Ante este panorama, el uso de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en el monitoreo ambiental ha crecido de manera significativa, pues ofrece la posibilidad de medir en tiempo real parámetros

como VOC, CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad, con soluciones más accesibles y escalables. Diversos trabajos recientes muestran avances notables en este campo, entre los que se encuentran autores como Lozano Mendoza et al [6] que diseñaron e implementaron un sistema basado en IoT que mide monóxido de carbono y material particulado en Quevedo, Ecuador, con un sistema accesible en línea para la visualización y análisis de datos. De manera similar, Gueye et al [7] propusieron un sistema basado en microcontroladores ESP8266, capaz de medir contaminantes atmosféricos en tiempo real con resultados precisos, lo que demuestra su viabilidad para aplicaciones a gran escala. Por otro lado, Barot y Kapadia [8] realizaron una revisión amplia sobre sistemas IoT aplicados al monitoreo de la calidad del aire, donde destacaron su potencial, pero también los principales retos relacionados con la escalabilidad y los costos.

Aunque estas investigaciones representan un progreso en el área, en la aplicación se enfrentan desafíos relevantes, principalmente el costo de los sensores y la dificultad de llevar las soluciones a gran escala, lo que reduce su impacto en contextos con recursos limitados o en proyectos de gran alcance. Estos desafíos refuerzan la necesidad de continuar investigando y desarrollando sistemas IoT más eficientes, accesibles y adecuados para un monitoreo integral de la calidad del aire.

En conclusión, la integración de tecnologías IoT en la medición de parámetros ambientales, alineada con normativas internacionales y nacionales, resulta esencial para prevenir riesgos a la salud y promover entornos más sostenibles. Sin embargo, para que estas soluciones tengan un impacto real, es indispensable que los equipos sean accesibles, de bajo costo y fáciles de implementar en contextos cotidianos como hogares, escuelas u oficinas. En este sentido, el prototipo que propone busca aportar una alternativa práctica y replicable, que ofrezca tanto funcionalidad como accesibilidad económica.

### **3 Metodología**

Para llevar a cabo este proyecto, se diseñó una estrategia de trabajo centrada en la integración de componentes electrónicos, el desarrollo del software necesario para su funcionamiento y la implementación de un sistema de comunicación que permitiera acceder a los datos de forma remota.

En una primera etapa, se seleccionaron los componentes electrónicos necesarios, destacando el uso del microcontrolador ESP32 y el sensor ambiental BME680, los cuales permiten medir variables como temperatura, humedad, presión atmosférica y compuestos orgánicos volátiles (VOC). Posteriormente, se desarrolló el código que permite la lectura de datos del sensor y su transmisión mediante una red inalámbrica. Para ello, se configuró la conexión del dispositivo a internet utilizando la conectividad Wi-Fi del ESP32, y se estableció un protocolo de comunicación adecuado para el envío de datos a un servidor.

Una vez establecidos los canales de transmisión, se diseñó una interfaz básica para la visualización de los datos en tiempo real desde una aplicación móvil. Esto permite a los usuarios acceder a la información de manera sencilla y remota, facilitando el monitoreo continuo del ambiente interior. El conjunto de estas etapas hizo posible la construcción de un sistema funcional de monitoreo ambiental, capaz de operar en tiempo real y adaptable a distintos contextos como hogares, oficinas o espacios escolares.

### **4 Desarrollo**

En este apartado se describe el proceso seguido para la construcción del prototipo del sistema de monitoreo de la calidad del aire. Se presenta una visión general de los elementos que lo conforman, tanto física como lógica. Por un lado, se detallan los componentes electrónicos seleccionados y su función dentro del sistema; por otro, se explica el diseño de la estructura de comunicación y la forma en que los datos recolectados son procesados y visualizados.

#### 4.1 Componentes del prototipo

El prototipo desarrollado se basa en dos componentes electrónicos principales: el microcontrolador ESP32 y el sensor ambiental BME680. Ambos dispositivos trabajan de manera conjunta para permitir la medición de variables relacionadas con la calidad del aire y la transmisión de estos datos a una plataforma de visualización remota. A continuación, se describen sus características y funciones dentro del sistema.

- Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo consumo energético que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Cuenta con un procesador dual-core de 32 bits, una arquitectura flexible y múltiples interfaces de entrada/salida (GPIO) [9], que facilitan la conexión directa con sensores y otros dispositivos periféricos (ver Fig. 1).



Figura 1. Microcontrolador ESP32 con comunicación Wifi.

En este proyecto, el ESP32 cumple una doble función: por un lado, se encarga de la lectura y el procesamiento de los datos generados por el sensor BME680; por otro, gestiona la conexión a la red Wi-Fi para transmitir dicha información al servidor MQTT. Su capacidad de operar de forma autónoma, junto con su bajo consumo de energía, lo convierte en una solución eficiente y confiable para este sistema de monitoreo.

- Sensor ambiental BME680

El BME680 es un sensor digital multifuncional desarrollado por Bosch, capaz de medir cuatro variables ambientales clave: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica e índice de compuestos orgánicos volátiles (VOC). Este se comunica mediante protocolos digitales I2C o SPI, lo que facilita su integración con microcontroladores como el ESP32 [10]. Su diseño compacto y bajo consumo energético lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones portátiles o sistemas embebidos (ver Fig. 2).

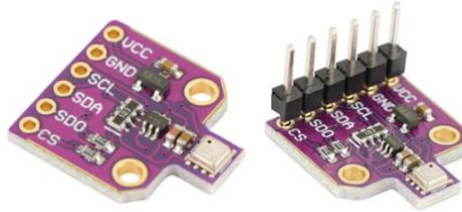


Figura 2. Sensor de calidad del aire BME680.

En este proyecto, el BME680 es el componente principal para la adquisición de datos ambientales, proporcionando información precisa y en tiempo real para evaluar las condiciones del entorno monitoreado.

#### 4.2 Arquitectura del sistema

Este apartado presenta la arquitectura general del sistema de monitoreo desarrollado, mostrando cómo se integran los distintos componentes para garantizar la recolección, transmisión y visualización de los datos ambientales.

La arquitectura se basa en un modelo distribuido, en el cual los elementos físicos y digitales interactúan a través de una red inalámbrica. El sensor BME680 está conectado al microcontrolador ESP32, encargado de recolectar las mediciones, a través de su módulo Wi-Fi, el ESP32 envía los datos al servidor de aplicación, el cual almacena y gestiona la información. Finalmente, un cliente móvil accede a estos datos de forma remota, permitiendo al usuario visualizar el estado del ambiente en tiempo real mediante una interfaz sencilla (ver Fig.3).

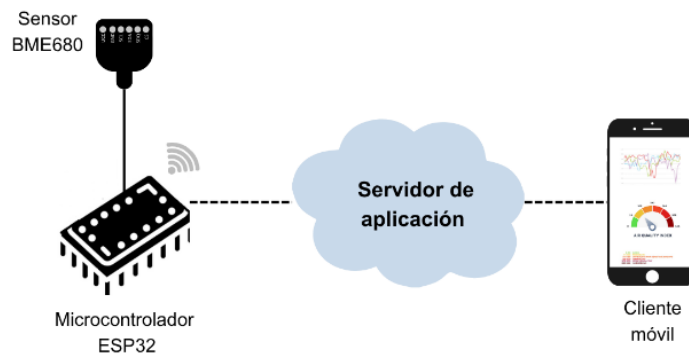


Figura 3. Componentes del sistema.

- Lectura y envío de datos

El proceso de lectura y envío de datos está programado en el microcontrolador ESP32 y define la lógica operativa del sistema. Este procedimiento garantiza la obtención continua de variables ambientales y su transmisión hacia el servidor para su posterior visualización.

Como se muestra en el diagrama de flujo (ver Fig. 4), el sistema inicia estableciendo conexión con la red Wi-Fi y con el servidor MQTT. Si ambas conexiones son exitosas, se realiza la lectura de los datos proporcionados por el sensor BME680. Estos datos se procesan y se envían al servidor

mediante el protocolo MQTT. Posteriormente, el sistema entra en un ciclo de espera de 30 segundos antes de repetir el procedimiento. En caso de que alguna de las conexiones falle, se reinicia el intento de conexión, manteniendo la continuidad del sistema.

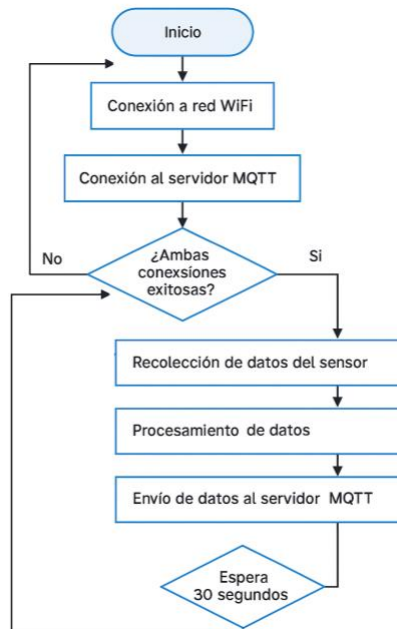


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de lectura y envío de datos.

- Comunicación del sistema

La comunicación del sistema se basa en una arquitectura cliente-servidor distribuida, que permite el envío, almacenamiento y consulta remota de los datos. Para este fin, se implementa el protocolo de mensajería MQTT, el cual es adecuado para aplicaciones IoT por su eficiencia en redes con recursos limitados.

En este sentido para el prototipo, el microcontrolador ESP32 envía los datos obtenidos del sensor BME680 a través de un broker MQTT, que actúa como intermediario entre el dispositivo y el servidor. El servidor cuenta con un servicio MQTT que suscribe y recibe los mensajes publicados, almacenándolos en una base de datos. Posteriormente, esta información es accesible desde un cliente móvil mediante un servicio API WEB, que consulta la base de datos y permite visualizar los datos en tiempo real (ver Fig. 5).

Esta arquitectura facilita una comunicación eficiente, escalable y desacoplada entre los distintos componentes del sistema.

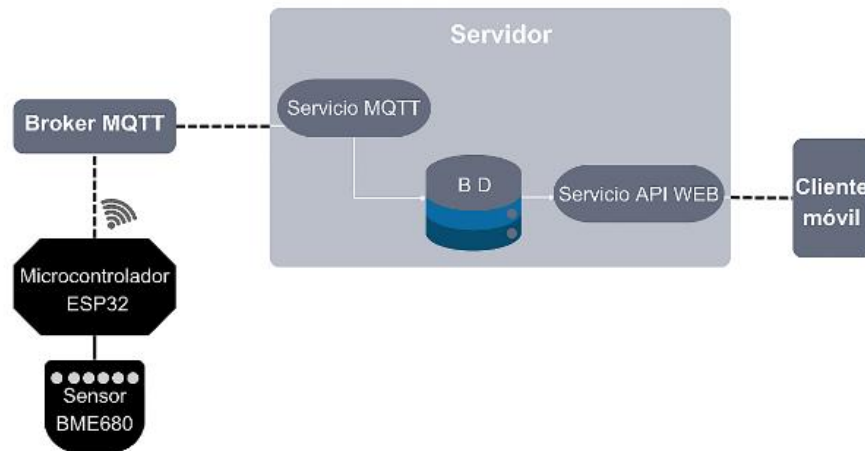


Figura 5. Comunicación del sistema.

## 5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la implementación y prueba del sistema de monitoreo de calidad del aire. Se documenta el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema, desde la conexión física del prototipo hasta la comunicación entre dispositivos, la transmisión de datos al servidor y su posterior almacenamiento y consulta mediante una aplicación móvil desarrollada específicamente para este fin. En este sentido se incluyen recursos gráficos del funcionamiento correcto de los módulos, con el objetivo de demostrar que el sistema cumple con los requerimientos definidos y permite la supervisión remota de variables ambientales en tiempo real.

- Ensamble físico del prototipo

Para iniciar la fase de pruebas, se realizó el montaje físico del prototipo, conectando el sensor ambiental BME680 al microcontrolador ESP32. La conexión entre ambos dispositivos se efectuó a través de los pines GPIO del ESP32, utilizando el protocolo de comunicación I2C, el cual permite la transmisión digital eficiente de datos. El montaje se realizó sobre una placa de pruebas (protoboard), permitiendo una conexión rápida y segura durante la etapa de validación del sistema (ver Fig. 6).

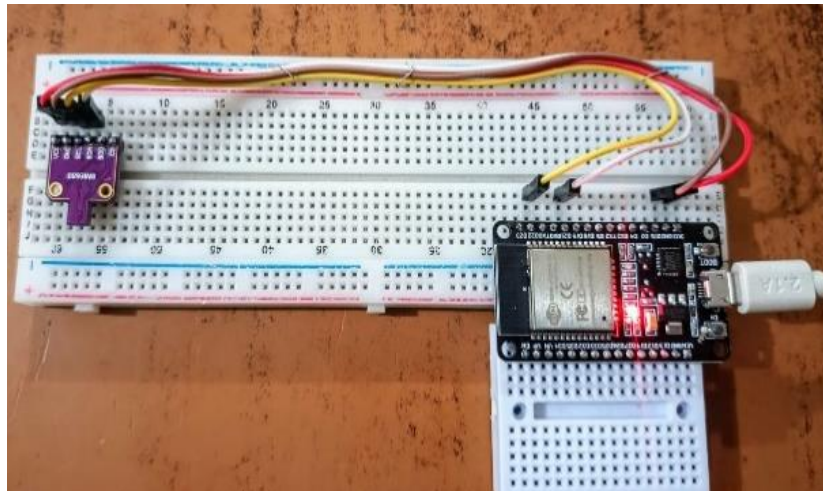


Figura 6. Sensor conectado con el microcontrolador.

- Programa cargado a la ESP32

El microcontrolador ESP32 fue programado utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, empleando librerías específicas para la lectura del sensor BME680, la conexión a redes Wi-Fi y la comunicación mediante el protocolo MQTT (ver Fig. 7).

```

calidad_aire_v2 | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
calidad_aire_v2.ino
101 espClient.setCACert(ca_cert); // Asigna el certificado CA
102 client.setServer(mqttServer, mqttPort);
103 reconnectMQTT();
104 }
105
106 void loop() {
107   if (!client.connected()) {
108     reconnectMQTT();
109   }
110   client.loop();
111
112   if (!aqSensor.run()) { // Si hay nuevos datos del sensor
113     if (bme.performReading()) {
114       unsigned long currentTime = millis();
115       if (currentTime - lastSendTime >= interval) {
116         sendDataToMQTT();
117         lastSendTime = currentTime;
118       }
119     }
120   }
121 }
Serial Monitor x
Message (Enter to send message to ESP32 Dev Module on 'COM2')
New Line 115200 baud
{"Iaq":150,"Iaq_accuracy":10,"co2_eq":600,"bvoc_eq":0.499999851,"gaa_resistance":111398.5313,"temperature":25.51139832,"pressure":1792.56,"humidity":45.33416367,"status":
Datos sensor a MQTT:
{"Iaq":150,"Iaq_accuracy":10,"co2_eq":600,"bvoc_eq":0.499999851,"gaa_resistance":111398.5313,"temperature":25.51139832,"pressure":1792.56,"humidity":45.33416367,"status":
  
```

Figura 7. Programa cargado en la ESP32 para la captura y envío al servidor MQTT.

- Código del servicio MQTT

El servicio MQTT fue desarrollado para recibir los datos enviados por el microcontrolador ESP32 a través del protocolo MQTT. El fragmento de código mostrado en la figura 8 implementa el método OnMessageReceivedAsync, que se ejecuta automáticamente cada vez que se recibe un mensaje en el tópico suscrito.

El código también incluye manejo de excepciones para capturar errores tanto en la deserialización como en el procesamiento general del mensaje, lo que mejora la robustez del servicio.

```
180 {
181 }
182
183 private static async Task OnMessageReceivedAsync(MqttApplicationMessageReceivedEventArgs e)
184 {
185     try
186     {
187         // Decodificar el mensaje
188         string payload = Encoding.UTF8.GetString(e.ApplicationMessage.Payload);
189         string topic = e.ApplicationMessage.Topic;
190         Console.WriteLine($"{DateTime.Now:yyyy-MM-dd HH:mm:ss} Mensaje recibido del t\u00f3pico '{topic}':");
191         Console.WriteLine($"Datos: {payload}");
192
193         // Deserializar los datos JSON
194         var sensorData = JsonConvert.DeserializeObject<Bme680Data>(payload);
195
196         // Guardar en la base de datos
197         await SaveToDatabase(sensorData);
198
199         Console.WriteLine("Datos guardados en la base de datos.\n");
200     }
201     catch (JsonException ex)
202     {
203         Console.WriteLine($"Error al deserializar JSON: {ex.Message}");
204     }
205     catch (Exception ex)
206     {
207         Console.WriteLine($"Error al procesar el mensaje: {ex.Message}");
208     }
209 }
```

Figura 8. C\u00f3digo servicio MQTT.

El funcionamiento del servicio encargado de recibir, procesar y almacenar los datos transmitidos por el microcontrolador. El sistema decodifica los mensajes entrantes, extrae la informaci\u00f3n del sensor y la guarda autom\u00e1ticamente en la base de datos (ver Fig. 9).

```
Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

Instale la versi\u00f3n m\u00e1s reciente de PowerShell para obtener nuevas caracter\u00edsticas y mejoras. https://aka.ms/PSWindows

PS C:\Users\hnp> cd ..
PS C:\Users> cd ..
PS C:\> cd esp32
PS C:\esp32> cd ServicioMQTT
PS C:\esp32\ServicioMQTT> .\ServicioMQTT.exe
=== Aplicaci\u00f3n MQTT-SQLite para Sensor BME680 ===
Presiona 'q' para salir

Base de datos inicializada correctamente.
Certificado SSL cargado...
Conectando al broker MQTT...
Conectado al broker MQTT exitosamente.
Suscrito al t\u00f3pico: esp32/bme680
Esperando datos del sensor BME680...

[2025-06-05 22:42:13] Mensaje recibido del t\u00f3pico 'esp32/bme680':
Datos: {"iaq":48.43037033,"iaq_accuracy":1,"co2_eq":597.2573853,"bvoc_eq":0.492286444,"gas_resistance":186452.5156,"temperature":25.73690414,"pressure":792.68,"humidity":45.75801468,"status":0}
Datos guardados en la base de datos.
```

Figura 9. Ejecuci\u00f3n del c\u00f3digo del servicio MQTT.

- Base de datos

Visualizaci\u00f3n del contenido de la base de datos local en formato SQLite, donde se almacenan autom\u00e1ticamente los datos ambientales capturados por el sensor BME680. Cada registro incluye un sello de tiempo y valores correspondientes a temperatura, humedad, presi\u00f3n, resistencia de gas, y estimaciones de compuestos org\u00e1nicos vol\u00e1tiles (VOC), entre otros, los cuales son recibidos desde el microcontrolador a trav\u00e9s del servicio MQTT. (ver Fig. 10).

id	timestamp	iqc	iqc_accuracy	co2_m3	bvoc_m3	gas_resistance	temperature	pressure	humidity	status	
14	2025-06-06 04:45:15.04256492	50.99334122	50	1	601.7182007	0.504693601	191919.8281	25.71154693	792.72	44.8282547	0
13	2025-06-06 04:44:44.04201882	50.0	50	1	600.0	0.499999951	191919.8281	25.72930334	792.72	44.87292099	0
12	2025-06-06 04:44:13.98160992	50.03379059	50	1	600.059082	0.500167251	190914.7969	25.72930334	792.71	44.97634888	0
11	2025-06-06 04:43:43.91439092	50.20444107	50	1	600.3572388	0.500131339	189936.0	25.73436928	792.71	44.92826462	0
10	2025-06-06 04:43:13.86315122	50.26610947	50	1	600.4649659	0.501319528	186466.4688	25.74703979	792.71	45.06977463	0
9	2025-06-06 04:42:43.14667112	50.0	50	1	600.0	0.499999951	186036.7813	25.75210571	792.71	45.29582596	0
8	2025-06-06 04:42:14.81504622	48.43037033	50	1	597.2573853	0.492286444	186482.6156	25.73690414	792.68	45.75801468	0
7	2025-06-03 08:19:30.66634732	50.0	50	0	600.0	0.499999951	201217.75	24.66766167	791.77	57.01125336	0
6	2025-06-03 08:19:00.43349892	50.0	50	0	600.0	0.499999951	199262.5938	24.70564675	791.78	57.08803558	0
5	2025-06-03 08:18:30.22802142	50.0	50	0	600.0	0.499999951	196517.6719	24.70564675	791.78	56.76367569	0
4	2025-06-03 08:17:59.94210112	50.0	50	0	600.0	0.499999951	192482.75	24.70820236	791.81	56.71218109	0
3	2025-06-03 08:17:29.80258462	50.0	50	0	600.0	0.499999951	186466.4688	24.67524245	791.81	56.83069992	0
12	2025-06-03 08:15:58.9972482	50.0	50	0	600.0	0.499999951	132460.4688	24.6853961	791.86	57.63129425	0
1	2025-06-03 08:15:29.40627632	50.0	50	0	600.0	0.499999951	83327.50781	24.60685158	791.9	58.42893982	0

Figura 10. Base de datos donde se guarda la información transmitida por el ESP32 a través del servicio MQTT.

- Servicio API WEB

El servicio API Web, está encargado de gestionar la consulta de los datos ambientales almacenados en la base de datos. Por lo tanto, este servicio en el proyecto permite que la aplicación móvil acceda a los datos de forma eficiente, asegurando disponibilidad y claridad en la presentación de la información. (ver Fig. 11 y 12).

```

40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

Figura 11. Código del servicio API WEB.

```

{"Success":true,"Message":"Último dato obtenido exitosamente","Data":{"Id":390,"Timestamp":"2025-06-06T00:45:15.04256492","Iqc":50.99499768,"IqcAccuracy":3,"Co2Eq":651.6716919,"BvocEq":0.670160472,"GasResistance":186244.4219,"Temperature":26.42609024,"Pressure":789.98,"Humidity":43.0417554060670408:39.6133323-04-00"}

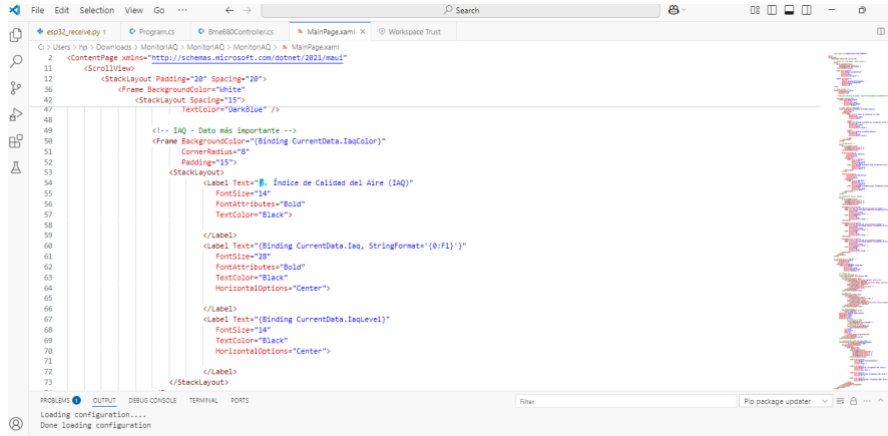
```

Figura 12. Ejecución del servicio API WEB.

## Aplicación móvil

Como parte final del sistema desarrollado, se implementó una aplicación móvil que permite a los usuarios visualizar en tiempo real los datos recolectados por el sensor BME680 y procesados a

través del microcontrolador ESP32. Esta aplicación consulta los datos almacenados en la base de datos mediante el servicio API Web, proporcionando una interfaz accesible y clara para el monitoreo. Su objetivo es facilitar la consulta remota y la interpretación sencilla de los datos para una toma de decisiones informada (ver Fig. 13).



```
<ContentPage xmlns="http://schemas.microsoft.com/dotnet/2021/maui">
  <ScrollView>
    <StackLayout Padding="20" Spacing="20">
      <Frame BackgroundColor="White">
        <StackLayout Spacing="15">
          <Text>Índice de Calidad del Aire</Text>
          <!-- IAQ - Data más importante -->
          <Frame BackgroundColor="{Binding CurrentData.IAQColor}"
                CornerRadius="8"
                Padding="15">
            <StackLayout>
              <Label Text="Índice de Calidad del Aire (IAQ)"
                    FontSize="14"
                    FontAttributes="Bold"
                    TextColor="Black">
              <Label>
                <Label Text="{Binding CurrentData.IAQ, StringFormat="(0.F1)"}"
                    FontSize="20"
                    FontAttributes="Bold"
                    TextColor="Black"
                    HorizontalOptions="Center">
              <Label>
                <Label Text="{Binding CurrentData.IAQLevel}"
                    FontSize="14"
                    TextColor="Black"
                    HorizontalOptions="Center">
            </StackLayout>
          </Frame>
        </StackLayout>
      </Frame>
    </StackLayout>
  </ScrollView>
</ContentPage>
```

Figura 13. Código Aplicación móvil

- Ejecución de la aplicación

La interfaz de la aplicación móvil se divide en dos secciones principales. La primera está dedicada a mostrar los datos recopilados por el sensor en tiempo real. En el caso de la calidad del aire, se presenta un recuadro que incluye el valor numérico y un indicador visual por color (verde, amarillo o rojo) que facilita la interpretación del nivel de calidad del aire de forma rápida y accesible. Junto a este recuadro, se muestran también los valores de CO<sub>2</sub> y compuestos orgánicos volátiles (VOC), expresados en partes por millón (ppm), lo que permite un monitoreo más completo de las condiciones ambientales.

Así mismo, tiene en una parte más pequeña, iconos acompañados de los valores de humedad, temperatura y presión atmosférica, complementando así la información ambiental disponible para el usuario (ver Fig. 14).



Figura 14. Primera sección de la interfaz de la aplicación móvil.

En la segunda sección se presenta un gráfico de tendencias que muestra la evolución de los datos durante la última hora. Debajo del gráfico, se incluye una tabla con el detalle de estos datos,

ordenados de forma descendente para facilitar su consulta y análisis en tiempo real. (ver Fig. 15).

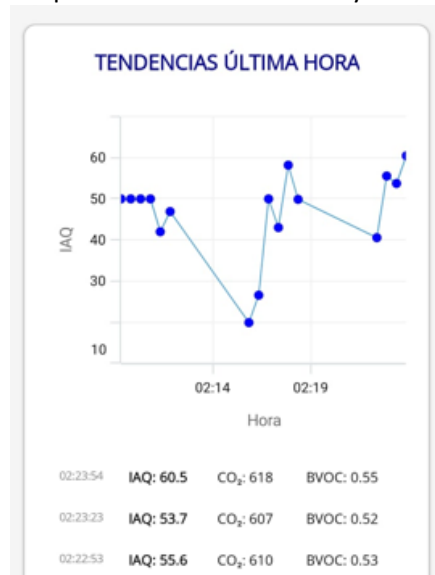


Figura 15. Segunda sección de la interfaz de la aplicación móvil.

- Prueba de respuesta ante compuestos orgánicos volátiles

Se realizó una prueba experimental para verificar la sensibilidad del sensor BME680 ante la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Para ello, se roció un aerosol con perfume cerca del dispositivo. Este tipo de producto contiene sustancias como alcoholes y fragancias sintéticas, que fueron detectadas por el sensor, generando un cambio inmediato en el valor del índice de calidad del aire. Esta prueba confirmó el correcto funcionamiento del sistema frente a variaciones en el ambiente interior (ver Fig. 16).

#### Monitor IAQ



Figura 16. Calidad del aire “Moderadamente y Extremadamente contaminada”.

#### Consideraciones de Seguridad

El prototipo desarrollado utiliza actualmente MQTT sin cifrado ni codificación, lo que significa que la información enviada por el sistema podría ser visible para terceros que tengan acceso a la red, sin garantías de confidencialidad ni protección frente a accesos no autorizados. Aunque esta configuración es suficiente para fines de prueba y demostración, en futuras versiones del sistema se considerarán medidas que refuercen la seguridad y la privacidad de los datos.

Entre las mejoras previstas se incluirán el cifrado de la comunicación mediante TLS, la autenticación de los usuarios, el resguardo seguro de la base de datos y el establecimiento de controles de acceso diferenciados en la aplicación. La implementación de estas medidas permitirá que el sistema no solo cumpla su función de manera efectiva, sino que también sea confiable y seguro para su uso en entornos reales, protegiendo tanto la integridad de los datos como la privacidad de los usuarios. La incorporación de estas medidas no solo fortalecerá la privacidad y la integridad de los datos, sino que también permitirá que el sistema evolucione hacia una solución más robusta y confiable. De esta manera, será posible transitar de un prototipo de validación académica a una herramienta tecnológica aplicable en entornos reales, donde la seguridad de la información representa un requisito indispensable.

## 6 Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se implementó con éxito un sistema distribuido capaz de monitorear en tiempo real la calidad del aire en espacios interiores. A través de la integración de diversas tecnologías (el microcontrolador ESP32, el sensor BME680, protocolos de comunicación MQTT y una aplicación móvil) fue posible diseñar una solución funcional que permite registrar, enviar y visualizar parámetros ambientales en tiempo real y de forma confiable.

El sistema desarrollado se consolidó como una herramienta práctica para evaluar condiciones ambientales, lo que puede contribuir a mejorar la toma de decisiones relacionadas con la salud y el confort en espacios cerrados. No obstante, el prototipo también presenta algunas limitaciones que deben reconocerse. Entre ellas se encuentra la falta de calibración frente a equipos de referencia especializados, lo que restringe la validación cuantitativa de los resultados obtenidos. Asimismo, la dependencia de la conectividad Wi-Fi podría afectar su funcionamiento en entornos con infraestructura de red inestable. Otro aspecto pendiente es la seguridad en la transmisión de datos, ya que el sistema emplea protocolos básicos sin cifrado ni autenticación. Estas consideraciones abren la puerta a futuras mejoras, como la incorporación de esquemas de cifrado y control de acceso, la realización de pruebas comparativas con equipos de referencia y un análisis más profundo de las variables recolectadas para reforzar la confiabilidad y aplicabilidad del sistema.

A futuro, el proyecto puede ampliarse mediante mejoras a la aplicación móvil, como la incorporación de alertas personalizadas o visualizaciones más detalladas del historial de datos.

## Referencias

[1] Zavala, A. M. (2024). El Síndrome del Edificio Enfermo en los talleres de la FABUAP. Percepción de las afectaciones a la salud y Calidad del Ambiente Interior. Puebla, México. Puebla, México: Benemerita Universidad Atonoma de Puebla .

[2] Wall, D., McCullagh, P., Cleland, I., & Bond, R. (2021). Desarrollo de una solución de Internet de las Cosas para monitorizar y analizar la calidad del aire interior . Internet of Things. doi:<https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100392>

[3] OMS. (2021). Guía para la calidad del aire y salud. Retrieved from Organización Mundial de la Salud.

[4] ASHRAE. (2019). Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Retrieved from

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[5] SEMARNAT. (2012). NOM-156-SEMARNAT-2012, Norma para Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire. Retrieved from Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. DOF.

[6] Lozano-Mendoza, P. H., Nieto-Cañarte, C. A., Vélez-Ruiz, M. C., Puente-Bósquez, S. M., Bosquez-Mestanza, A. L., & García-Gallirgos, V. J. (2025). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo para contaminantes atmosféricos en Quevedo, Ecuador. *South Florida Journal of Development*. doi:<https://doi.org/10.46932/sfjdv6n2-013>

[7] Gueye, A., Simina, D. M., & Aziz, N. S. (2024). A low-cost IoT-based real-time pollution monitoring system using ESP8266 NodeMCU. *Measurement*. doi:<https://doi.org/10.1177/00202940241306690>

[8] Barot, V., & Kapadia, V. (2021). Air Quality Monitoring Systems using IoT: A Review. *International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, 226-231. doi:<https://doi.org/10.1109/compe49325.2020.9200053>

[9] Relekar, S. P., & Renke, A. L. (2025). Design and Implementation of an IoT-Based Air Quality Monitoring System using ESP32. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 324-330.

[10] Bajpai, N., Kotangale, K., & Bhaire, A. (2024). Advanced Ambiance Sensing Device using ESP32 and BME680. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 32-36.

# **Protocolo de Pruebas para un Nanosatélite Didáctico**

## **Test Protocol for a Didactic Nanosatellite**

Javier Alonso López Quintero, María del Carmen Santiago Díaz, Ana Claudia Zenteno  
Vázquez, Gustavo Trinidad Rubín Linares

Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

javier.lopezqu@alumno.buap.mx, marycarmen.santiago@correo.buap.mx,  
ana.zenteno@correo.buap.mx, gustavo.rubin@correo.buap.mx

### **Abstract**

Test Protocol for a Didactic Nanosatellite: The development of environmental measurement systems and wireless communications is a rapidly developing area at the forefront of sophisticated technologies due to the critical processing involved. Consequently, the development of CanSat nanosatellites has been fostered across all latitudes, creating conditions for application in the aforementioned fields. Aeronautical and aerospace technology has always set technological trends in all other areas and current scientific currents. This work compares the characteristics of these didactic nanosatellites to present a realistic overview of the variables that must be considered and analyzed for the design, without considering the specific applications for which it will be intended.

### **Resumen**

El desarrollo de sistemas de mediciones ambientales y comunicaciones inalámbricas es un área de gran desarrollo y que se encuentra en la cúspide de las tecnologías más sofisticadas debido al procesamiento crítico de estos sistemas, por lo cual el desarrollo de nanosatélites CanSat se ha propiciado en todas las latitudes además de generar condiciones para la aplicación en los campos mencionados, la tecnología aeronáutica y aeroespacial ha siempre marcado las tendencias tecnológicas en todas las demás áreas y corrientes científicas actuales, en este trabajo se comparan las características de estos nanosatélites didácticos a fin de presentar un panorama real de las variables que se deben considerar y analizar para el diseño sin considerar las aplicaciones específicas a que será destinado.

Keywords and phrases: CanSat, Computadora a Bordo, Carga Útil, Telemetría.

## **1 Introducción**

En 1969, la misión Apolo 11 marcó un hito histórico, demostrando el pináculo de la ciencia y la ingeniería de su tiempo al llevar a los primeros seres humanos a la Luna. Más de medio siglo después, la tecnología ha evolucionado de manera exponencial. Proyectos educativos modernos, como los satélites del tamaño de una lata (CanSat), incorporan tecnologías de computación y sensores que superan ampliamente las capacidades de *toda* la electrónica utilizada en aquella histórica misión lunar.

La revolución del CanSat: tecnología asequible, desafíos eternos

El programa CanSat es un excelente ejemplo de esta revolución tecnológica. Estos dispositivos, lo suficientemente pequeños como para caber en una lata de refresco estándar, han democratizado el acceso al desarrollo aeroespacial a pequeña escala. Estudiantes y entusiastas ahora pueden diseñar y construir sondas completas que integran:

- **Sistemas de navegación y control:** Utilizando modernos microcontroladores y sensores GPS de alta precisión.
- **Comunicación:** Módulos de radiofrecuencia (RF) para telemetría en tiempo real.
- **Adquisición de datos:** Sensores capaces de medir temperatura, presión atmosférica, humedad, radiación UV y calidad del aire.
- **Registro audiovisual:** Cámaras miniaturizadas para capturar el viaje desde altitudes suborbitales.

La comparación de la potencia de procesamiento de un solo microcontrolador de un CanSat con las computadoras de guía de la misión Apolo 11, aunque no busca minimizar el valor de ese logro histórico, resalta cómo la tecnología se ha miniaturizado y potenciado. Lo que antes requería una inversión nacional masiva, ahora es accesible a nivel de aula.

El desafío Inmutable de la ingeniería: la protección ambiental

Sin embargo, esta disparidad tecnológica revela una verdad fundamental y un desafío persistente en la ingeniería aeroespacial: aunque la electrónica moderna es inmensamente más potente, el mayor reto técnico sigue siendo el mismo que enfrentó la misión Apolo 11: la protección de los sistemas en entornos extremos.

Para los proyectos CanSat, que son transportados por globos de gran altitud, drones o pequeños cohetes, la meta ya no es la Luna, sino un objetivo más cercano y alcanzable: la estratosfera. Alcanzar estas altitudes implica enfrentarse a condiciones severas:

- **Temperaturas glaciales:** Que pueden descender por debajo de los -50 °C.
- **Baja presión atmosférica:** Un entorno casi vacío que requiere una gestión térmica y estructural cuidadosa.
- **Aceleraciones extremas:** Durante el lanzamiento y el despliegue del paracaídas.

Estos desafíos de la "supervivencia" del hardware, desde el diseño estructural resistente hasta el aislamiento térmico y la fiabilidad del despliegue del paracaídas, son los problemas de ingeniería fundamentales que conectan los proyectos CanSat actuales con la histórica carrera espacial de los años 60. La tecnología ha cambiado radicalmente, pero las leyes de la física y la necesidad de diseñar para entornos hostiles siguen siendo el núcleo de la ingeniería aeroespacial.

## 2 Marco Teórico

Un CanSat es una simulación de satélite del tamaño de una lata de refresco que integra los subsistemas principales de un satélite real para recopilar datos durante un vuelo suborbital. Los

módulos principales suelen ser el sistema de potencia, el sistema electrónico/computadora de vuelo, los sensores y el sistema de telemetría (comunicación).

Los módulos principales de un CanSat son:

- **Estructura mecánica:** Es el chasis o carcasa que contiene y protege todos los demás componentes dentro del volumen y la forma estipulados (generalmente, las dimensiones de una lata de refresco).
- **Módulo de potencia:** Proporciona el suministro de energía necesario para que todos los sistemas funcionen correctamente, generalmente mediante baterías de polímero de litio.
- **Computadora de vuelo (o módulo electrónico):** Actúa como el "cerebro" del CanSat, controlando las operaciones, procesando los datos de los sensores y gestionando las comunicaciones. A menudo se utiliza una placa microcontroladora como Arduino Pro Mini.
- **Módulo de sensores (carga útil):** Incluye los instrumentos para medir diversos parámetros. La misión primaria suele requerir medir la temperatura y la presión atmosférica, pero se pueden añadir sensores adicionales para misiones secundarias, como altitud, velocidad, aceleración, posición GPS y campo magnético.
- **Módulo de telemetría (comunicación):** Este subsistema se encarga de transmitir los datos recopilados por los sensores a una estación terrestre (ordenador base) en tiempo real, a menudo utilizando módulos de radiofrecuencia.
- **Sistema de recuperación:** Incluye un paracaídas u otro mecanismo para asegurar un descenso seguro y controlado, permitiendo la recuperación del CanSat después de su misión.

Cada uno de estos módulos cumple una función vital para simular las operaciones de un satélite real y llevar a cabo la misión predeterminada.

### 3 Descripción del Protocolo de Pruebas del CanSat

La prueba de los módulos principales de un CanSat requiere un enfoque sistemático para garantizar que cada subsistema funcione de manera independiente y en conjunto, antes del lanzamiento real.

#### 3.1 Módulo de Potencia (Batería y Distribución)

El objetivo es asegurar que todos los componentes reciban el voltaje y la corriente adecuados.

- **Verificación de voltaje:** Utiliza un multímetro para medir el voltaje de la batería antes de conectarla al sistema. Asegúrate de que esté dentro del rango especificado por los fabricantes de tus componentes.
- **Prueba de carga:** Conecta todos los módulos al sistema de potencia y enciéndelo. Mide el voltaje en los puntos de conexión de cada módulo para confirmar que la entrega de energía es estable y que no hay caídas de voltaje significativas.

- **Duración de la batería:** Realiza una prueba de funcionamiento completa (simulando la duración total de la misión, incluyendo el tiempo de espera y el de descenso) para asegurarte de que la batería pueda soportar la misión completa con un margen de seguridad.

### 3.2 Módulo de sensores (carga útil)

El objetivo es verificar que los sensores midan e informen los datos correctamente.

- **Pruebas individuales:** Conecta cada sensor individualmente a la computadora de vuelo (como Arduino) y utiliza el monitor serie para verificar que los datos que arrojan son lógicos (p. ej., la temperatura ambiente actual, la presión atmosférica local, etc.).
- **Simulación de condiciones:**
  - **Temperatura:** Expón el sensor de temperatura a cambios de temperatura (usando agua caliente/fría o un congelador) y verifica que las lecturas cambian de manera acorde y dentro del rango esperado.
  - **Presión/Altitud:** Aunque simular la altitud es difícil, puedes verificar el sensor de presión en diferentes pisos de un edificio o comparando su lectura con una estación meteorológica local.
  - **GPS:** Prueba el módulo GPS en exteriores para confirmar que adquiere la señal y proporciona coordenadas precisas.
- **Integración:** Ensambla todos los sensores en la computadora de vuelo y verifica que todos los datos se recopilan y almacenan/transmiten simultáneamente.

### 3.3 Módulo de comunicaciones (telemetría)

El objetivo es establecer y mantener un enlace de datos confiable con la estación terrestre.

- **Prueba de "Hola Mundo":** Comienza con una prueba simple. Carga un programa en el CanSat que envíe un mensaje de texto simple (ej. "Hola Mundo") repetidamente a través del módulo de radio. En la estación terrestre, verifica que el mensaje se reciba correctamente en el monitor serie.
- **Prueba de rango:** Realiza pruebas de comunicación a diferentes distancias y con posibles obstrucciones (como paredes o edificios) para entender el alcance y la fiabilidad de la señal en el entorno de lanzamiento.
- **Transmisión de datos reales:** Una vez que la prueba básica de comunicación funcione, sustituye el mensaje de prueba por los datos reales de los sensores. Confirma que la estación terrestre recibe e interpreta correctamente todos los datos en tiempo real.

### 3.4 Módulo de recuperación (paracaídas y estructura)

El objetivo es asegurar que el CanSat sobreviva al descenso.

- **Prueba estructural:** Asegúrate de que todos los componentes estén bien fijados dentro de la estructura y que el montaje resista vibraciones y posibles impactos.

- **Prueba de despliegue del paracaídas:** Realiza pruebas de caída a baja altura (desde una ventana o balcón) para verificar que el paracaídas se despliega correctamente y que la velocidad de descenso es segura para el CanSat.
- **Prueba de peso:** Pesa el CanSat completo para asegurarte de que cumple con las restricciones del concurso o los requisitos de diseño.

#### 4 Variables Internas de Control del CanSat

Los rangos de las variables internas de un CanSat dependen en gran medida de los sensores específicos elegidos para la misión y los requisitos del concurso, pero generalmente se miden variables atmosféricas y de movimiento. A continuación se presenta una tabla comparativa con rangos típicos basados en sensores comunes como el BMP280/BME280 y el MPU6050:

Tabla 1. Variables internas del CanSat

<b>Variable Interna</b>	<b>Rango de Medición Típico</b>	<b>Unidades</b>	<b>Sensores Comunes</b>
<b>Temperatura</b>	-40 a 85 (ambiente)	°C (grados Celsius)	BMP280, BME280, DS18B20
<b>Presión Atmosférica</b>	300 a 1100	hPa (hectopascales)	BMP280, BME280
<b>Altitud</b>	0 a 10,000 (calculada)	m (metros)	Calculada a partir de la presión
<b>Aceleración (Ejes X, Y, Z)</b>	±2, ±4, ±8, ±16 (seleccionable)	g (gravedades)	MPU6050, MPU9250
<b>Velocidad Angular (Giroscopio)</b>	±250, ±500, ±1000, ±2000 (seleccionable)	°/seg (grados por segundo)	MPU6050, MPU9250
<b>Humedad</b>	0 a 100	% (porcentaje)	BME280 (incluye temp y presión)
<b>Voltaje de Batería</b>	3.7 a 9 (depende del diseño)	V (voltios)	Sensor de voltaje, lectura analógica
<b>Posición GPS</b>	Latitud y Longitud	Grados decimales	Módulos GPS (ej. NEO-6M)

Las variables anteriores requiere considerar las siguientes observaciones generales

- **Selección de Sensores:** Los rangos listados son ejemplos basados en sensores económicos y populares en proyectos CanSat. Es crucial consultar las **hojas de datos** (datasheets) de los sensores específicos que se utilicen para conocer sus rangos y precisiones exactas.
- **Requisitos de la Misión:** Las competencias o misiones específicas pueden tener requisitos sobre las variables a medir y los rangos necesarios. Por ejemplo, el objetivo principal suele ser medir la altitud y la presión atmosférica durante el vuelo.
- **Altitud Calculada:** La altitud no se mide directamente con un sensor barométrico, sino que se calcula utilizando la fórmula barométrica estándar a partir de los datos de presión y temperatura.
- **Variables Adicionales:** Dependiendo de la complejidad del proyecto, se pueden añadir otros sensores para medir variables como la concentración de gases, la radiación UV, o el campo magnético.

Comparación con el Apolo 11 de las características principales

#### 4.1 Capacidad de cómputo

La computadora del Apolo 11 (Apollo Guidance Computer, AGC) operaba a aproximadamente 1 MHz y contaba con apenas unos kilobytes de memoria.

Aun así, fue suficiente para realizar cálculos de navegación y control en tiempo real. En contraste, un microcontrolador de uso civil como el ESP32, común en proyectos CanSat, opera a cientos de megahercios y dispone de cientos de kilobytes de memoria RAM, además de almacenamiento externo en tarjetas microSD.

Tabla 2. Comparación de los módulos principales Cansat vs Apolo 11

Componente	Apolo 11	CanSat
Computadora	AGC	Arduino/ESP32
Frecuencia	1MHz	80-240MHz
RAM	4KB	520KB(ESP32)
Almacenamiento	72KB	MB o GB (memorias SD)

Esta diferencia ilustra cómo la miniaturización y el aumento de potencia han democratizado el acceso a tecnologías avanzadas, permitiendo que proyectos educativos actuales superen ampliamente las capacidades computacionales de sistemas históricos.

#### 4.2 Sensores, comunicación y navegación

Apolo 11 dependía de sensores analógicos, radares y cálculos manuales complementados por computadoras de apoyo en la Tierra. No existía el sistema GPS, por lo que la navegación requería una compleja coordinación entre astronautas y control de misión.

En un CanSat moderno, módulos GPS proporcionan posición con precisión de metros, sensores digitales miden temperatura, presión y aceleración, y sistemas de comunicación como LoRa o radiofrecuencia transmiten datos en tiempo real. Incluso es posible capturar imágenes y video en alta definición, algo impensable en las primeras misiones espaciales tripuladas.

Tabla 3. Comparación de las principales variables del Cansat vs Apollo 11

Característica	Apollo 11	CanSat
Comunicación	Radio analógica	Digital (LoRa,GSM,Wifi)
Velocidad	1kbps	Kbps-Mbps
Datos	Telemetría básica	GPS,Imageny sensores
Redundancia	limitada	Muy alta

#### 4.3 Fuselaje

A pesar de la superioridad tecnológica actual y la sofisticación de los sistemas electrónicos miniaturizados, el desafío más crítico en el desarrollo de un CanSat no reside en la electrónica, sino en el diseño y construcción del fuselaje.

Este componente estructural es fundamental, ya que debe cumplir con requisitos específicos para garantizar el éxito de la misión:

- **Protección contra condiciones extremas:** El fuselaje debe salvaguardar los componentes internos (sensores, microcontrolador, batería, sistema de comunicaciones) de los rigores del lanzamiento y la recuperación.
- **Resistencia al impacto:** Debe ser capaz de absorber la energía del aterrizaje, a menudo a velocidades considerables, para evitar daños catastróficos al equipo.
- **Aislamiento térmico:** Durante el vuelo, el CanSat puede enfrentarse a cambios bruscos de temperatura y presión. El fuselaje debe mantener un entorno interno adecuado para que la electrónica funcione correctamente.
- **Integridad aerodinámica:** La estructura debe mantener su forma y estabilidad durante todo el descenso, especialmente si se despliega algún sistema de paracaídas, para asegurar la recopilación de datos de forma fiable.
- **Peso y dimensiones:** Todo el conjunto debe adherirse estrictamente a las especificaciones estándar de una lata de refresco (generalmente 66 mm de diámetro y 115 mm de alto), lo que requiere una optimización meticulosa de los materiales y el diseño.

Tabla 4. Condiciones de Temperatura del CanSat

Altura	Temperatura
10km	-50°C
20km	-55 a 65°C
30km	-70°C

#### 4.4 Condiciones críticas del diseño

##### 4.4.1 Impacto en el módulo

- Baterías LiPo pierden hasta **60–70%** de capacidad
- Plásticos comunes se vuelven frágiles
- Condensación interna al descender pudiendo provocar cortos circuito dentro del modulo

##### 4.4.2 Temperatura en ascenso y descenso

1. Subida → seco y frío
2. Bajada → caliente y húmedo

### 5 Resultados de Operación

#### 5.1 Presión

Tabla 5. Condiciones de Presión del CanSat

Altura	Presion
Nivel del mar	<b>101kPa</b>
20km	~5 kPa
30km	~1 kPa

Este escenario describe condiciones que se asemejan al entorno de la atmósfera superior, específicamente la estratosfera o la mesosfera, donde la presión atmosférica es inferior al 1–5% de la presión normal a nivel del mar. Estas condiciones tienen consecuencias físicas y mecánicas significativas:

#### 5.2 Consecuencias sobre la transferencia de calor y el aislamiento térmico

- **Ausencia de Convección Térmica Eficiente:** La convección, el principal mecanismo de transferencia de calor en fluidos (como el aire) a presiones normales, requiere una densidad de partículas suficiente. A presiones tan bajas, la densidad del aire es insuficiente para transportar calor de manera efectiva.
- **Pérdida de Propiedades Aislantes del Aire:** El aire normalmente actúa como un aislante térmico eficaz. En este entorno, debido a la falta de masa molecular, esta capacidad aislante desaparece casi por completo.
- **Enfriamiento Acelerado de Componentes:** Sin la convección y el aislamiento del aire, los objetos expuestos pierden calor principalmente a través de la radiación térmica y la conducción (si están en contacto con otras superficies). Esto resulta en un enfriamiento mucho más rápido de los componentes, lo que puede llevar a problemas de funcionamiento o fragilidad de los materiales.

### 5.3 Dinámica del viento y turbulencia

- **Vientos Estratosféricos de Alta Velocidad:** A pesar de la baja densidad del aire, las diferencias de temperatura y presión a gran escala pueden generar vientos extremos, frecuentemente superando los 100 km/h (o incluso velocidades hipersónicas dependiendo de la altitud exacta).
- **Giro Constante y Descontrol del Módulo/Objeto:** En un entorno con fuerzas aerodinámicas sutiles pero constantes y cambios bruscos en la dirección del flujo de aire, cualquier módulo u objeto puede experimentar un giro o rotación constante si no está activamente estabilizado.
- **Cambios Bruscos de Dirección del Flujo de Aire:** La naturaleza de las corrientes de aire en estas altitudes a menudo implica cizalladura del viento (cambios repentinos en velocidad y dirección en distancias cortas).

### 5.4 Efectos físicos y operacionales

Estos factores combinados provocan una serie de problemas prácticos:

- **Vibración Mecánica:** Los vientos de alta velocidad y la turbulencia generan fuerzas de arrastre y sustentación erráticas que inducen vibraciones mecánicas significativas en la estructura del objeto.
- **Imágenes Borrosas:** La vibración mecánica impacta directamente en cualquier sistema óptico o de cámara, impidiendo la toma de imágenes claras y estables.
- **Fatiga del Arnés Eléctrico:** La vibración constante y los esfuerzos mecánicos repetidos someten a los cables y conectores del arnés eléctrico a un estrés considerable, acelerando la fatiga del material y aumentando el riesgo de fallos en el cableado o las conexiones.
- la sensación de frío

Teniendo esto en cuenta no podemos calificar una misión a la estratosfera como algo sencillo considerando que los datos muestran las condiciones a 30km de altura por lo que llevo a comprender que gran parte del esfuerzo de ingeniería en Apollo 11 se concentró en el diseño estructural y el control térmico. La misión demostró que la confiabilidad y la protección de los sistemas son tan importantes como la capacidad de procesamiento.

## 6 Conclusiones

La comparación entre un CanSat y Apollo 11 deja una lección clara: la tecnología electrónica avanza rápidamente, pero los principios fundamentales de la ingeniería estructura, materiales, control térmico y confiabilidad siguen siendo esenciales. En proyectos educativos, comprender y aplicar estos principios permite transformar un conjunto de componentes avanzados en una misión exitosa

Por lo que podemos concluir es que un CanSat moderno puede superar al Apollo 11 en capacidad de cómputo, sensores y comunicación, pero ambos comparten un desafío común: sobrevivir y funcionar en entornos extremos. Esta comparación no solo resalta el progreso tecnológico, sino que también subraya la importancia del diseño estructural como pilar de la ingeniería aeroespacial.

## Referencias

- [1] Buitrago, P., Briñez, R. C., Tejada, J. C., Marmolejo, P., & Jaramillo, O. A. (2019). *Diseño de un CanSat para medición de variables ambientales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/29679>
- [2] Colín, A. (2016). Pico satélites cansat: una herramienta para la educación en ciencias del espacio. *CiENCIA UANL*, 19(81), 9-16.
- [3] Colín, A., Bermúdez, B., Encarnación, G., Lira, G., Zúñiga, D., Ávalos, L., y Álvarez, B. (2016). *Construcción de un picosatélite cansat*. CIENCIA UANL.
- [4] ESERO España. (2021). *Plantilla Informe CanSat* [Informe técnico].. <https://esero.es/wp-content/uploads/2021/11/plantilla-informecdr-cansat-actualizado.pdf>
- [5] Mancilla-Cerezo, J., Palacios-García, A. C., Perez-Vargas, B., & Torija-Velazquez, E. (2018). Diseño y construcción de un pico-satélite educativo CanSat denominado WashiSat. *Revista de Tecnologías Computacionales*, 2(7), 1-13.
- [6] Programa Espacial Universitario de la UNAM. (2023). *Manual Etapa-02 CISE2023* [Manual].. <https://peu.unam.mx/files/CANSAT/2023/Consejos%20Cansat%202023.pdf>
- [7] Ramírez-Valdez, J. M., & Hernández-Gómez, S. (2024). Diseño y construcción de un satélite enlatado. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(Especial 2), 34-39. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial2.12241>

# **Plataforma Biónica de Asistencia para Extremidades: Avances en Fisioterapia Mediante Tecnología Biónica**

## **Bionic Limb Assist Pro Platform: Advances in Physiotherapy through Bionic Technology**

Mariano Larios Gómez, Julio Cesar Álvarez Galicia, Carmen Cerón Garnica, Gerardo Martínez Guzmán

Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

mariano.larios@correo.buap.mx, julio.alvarezga@alumno.buap.mx,  
carmen.ceron@correo.buap.mx, gerardo.guzmanm@correo.buap.mx,

### **Abstract**

The “Bionic Limb Assist Pro” project is focused on research and development of an educational device for physiotherapy, utilizing current technological tools and trends—integrating advances in electronics and computing—to offer an innovative and intuitive solution for the rehabilitation of basic human limbs. Specifically, it targets the treatment of the second most important joint in the upper limbs using bionic technology. This joint connects the humerus (upper arm bone) with the radius and ulna (forearm bones) and allows essential movements such as flexion and extension, as well as forearm rotation (supination and pronation).

This proposal combines technological components with computational algorithms, which, when integrated in this manner, aim to provide controlled assistance and stimulation to the affected limbs using precision actuators, voltage regulators, and a rapid prototyping development board. This enables the execution of muscular movement patterns, allowing for precise, adaptive, and intuitive user interaction throughout all rehabilitation sessions.

The “Bionic Limb Assist Pro” platform considers key features such as the use of an intuitive and educational interface that enables physiotherapists to control and adjust the device’s parameters according to each patient’s specific needs. It also includes an ergonomic and safe design, prioritizing user comfort and safety through the use of durable and adjustable materials that can be adapted to various types of patients and medical conditions. The project also seeks to reduce cost, time, and complexity in the device’s manufacturing process, making it accessible to anyone who may need it. “Bionic Limb Assist Pro” represents a significant advancement in the field of physiotherapy, leveraging the latest developments in electronics and computing to offer an effective and personalized solution for upper limb rehabilitation. Its user-centered approach ensures dynamic adaptability, resulting in a tool that benefits not only patients but also physiotherapists, enhancing quality of life and addressing mobility challenges caused by injuries or disabilities.

### **Resumen**

El proyecto “Bionic Limb Assist Pro” está enfocado en el ámbito de la investigación y desarrollo de un dispositivo educativo para fisioterapia utilizando herramientas tecnológicas de las actuales tendencias, es decir, integrando avances en electrónica y computación, buscando ofrecer una solución innovadora e intuitiva para la rehabilitación de extremidades básicas humanas, específicamente en el tratamiento de la segunda articulación más importante de las extremidades superiores mediante tecnología biónica. Dicha articulación conecta el húmero (hueso del brazo)

con el radio y el cúbito (huesos del antebrazo) y permite movimientos esenciales como la flexión y extensión de esta, así como la rotación del antebrazo (supinación y pronación). Esta propuesta unifica componentes tecnológicos, así como también algoritmos computacionales los cuales, siendo integrados de esta forma, buscan poder proporcionar asistencia y estimulación controlada a las extremidades afectadas empleando actuadores de precisión, reguladores de voltaje y una placa de desarrollo de prototipado rápido, permitiendo realizar patrones de movimientos musculares. De esta forma se tiene una interacción precisa, adaptativa e intuitiva para el usuario durante todas las sesiones de rehabilitación. La plataforma “Bionic Limb Assist Pro” tiene en consideración características clave como el empleo de una interfaz intuitiva y educativa que permite a los fisioterapeutas controlar y ajustar los parámetros del dispositivo según los requisitos específicos de cada paciente. También se contempla un diseño ergonómico y seguro, priorizando la comodidad y seguridad del usuario con materiales duraderos y ajustables que serán adaptables a diferentes tipos de pacientes y condiciones médicas, buscando la reducción de costos, tiempo y complejidad en la fabricación del dispositivo haciéndolo de fácil acceso para cualquiera que lo requiera. “Bionic Limb Assist Pro” es un avance significativo en el campo de la fisioterapia, aprovechando los últimos avances en electrónica y computación para ofrecer una solución efectiva y personalizada en la rehabilitación de extremidades superiores; su enfoque está centrado en las necesidades y capacidades del usuario, siendo adaptable dinámicamente, permitiendo de esta forma contar con una herramienta que no solo beneficia a los pacientes sino también a los fisioterapeutas, brindando una mejora en la calidad de vida y enfrentar desafíos en la movilidad debidos a lesiones o discapacidades.

Keywords and phrases: Asistentes Biónicos, Fisioterapia Tecnológica, Tecnología Biónica, Rehabilitación de Extremidades, Interfaz Educativa.

## **1 Introducción**

El proyecto surge como respuesta a la necesidad de contar con un dispositivo que permita mejorar los procesos de rehabilitación de las extremidades superiores en personas que han sufrido lesiones, ofreciendo una opción diferente a la terapia convencional proporcionada por un fisioterapeuta; los métodos tradicionales de fisioterapia tienen limitaciones en términos de eficacia y eficiencia, lo que ha generado la búsqueda de soluciones innovadoras que integren tecnología para optimizar la recuperación realizando esta tarea de forma educativa e intuitiva. Una de las motivaciones principales detrás del proyecto es mejorar la calidad de vida de las personas que enfrentan dificultades en la rehabilitación de las extremidades superiores; en la actualidad la tecnología biónica ofrece una gran variedad tanto de componentes como algoritmos que aceleran y mejoran múltiples procesos, teniendo un impacto positivo en la autonomía y la funcionalidad de los pacientes. El desarrollo de “Bionic Limb Assist Pro” está fundamentado en la necesidad de combinar la experiencia en fisioterapia con los avances tecnológicos en electrónica y computación, ya que estos elementos, así como las múltiples herramientas existentes relacionadas con el tema, estas han permitido crear dispositivos personalizados, adaptables y de alto rendimiento que se acoplan a las distintas necesidades de forma específica en cada paciente, maximizando y mejorando así los resultados de la rehabilitación.

El punto central de este proyecto es el desarrollo del modelado, fabricación y funcionamiento de “Bionic Limb Assist Pro”, partiendo desde el diseño y creación de un prototipo de un dispositivo educativo enfocado en fisioterapia basado en tecnología biónica y programación, orientado a la mejora del proceso de rehabilitación de las extremidades superiores en pacientes que se

encuentran en el proceso de recuperación por lesiones o enfermedades que afecten la motricidad de la segunda articulación más importante de las mismas. Puntualmente, en el desarrollo del sistema "Bionic Limb Assist Pro" se investigaron, diseñaron e implementaron varios aspectos clave, obteniéndose los mejores resultados centrados principalmente en el análisis de las principales necesidades y requerimientos del paciente, así como la portación de profesionales de la salud en el ámbito de la rehabilitación de las extremidades superiores. Así de igual manera, se diseñó y desarrolló un prototipo empleando los componentes electrónicos de prototipado y movilidad requeridos para la rehabilitación en la que se centró "Bionic Limb Assist Pro". Se implementaron algoritmos para desarrollar programas que permitieran la interacción adaptativa entre el dispositivo y el paciente, optimizando las sesiones de rehabilitación. Se realizaron pruebas y evaluaciones del funcionamiento del sistema "Bionic Limb Assist Pro" en entornos controlados. Por último, se afinó y mejoró continuamente el diseño y la funcionalidad del sistema en base a los comentarios y resultados obtenidos durante las pruebas.

En el proceso del desarrollo del proyecto se llevó a cabo siguiendo una metodología multidisciplinaria que combinó principios fundamentales en ingeniería mecánica, electrónica, programación y biotecnología, así como el análisis de múltiples investigaciones y publicaciones científicas relacionadas al tema.

Este proyecto aborda el desafío de la rehabilitación de las extremidades superiores, específicamente en la segunda articulación más importante de la misma, mediante la implementación de tecnología biónica y sistemas de electrónica y computación, con el objetivo de mejorar la calidad de vida y la funcionalidad de los pacientes. La metodología de trabajo en este proyecto se basó en una serie de pasos clave que incluyeron el planteamiento del problema, la formulación de una hipótesis, el diseño y desarrollo tanto de hardware como del software requerido, así como pruebas físicas en distintos sujetos, donde se realizaron un conjunto de pruebas, y que se realizó un análisis de datos recabados después del uso del prototipo; cada paso se abordó de manera específica dando como resultado los siguiente

- La realización de una revisión y documentación para la elaboración del estado del arte de forma minuciosa de múltiples publicaciones científicas, así como investigaciones referentes a la rehabilitación de extremidades aplicando distintos tipos de tecnología biónica, además de sistemas de rehabilitación de extremidades ya existentes, buscando identificar las limitaciones y desafíos actuales en la rehabilitación de extremidades, esto para permitirnos definir las necesidades específicas y puntuales de los pacientes y de los profesionales de la salud.
- La hipótesis planteada para el presente proyecto parte de determinar la forma más eficiente y eficaz para la implementación de tecnología biónica, programación y fisioterapia, considerando la posibilidad de obtener una mejora significativa, buscando que los resultados de la rehabilitación en las extremidades superiores enfocadas en la segunda articulación más importante de la misma sean más rápidos considerando menores costos en tiempo, recursos humanos y recursos económicos sin alterar la recuperación y mejora funcional de los pacientes que se puede obtener gracias a los dispositivos y métodos tradicionales ya existentes.
- Dicha hipótesis se fundamenta en la evidencia científica previa que ha demostrado el potencial de la tecnología biónica llevada de la mano con la programación con un enfoque en la fisioterapia y educación en rehabilitación, buscando así una mejora continua en los distintos métodos de rehabilitación física en diversos contextos, así como también la consideración de la observación y limitaciones de los métodos tradicionales de fisioterapia tomando en cuenta

todas las necesidades para brindar soluciones innovadoras abordando cualquier desafío presentado en el camino del desarrollo.

- Empleo de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para el desarrollo de componentes mecánicos, así como también herramientas de simulación de componentes electrónicos y diseño de circuitos que posteriormente se implementaron en el sistema “Bionic Limb Assist Pro”, además de técnicas de ingeniería en sistemas que permitieron la integración de actuadores de precisión, reguladores de voltaje y una placa de desarrollo de prototipado rápido en un diseño fabricado en impresión 3D funcional y ergonómico, así como el desarrollo de programas y algoritmos necesarios para el funcionamiento del prototipo.
- Implementación de lenguajes de programación como C y C++ con la finalidad de desarrollar múltiples algoritmos de prueba para el funcionamiento del prototipo físico; analizando posibles deficiencias o errores de fabricación en el mismo.
- Se llevaron a cabo múltiples evaluaciones del sistema “Bionic Limb Assist Pro”, buscando la colaboración con sujetos de prueba que realizaron rehabilitaciones demostrativas del tipo que el prototipo ofrece, empleando medidas objetivas, como la fuerza muscular, el rango de movimiento y la calidad de vida relacionada con la salud, para evaluar la eficacia y la seguridad de la plataforma.
- Posterior a las evaluaciones fue llevado a cabo un análisis de los resultados teniendo en cuenta la correlación existente entre el uso del sistema “Bionic Limb Assist Pro” y la mejora en los parámetros de rehabilitación, empleando una rúbrica que parte de las diferencias entre los métodos tradicionales y el empleo del prototipo, considerando en todo momento la comodidad del paciente así como también una correcta rehabilitación en función de los parámetros que un experto en el tema debe tener en cuenta para este tipo de casos.
- La elaboración de informes técnicos detallados que describen el diseño, desarrollo e implementación del sistema “Bionic Limb Assist Pro”, incluyendo diagramas, esquemas y especificaciones técnicas presentadas en el apartado de diseño, desarrollo e implementación de la plataforma del presente documento.

### 1.1 Infraestructura

Para el desarrollo del proyecto “Bionic Limb Assist Pro” se incluyeron una variedad de recursos descritos de la siguiente forma:

- Un dispositivo de cómputo de alto rendimiento que cuente con la capacidad para ejecutar software de diseño asistido por computadora (CAD), así como herramientas de programación y software de análisis de datos para los resultados obtenidos.
- Softwares de uso libre que no requieren de licencias, permitiendo de esta manera un resultado con aportación significativa en la ciencia y la tecnología, mostrando que no se requirió de grandes recursos para desarrollar proyectos complejos y con alto impacto para múltiples disciplinas.
- Uso de maquinaria, equipamiento especializado y componentes electrónicos para la elaboración del sistema “Bionic Limb Assist Pro”, incluyendo impresoras 3D y equipo de laboratorio para

pruebas físicas y eléctricas; considerando el uso de instrumentos de medición precisos para evaluar el rendimiento y la eficacia del sistema durante las pruebas y evaluaciones.

- Un espacio adecuado en donde se llevarán a cabo las actividades de diseño, desarrollo, fabricación y pruebas del proyecto; el espacio empleado cuenta con estaciones de trabajo, estanterías de almacenamiento y otros elementos necesarios para garantizar un ambiente de trabajo seguro y eficiente.

## 1.2 Proyección futura del desarrollo

En el marco del desarrollo de este proyecto fueron identificadas varias contribuciones objetivo que se buscaron alcanzar; dichas contribuciones no solo representan avances significativos en la tecnología y la ciencia de la rehabilitación de las extremidades superiores, sino también un impacto positivo y tangible en la sociedad, enfocado en la relevancia y potencial para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades físicas, así como para impulsar el progreso en el campo de la tecnología biónica y la rehabilitación médica. Dichas contribuciones objetivo están definidas de la siguiente forma:

- Se desarrolló un prototipo funcional innovador que asistió en la rehabilitación de las extremidades superiores, centrado en la segunda articulación más importante de la misma.
- Se validó clínicamente, demostrando la eficacia y seguridad del dispositivo en entornos clínicos controlados con especialistas en rehabilitación.
- Se documentó técnicamente el proyecto, generando informes detallados que incluyeron el diseño, desarrollo, implementación y uso del sistema.
- Tuvo un impacto en la rehabilitación física, mejorando los métodos de rehabilitación y proporcionando mayores niveles de autonomía a los pacientes.
- Se innovó en tecnología biónica, avanzando en el campo de los aplicativos en la rehabilitación médica de diferentes extremidades.
- Se redujeron costos en el sector salud, generando empleo y ofreciendo oportunidades de comercialización y patentes.
- Se fungió como fuente de inspiración en la comunidad estudiantil y científica, ayudando a reducir el temor a desarrollar proyectos complejos con impacto y labor social en el área de las ciencias y la salud.

## 2 Marco Teórico y Estado del Arte

La rehabilitación de extremidades con tecnología biónica ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, propiciando un campo multidisciplinario en constante evolución que combina la ingeniería biomédica, la neurociencia y la robótica. Este desarrollo ha sido impulsado por la búsqueda continua de soluciones innovadoras para mejorar la movilidad y la funcionalidad de las extremidades afectadas, beneficiando así a personas con una o más discapacidades físicas. La investigación en prótesis y ortesis biónicas ha sido fundamental para el avance de la rehabilitación de extremidades. Latour (2022) ofrece una revisión exhaustiva sobre los avances en

tecnología protésica para extremidades superiores y su impacto en la rehabilitación y el trabajo interprofesional. El propósito de la revisión es explorar las tendencias actuales que influyen en la comprensión y atención a los pacientes, con el objetivo de mejorar los resultados; por otra parte la investigación en interfaces cerebro-máquina ha revolucionado la forma en que se controlan las prótesis y ortesis biónicas. Según Hochberg et al. (2012), estos sistemas permiten el control directo de dispositivos biónicos mediante la actividad cerebral del usuario, ofreciendo un nivel de control intuitivo y natural, mejorando significativamente la calidad de vida de las personas con discapacidades físicas.

Los exoesqueletos robóticos han emergido como una solución prometedora para mejorar la movilidad en personas con discapacidades físicas. Según Pons (2010), estos dispositivos externos proporcionan asistencia para caminar, levantar objetos pesados y realizar actividades cotidianas; los exoesqueletos robóticos representan una innovación tecnológica importante en el campo de la rehabilitación de extremidades. La investigación en rehabilitación neuro-ortopédica se enfoca en el desarrollo de terapias y técnicas para promover la recuperación funcional de las extremidades afectadas; según Hug et al. (2011), estas terapias incluyen ejercicios de fisioterapia, estimulación eléctrica funcional y entrenamiento con dispositivos biónicos. Estas técnicas tienen como objetivo mejorar la calidad de vida y la funcionalidad de los pacientes con lesiones neurológicas o musculoesqueléticas.

La investigación en rehabilitación y fisioterapia ha abordado una amplia gama de enfoques para mejorar la calidad de vida y el tratamiento de diversas condiciones médicas. Quispe Monar (2022) llevó a cabo una investigación documental que evaluó la rehabilitación fisioterapéutica en adultos con prótesis transradial, destacando la importancia de tratamientos rigurosos y basados en evidencia para mejorar el control motor y la adaptación a actividades diarias. Por otro lado, Ruiz et al. (2010) realizaron un estudio observacional sobre la actividad asistencial en las salas de Fisioterapia de Atención Primaria, evidenciando un aumento en la atención a la población, pero también una sobrecarga asistencial que sugiere la necesidad de identificar áreas de mejora. Ayala Baño (2022) presentó un dispositivo electrónico interactivo para la rehabilitación del Síndrome de Túnel Carpiano, destacando su potencial para mejorar la motivación del paciente y reducir la carga del fisioterapeuta en el proceso de rehabilitación. González Alonso (2014) abordó la gestión de programas de Tecnologías de la Información y la Comunicación en fisioterapia, proponiendo mejoras en la integración de la fisioterapia en los registros de historia clínica electrónica para facilitar la comunicación interprofesional y el acceso a datos relevantes.

Sirawattanakul y Sanngoen (2020) realizaron la revisión del estado actual de los exoesqueletos para los miembros superiores en aplicaciones de rehabilitación y asistencia; dicho estudio se centra en el análisis de los aspectos técnicos clave como sistemas de control, diseño mecánico, métodos de transmisión de carga y estrategias de control empleados en los mismos. Los autores hacen hincapié en el uso de sensores como los electromiogramas (EMG) y sensores de fuerza que son utilizados en la medición y mejora de movimientos del usuario, explorando diferentes tecnologías de transmisión de carga como motores de corriente continua con cajas de engranajes y servomotores; resaltan la importancia de desarrollar exoesqueletos que sean accesibles, ligeros y eficientes, empleando algoritmos de control avanzados para maximizar la funcionalidad del miembro superior afectado.

Proietti et al. (2016) ofrecieron una revisión exhaustiva sobre las estrategias de control en exoesqueletos robóticos diseñados para la rehabilitación neurológica de los miembros superiores; este estudio se centra en cómo estas estrategias de control facilitan y mejoran la terapia y la recuperación de pacientes con trastornos neurológicos, siendo ejemplo de ellos los sobrevivientes

de accidentes cerebrovasculares. Estos autores se enfocan en la importancia del uso de métodos avanzados que permiten una interacción más natural entre el usuario y el dispositivo, así como técnicas de control adaptativo y retroalimentación sensorial que optimizan la eficacia de la terapia robótica. Vélez-Guerrero, Callejas-Cuervo y Mazzoleni (2021) proporcionan una revisión exhaustiva sobre exoesqueletos robóticos portátiles basados en inteligencia artificial (IA) para la rehabilitación de miembros superiores; su trabajo explora cómo la IA es integrada en estos dispositivos para mejorar la rehabilitación en pacientes con discapacidades en las extremidades superiores, adaptando el tratamiento a las necesidades individuales de los pacientes. Esta investigación destaca cómo se optimizan los patrones de movimiento durante la terapia, realizando en paralelo la recopilación y análisis de datos mediante IA para mejorar el proceso terapéutico, considerando los avances tecnológicos y los desafíos que se presentan en la actualidad en el campo de los exoesqueletos robóticos portátiles, subrayando la importancia de la integración efectiva de la IA para maximizar los beneficios clínicos centrados en el potencial transformador de esta tecnología en la rehabilitación de miembros superiores.

Rasedul et al. (2021) desarrollaron un robot rehabilitador para miembros superiores con funcionalidad dual, descrito en su artículo "Design and Development of an Upper Limb Rehabilitative Robot with Dual Functionality" publicado en *Micromachines*; su desarrollo se enfoca en crear un dispositivo robótico que facilite tanto la rehabilitación pasiva como activa de los miembros superiores, permitiendo con ello que el robot proporcione asistencia controlada para movimientos pasivos en las fases iniciales de la rehabilitación y permita la rehabilitación activa a medida que el paciente recupera fuerza y control muscular; la investigación está centrada en aspectos técnicos detallados, incluyendo el diseño mecánico, la electrónica y el software del robot, y argumenta con pruebas experimentales que evalúan la efectividad y seguridad del dispositivo en entornos clínicos controlados, dando como resultado un estudio que representa un avance significativo en la rehabilitación robótica, ofreciendo un dispositivo que combina dos modalidades de tratamiento en un solo sistema, con lo cual se mejora potencialmente la eficiencia y eficacia de las rehabilitaciones obteniendo resultados positivos para pacientes con discapacidades en los miembros superiores.

Kamanzi, Ntakirutimana y Extension (2024) presentaron una revisión sobre las prótesis robóticas asistidas por inteligencia artificial (IA) para la restauración de la movilidad en personas con pérdida de extremidades; el estudio examina la integración de tecnologías de IA en prótesis mecánicas que imitan el movimiento natural del cuerpo, mejorando la funcionalidad y adaptabilidad del dispositivo. En su trabajo se destacan avances clave, como los algoritmos de aprendizaje automático y las técnicas de fusión de sensores, que han permitido un control más intuitivo mejorando los resultados en usuarios, a pesar de la persistencia de desafíos como el procesamiento en tiempo real, las preocupaciones éticas y los costos. La investigación se enfoca en el potencial transformador de la IA en la industria de las prótesis, con vistas a mejorar la movilidad y la calidad de vida de las personas con amputaciones.

Sarhan, Al-Faiz y Takhakh (2023) presentan una revisión sobre los avances recientes en técnicas de rehabilitación controladas por interfaces cerebro-computadora (BCI) para pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular; su trabajo se centra en el uso de señales EMG, EEG y combinaciones de ambas (EMG + EEG) para controlar dispositivos robóticos destinados a la rehabilitación de las extremidades superiores, partiendo de la importancia en la recuperación funcional y la interacción entre el cuerpo humano y los dispositivos robóticos demostrada como crucial para la rehabilitación de los pacientes, destacando el potencial de estos sistemas para

facilitar la recuperación de la movilidad en las extremidades afectadas.

Bardi et al. (2022) observaron los dispositivos portátiles robóticos blandos para la asistencia de los miembros superiores, conocidos como exotrajes; su desarrollo aborda los enfoques actuales en el diseño y producción de estos dispositivos, destacando su flexibilidad como una ventaja frente a los exoesqueletos rígidos al mejorar la comodidad, usabilidad y portabilidad sin restringir los movimientos naturales del usuario. En los dispositivos revisados, los tipos de actuadores más comunes son los neumáticos (52 %) y los motores de corriente continua con transmisión por cable (29 %); además, el 80 % de los dispositivos están orientados a la rehabilitación o asistencia, y un 33 % implementa estrategias de detección de intención de movimiento. Sin embargo, pocos exotrajes están listos para el mercado, reconociendo su alto potencial para la asistencia en actividades cotidianas y subrayando la necesidad de ensayos clínicos para evaluar su efectividad en usuarios reales.

Villarejo et al. (2011) realizaron un estudio sobre el uso de un exoesqueleto para la rehabilitación de miembros inferiores en pacientes con pérdida de movilidad; dicho exoesqueleto permite a los terapeutas realizar procedimientos de rehabilitación más extensos y repetitivos sin necesidad de esfuerzo físico constante, mejorando la interacción paciente-exoesqueleto y facilitando un control intuitivo y transparente del movimiento. Su trabajo propone una metodología de detección de intención de movimiento basada en reconocimiento de patrones. Utilizando Transformada Wavelet Packet (WPT), Base Discriminante Local (LDB) y Análisis de Componentes Principales (PCA) para la extracción de características, implementan un clasificador basado en lógica difusa que identifica transiciones de sedente a bípedo, de bípedo a sedente y de marcha, logrando una clasificación exitosa del 82 %.

Otro punto importante es el enfoque de la tecnología portátil ya que ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la postura humana y prevenir problemas de salud asociados. Larios-Gómez et al. (2024) presentan un sistema portátil inteligente diseñado para monitorear y corregir la postura en tiempo real, reduciendo el riesgo de daño en la columna vertebral. Su enfoque combina filosofía computacional y diseño centrado en el usuario, promoviendo una relación sinérgica entre la tecnología y la salud humana, así como la integración de una aplicación móvil que facilita la visualización de rutinas de ejercicios correctivos de manera educativa para el usuario. Se destacan los algoritmos de optimización bio-inspirados como herramientas clave en la educación científica y la inteligencia artificial. Por su parte, Larios-Gómez et al. (2024) presentan un entorno de trabajo basado en el algoritmo Harmony Search (HS), diseñado para facilitar su aplicación en problemas de optimización con  $n$  variables. Este marco educativo proporciona una interfaz intuitiva que permite la interacción con funciones matemáticas y la visualización de parámetros clave del algoritmo, promoviendo su uso en contextos educativos e investigación en inteligencia artificial. Gracias a la flexibilidad del sistema, el cual admite configuraciones avanzadas y visualización de iteraciones, se permite una experimentación más profunda en la optimización de funciones objetivo.

Finalmente, Alfonso-Mora et al. (2020) exploraron el uso de la simulación clínica como estrategia pedagógica en fisioterapia, señalando su potencial para mejorar la formación del fisioterapeuta en diferentes dominios de especialización. Estas investigaciones destacan la diversidad de enfoques y tecnologías aplicadas en rehabilitación y fisioterapia en las distintas extremidades del cuerpo.

### **3 Diseño, Desarrollo e Implementación de la Plataforma**

El desarrollo de la plataforma educativa “Bionic Limb Assist Pro” está centrado en la creación de una prótesis exoesquelética fisioterapéutica específica para las extremidades superiores, enfocada en la segunda articulación más importante del brazo. Tomando primordialmente el proceso de diseño e implementación de la plataforma, se abordan aspectos técnicos, así como las partes que integran el proyecto en su totalidad. En cuanto al diseño de modelos CAD de las partes que componen el exoesqueleto, se utilizó Shapr3D, una herramienta de escritorio que permite la creación de diseños 3D de manera intuitiva, eficiente e interactiva, posibilitando la visualización y el ajuste de los componentes antes de su fabricación, asegurando precisión, funcionalidad y adaptabilidad en el diseño. Para el desarrollo del software que controla el dispositivo se empleó Arduino IDE, un entorno de desarrollo de código integrado específico para microcontroladores. En el caso de “Bionic Limb Assist Pro”, el IDE permite programar el microcontrolador ESP32, un componente esencial del prototipo debido a sus características avanzadas. El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alta eficiencia que incluye conectividad Bluetooth e Internet de las Cosas (IoT); sus capacidades de conectividad permiten la comunicación inalámbrica con otros dispositivos y su integración en redes IoT, lo que es crucial para la funcionalidad de la prótesis exoesquelética. Con su procesador dual-core y múltiples pines GPIO, el ESP32 proporciona la potencia y versatilidad necesarias para controlar los actuadores del prototipo.

Asimismo, se consideró implementar la aplicación multiplataforma Nairda Robot Programming, la cual está desarrollada con el framework Flutter del lenguaje Dart. Flutter permite la creación de aplicaciones híbridas para Android, iOS, macOS y Windows a partir de una única base de código, haciendo esta aplicación idónea para el desarrollo ya que los usuarios podrán realizar múltiples proyectos (programas) sin cargar código en el microcontrolador seleccionado para este proyecto, ya que el funcionamiento de la programación es inalámbrico (wireless), haciendo de ello una plataforma con funcionamiento en tiempo real. De esta forma se simplifica el proceso de desarrollo asegurando una experiencia de usuario coherente en múltiples dispositivos; la aplicación móvil está encargada de permitir a los pacientes y fisioterapeutas interactuar con la prótesis de manera intuitiva, ajustando parámetros. Todos los componentes y herramientas anteriormente descritos forman una plataforma robusta y eficaz para el desarrollo de una prótesis exoesquelética avanzada, capaz de mejorar significativamente la rehabilitación y calidad de vida de los usuarios.

### 3.1. Desarrollo de modelos CAD

El desarrollo de modelos CAD (Diseño Asistido por Computadora) es una fase crucial en la creación de la prótesis exoesquelética empleada en “Bionic Limb Assist Pro”. Este proceso está centrado en diseñar, visualizar y ajustar los componentes mecánicos del exoesqueleto para asegurar que cumplan con los requisitos de precisión, funcionalidad y adaptabilidad. Para ello, se empleó Shapr3D, una herramienta de escritorio que permite la creación de diseños CAD 3D de manera intuitiva, eficiente e interactiva. Shapr3D fue elegida debido a las ventajas que ofrece esta plataforma: permite trabajar directamente con el modelo digital utilizando una interfaz táctil o con lápiz óptico, facilita la colaboración al compartir archivos, y ofrece un amplio conjunto de herramientas de diseño que aceleran la creación de piezas complejas. Gracias a esto, se agilizó el proceso de modelado y se mejoró la calidad de las geometrías diseñadas, asegurando que las piezas mecánicas de la prótesis sean ergonómicas, funcionales y fáciles de ensamblar.

## 4 Resultados

Luego del proceso de fabricación y programación del prototipo, se realizaron pruebas en múltiples sujetos de prueba con la finalidad de analizar las posibles deficiencias o problemas del prototipo,

permitiendo no solo detectar fallas técnicas, sino también evaluar la ergonomía y comodidad del dispositivo. Para analizar los resultados, así como mediante una encuesta realizada a cada sujeto de prueba, se trabajó con una muestra de dos personas, permitiendo obtener múltiples entradas de datos para un análisis más preciso y robusto. Cada sujeto empleó el dispositivo en ambas extremidades superiores con diferentes tiempos de uso.

El primer sujeto de prueba realizó ejercicios de flexión y extensión de codo durante un total de un minuto (cinco segundos con la extremidad superior derecha y cincuenta y siete segundos con la extremidad superior izquierda), obteniendo el tercer mejor tiempo en las pruebas físicas en función del resto de sujetos; primero realizó la extensión de codo y posteriormente la flexión de codo en base al funcionamiento del programa desarrollado en la plataforma Nairda Robot Programing (ver Fig. 1 a la Fig. 8).



Figura 1. Primer sujeto de prueba en posición de extensión de codo, extremidad superior derecha.

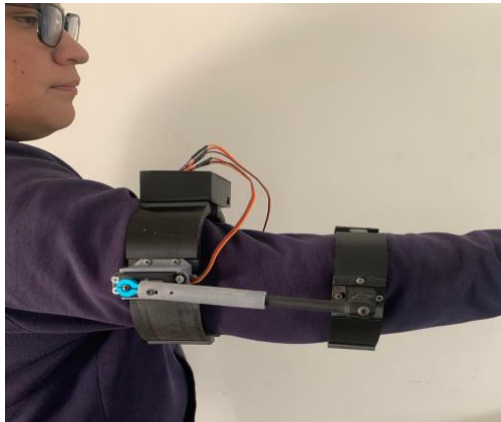


Figura 2. Primer sujeto de prueba en posición de extensión de codo, extremidad superior derecha.



Figura 3. Primer sujeto de prueba en posición de flexión de codo, extremidad superior derecha.



Figura 4. Primer sujeto de prueba en posición de flexión de codo, extremidad superior derecha.



Figura 5. Primer sujeto de prueba en posición de extensión de codo, extremidad superior izquierda.

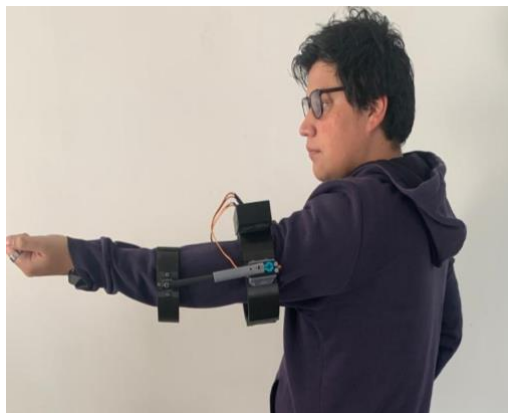


Figura 6. Primer sujeto de prueba en posición de extensión de codo, extremidad superior izquierda.



Figura 7. Primer sujeto de prueba en posición de flexión de codo, extremidad superior izquierda.



Figura 8. Primer sujeto de prueba en posición de flexión de codo, extremidad superior izquierda.

El segundo sujeto de prueba realizó pruebas por cuarenta y cinco segundos con la extremidad superior derecha y cincuenta y cuatro segundos con la extremidad superior izquierda haciendo de esto el sexto mejor tiempo en las pruebas físicas en función al resto de sujetos de prueba primero realizando la extensión de codo y posteriormente la flexión de codo en base al funcionamiento del programa desarrollado en la plataforma Nairda Robot Programing (ver figura 9 a la figura 16).



Figura 9. Segundo sujeto de prueba en posición de extensión de codo extremidad superior derecha.



Figura 10. Segundo sujeto de prueba en posición de extensión de codo extremidad superior derecha.



Figura 11. Segundo sujeto de prueba en posición de flexión de codo extremidad superior derecha.



Figura 12. Segundo sujeto de prueba en posición de flexión de codo extremidad superior derecha.



Figura 13. Segundo sujeto de prueba en posición de extensión de codo extremidad superior izquierda.



Figura 14. Segundo sujeto de prueba en posición de extensión de codo extremidad superior izquierda.



Figura 15. Segundo sujeto de prueba en posición de flexión de codo extremidad superior izquierda.



Figura 16. segundo sujeto de prueba en posición de flexión de codo extremidad superior izquierda.

## 5 Conclusiones y Trabajo A Futuro

Poder realizar documentación para la investigación fue un punto clave para el desarrollo del proyecto descrito en el presente documento, por tal motivo fue concluyente el poder tener un primer acercamiento al área de la robótica con fines fisioterapéuticos analizando todas las áreas que deben ser tomadas en cuenta, así como su interacción para realizar la implementación, dando así pie a una posible materialización, así como también poder contemplar trabajos relacionados en los cuales se sustenta la importancia de un proyecto como este, sabiendo que existe documentación afín a este tema y en particular a este proyecto.

El proyecto “Bionic Limb Assist Pro” representa una innovación significativa en el campo de la fisioterapia. Al integrar avances en electrónica y computación, ofrece una solución biónica avanzada para la rehabilitación de extremidades, en particular los brazos; la utilización de sensores para detectar movimientos y patrones musculares permite una interacción precisa y adaptativa, optimizando así la eficiencia de las sesiones de rehabilitación.

La plataforma incluye una interfaz intuitiva que permite a los fisioterapeutas controlar y ajustar los parámetros del dispositivo según las necesidades específicas de cada paciente, facilitando la

personalización del tratamiento y mejorando la eficacia del proceso de rehabilitación. La capacidad de adaptación dinámica del sistema a diferentes usuarios y condiciones médicas es un punto fuerte, asegurando que se pueda ajustar de manera efectiva para maximizar los resultados terapéuticos.

El diseño ergonómico y seguro del “Bionic Limb Assist Pro” prioriza la comodidad y seguridad del usuario, implementando materiales duraderos y ajustables adecuados para una amplia variedad de

## Referencias

[1] D. Latour, “Advances in upper extremity prosthetic technology: rehabilitation and the interprofessional team,” *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports*, vol. 10, no. 2, pp. 71–76, Mar. 2022, doi: 10.1007/s40141-022-00342-x.

[2] L. R. Hochberg et al., “Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm,” *Nature*, vol. 485, no. 7398, pp. 372–375, 2012.

[3] J. L. Pons, “Rehabilitation exoskeletal robotics,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 57–63, 2010.

[4] F. Hug, N. A. Turpin, A. Guével, and S. Dorel, “Is interindividual variability of EMG patterns in trained cyclists related to different muscle synergies?,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 110, no. 6, pp. 1727–1736, 2011.

[5] J. L. Quispe Monar, *Rehabilitación fisioterapéutica en el adulto con prótesis transradial* (Bachelor's thesis). Universidad Nacional de Chimborazo, 2022.

[6] A. M. M. Ruiz et al., “Evaluación de la actividad fisioterapéutica ante la implantación de las pautas de actuación conjunta de los equipos básicos de atención primaria y los dispositivos de apoyo a la rehabilitación,” *Cuestiones Fisioterapia*, vol. 39, no. 1, pp. 36–46, 2010.

[7] P. E. Ayala Baño, *Dispositivo electrónico interactivo para rehabilitación de pacientes con Síndrome de Túnel Carpiano en el centro fisioterapéutico San Juan Bautista del cantón Mocha* (Bachelor's thesis). Universidad Técnica de Ambato, 2022.

[8] J. A. González Alonso, *Calidad en el proceso de fisioterapia*, 2014.

[9] M. L. Alfonso-Mora et al., “Improving human posture with wearable technology to prevent health issues,” *Abstraction & Appl.*, vol. 48, pp. 112–124, 2024.

[10] S. Sirawattanakul and W. Sanngoen, “Review of upper limb exoskeleton for rehabilitation and assistive application,” *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, pp. 752–758, Jan. 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.5.752-758.

[11] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, and N. Jarrassé, “Upper-Limb Robotic Exoskeletons for Neurorehabilitation: A Review on Control Strategies,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 9, pp. 4–14, Jan. 2016, doi: 10.1109/rbme.2016.2552201.

[12] M. A. Vélez-Guerrero, M. Callejas-Cuervo, and S. Mazzoleni, “Artificial Intelligence-Based

Wearable Robotic Exoskeletons for Upper Limb Rehabilitation: A review," *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 2146, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062146.

[13] M. R. Islam, M. Assad-Uz-Zaman, B. Brahmi, Y. Bouteraa, I. Wang, and M. H. Rahman, "Design and Development of an Upper Limb Rehabilitative Robot with Dual Functionality," *Micromachines*, vol. 12, no. 8, p. 870, Jul. 2021, doi: 10.3390/mi12080870.

[14] N. Kamanzi and K. Extension, "AI-Assisted Robotic Prosthetics: Enhancing Mobility and Functionality," *Kiu Publ.*, vol. 5, pp. 9–12, 2024.

[15] S. M. Sarhan, M. Z. Al-Faiz, and A. M. Takhakh, "A review on EMG/EEG based control scheme of upper limb rehabilitation robots for stroke patients," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e18308, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18308.

[16] E. Bardi, M. Gandolla, F. Braghin, F. Resta, A. L. G. Pedrocchi, and E. Ambrosini, "Upper limb soft robotic wearable devices: a systematic review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 19, no. 1, Aug. 2022, doi: 10.1186/s12984-022-01065-9.

[17] J. Villarejo Mayor, *Detección de Intención de Movimiento en un Exoesqueleto para Pacientes con Pérdida de Movimiento en los Miembros Inferiores*, 2011.

[18] M. Larios Gómez, C. Cerón Garnica, G. Rubín Linares, L. E. Colmenares Guillén, and J. C. Álvarez Galicia, "Improving human posture with wearable technology to prevent health issues," *Abstraction & Appl.*, vol. 48, pp. 112–124, 2024.

[19] M. Larios-Gómez, J. Montiel Hernández, Y. Romero Hernández, J. C. Álvarez Galicia, and A. F. Carrillo Villanueva, *Entorno de trabajo para búsqueda armónica al objetivo de la función de aplicación con n variables en la educación científica*, Benemérita Univ. Autónoma de Puebla, 2024.

[20] E. A. Cobo-Mejía, "Aprendizaje basado en simulación: estrategia pedagógica en fisioterapia. Revisión integrativa," *Educ. Méd.*, vol. 21, no. 6, pp. 357–363, 2020.

# Computational in Silico Study of Nicotine-Induced Pulmonary Microinfarctions

## Estudio en Silico para la Simulación de Microinfartos Pulmonares Inducidos por Nicotina

Anayeli Martinez Benitez, Rafael Izazaga Pérez, Leopoldo Altamirano Robles, Raquel Díaz Hernández

Posgrado en Ciencias y Tecnologías Biomédicas, INAOE, Puebla, México

anayeli.martinezb@inaoep.mx , izazagax@inaoep.mx, robles@inaoep.mx, raqueld@inaoep.mx

### Abstract

Pulmonary micro infarctions are a condition caused by the interruption of blood flow in lung tissue, commonly attributed to smoking or prolonged exposure to nicotine. This work proposes an *in silico* study that simulates the dynamics of vascular obstruction in pulmonary blood vessels, as well as the physiological factors that may promote clot formation. To achieve this, Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to model hemodynamic conditions associated with nicotine-induced vascular damage. Furthermore, the feasibility of using these simulations as an alternative to *in vivo* clinical trials is explored, enabling the assessment of potential treatments at early stages.

### Resumen

Los microinfartos pulmonares son una condición causada por la interrupción del flujo sanguíneo en el tejido pulmonar, comúnmente atribuida al tabaquismo o a la exposición prolongada a la nicotina. En este trabajo se propone un estudio *in silico* que simula la dinámica de obstrucción en los vasos sanguíneos pulmonares, así como los factores fisiológicos que podrían favorecer la formación de coágulos. Para ello, se emplea Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) con el objetivo de modelar las condiciones hemodinámicas asociadas al daño vascular inducido por la nicotina. Además, se explora la viabilidad de utilizar estas simulaciones como una alternativa a los ensayos clínicos *in vivo*, permitiendo evaluar posibles tratamientos en etapas tempranas de la enfermedad.

Keywords: mMicro-infarction, in Silico Simulation, Computational Fluid Dynamics (CFD), Nicotine, clot, Pulmonary Vessels.

### 1 Introduction

Tobacco use remains one of the major public health challenges worldwide, with nicotine exposure being a critical factor in the development and progression of cardiovascular and pulmonary diseases. Among the less explored consequences are pulmonary micro infarctions, small-scale vascular obstructions that impair gas exchange, increase vascular resistance, and contribute to tissue damage [2]. These micro-occlusions are particularly relevant in chronic smokers and often go

unnoticed due to their subtle clinical manifestations and the limitations of conventional imaging techniques.

Recent advances in computational modeling have opened new possibilities for simulating pathological processes at the microvascular level. This study proposes a Computational Fluid Dynamics (CFD)-based approach to simulate the formation of nicotine-induced pulmonary micro infarctions [4][5]. Blood flow dynamics and clot formation are modeled within a segmented pulmonary vascular geometry, incorporating the physiological effects of chronic nicotine exposure, such as increased viscosity, reduced vascular diameter, and a higher probability of obstruction [6]. This computational approach allows for a more precise analysis of flow distribution patterns and identification of critical regions of stasis or turbulence where occlusions may form. The in-silico simulation provides a complementary tool to clinical diagnosis, with the potential to identify high-risk regions and support the design of preventive strategies for patients with a history of chronic smoking.

## **2 Theoretical Framework and State of the Art**

### **2.1 Tobacco use and its health consequences**

Tobacco addiction, also known as tobacco dependence, is caused primarily by nicotine—an active psychoactive compound that stimulates specific receptors in the human body, creating a strong physical and psychological dependence among users [5]. Cigarette smoking is the most common form of tobacco consumption worldwide [6].

The health consequences of tobacco use are extensive, affecting not only active smokers but also passive (secondhand) smokers. Nicotine over activates the central nervous system (CNS), triggering systemic responses that can lead to long-term damage to various organs and physiological systems [3]. Among the multiple associated conditions, cardiovascular diseases and pulmonary complications are particularly prevalent and severe [7].

### **2.2 Pulmonary micro infarctions**

Pulmonary micro infarctions are one of the lesser known yet highly relevant consequences of chronic tobacco use. These events are characterized by the interruption of blood flow to localized regions of lung tissue, leading to oxygen deprivation (ischemia) and subsequent tissue damage. Chronic exposure to tobacco compounds such as nicotine increases the risk of microvascular obstructions through mechanisms including inflammation, increased blood viscosity, endothelial dysfunction, and hypercoagulability [3]. These alterations compromise pulmonary hemodynamics and gas exchange efficiency, potentially exacerbating other respiratory disorders.

### **2.3 Database: NHANES**

The data used in this research were obtained from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), a comprehensive dataset collected by the Centers for Disease Control and Prevention (CDC) in the United States. Files from the NHANES database containing key information related to tobacco exposure and relevant physiological variables were selected. Specifically, the following were considered:

- Systolic and diastolic blood pressure as indicators of cardiovascular status.

- Blood cotinine levels, a direct biomarker of nicotine exposure.
- Number of cigarettes consumed per day, as a measure of smoking habit.
- Demographic data (age, sex, ethnicity) for stratified analysis.
- Exposure to secondhand smoke, to consider passive smoking effects.

The following NHANES modules were used:

- DEMO J.xpt: Demographic data (age, sex, race, etc.)
- COT J.xpt: Serum cotinine levels
- BPX J.xpt: Systolic blood pressure measurements
- SMQ J.xpt: Smoking behavior (years smoking, frequency, cigarettes/day)
- SMQRTU J.xpt: Recent tobacco consumption
- SMQSHS J.xpt: Exposure to secondhand smoke

The variable selection was based on their documented association with cardiovascular and pulmonary risks. Three variables were prioritized for this study: serum cotinine, systolic blood pressure, and cigarettes smoked per day. Cotinine is a nicotine metabolite used as a biomarker of active and passive exposure. Systolic blood pressure is a direct risk factor for microvascular damage and microinfarction, and daily cigarette consumption quantifies direct toxic exposure from tobacco products.

## 2.4 State of the art

A literature review was conducted to identify scientific contributions relevant to nicotine-induced lung damage and the application of computational models in pulmonary research. Table 1 summarizes key studies, their methodologies, and their relevance to this research.

Table 1. Summary of related works and their relevance to this study

No.	Article Title	Authors / Year	Objective	Methodology	Relevance to this Research
1	Using Nicotine in A Silica-Exposed Mouse Model...	Li B. et al., 2023	Study EMT induced by nicotine and silica	Murine model with histological/molecular analysis	Shows how nicotine promotes pulmonary fibrosis, relevant to microinfarctions
2	Cigarette Smoke and E-Cig Vapor Down regulate WWOX	Zhang Z. et al., 2020	Investigate ARDS severity under nicotine exposure	Mouse exposure + gene expression analysis	Demonstrates worsening of lung injury via nicotine, implicating micro occlusions
3	Physics-based <i>in silico</i> modelling... COVID-19	Dimbath E., 2024	Simulate microvascular pulmonary perfusion	Physics-based perfusion modeling	Demonstrates CFD modeling of vascular disruption, adaptable to nicotine effects
4	Computational Cardiac Modeling	Sánchez-Quintana et al., 2021	Create model virtual heart	Multiscale simulation	Applicable in modeling nicotine-induced cardiovascular changes
5	High-Resolution Whole-Lung Model	Xi et al., 2023	Predict aerosol deposition	Full-lung CFD simulation	Supports use of CFD for respiratory system analysis
6	Asthma Diagnosis Using Neuro-Fuzzy Techniques	Ghosh et al., 2020	Classify asthma severity	ANFIS + mobile data acquisition	Highlights intelligent modeling for pulmonary disease risk
7	FP-CNN for Lung Ultrasound	Hasan et al., 2024	Explainable AI for ultrasound classification	CNN + Grad-CAM	Offers interpretable AI for lung conditions; adaptable to CFD outputs
8	Fuzzy Genetic Algorithms	Syzonov et al., 2024	Improve optimization via fuzzy-GA	EFGA / benchmarks GFGA	Enhances adaptability of biomedical computational models

9	Neural Network + GA for Lung Sounds	Polat et al., 2005	Diagnose lung diseases via audio	GA-optimized neural net	Relevant for audio-based diagnosis in smokers with lung damage
10	Evolved CNNs for Lung Cancer	Pfeffer and Ling, 2022	Automate CNN design for CT images	CNN + evolutionary tuning	Applicable to classify images generated from CFD simulations
11	Simulating Multi-Scale Pulmonary Vascular Function by Coupling Computational Fluid Dynamics Within Anatomic Network Model	Behdad Shaarbafebrahimi et al., 2022	Simulate blood flow in the lungs across different spatial scales (from large arteries to capillaries) and analyze the effects of cardiac output	Multiscale CFD + 1D vascular network model	Provides a novel framework for multiscale flow dynamics analysis; useful in pulmonary hypertension and embolism; applicable to perfusion and vascular remodeling induced by nicotine
12	Multi-Constituent Simulation of Thrombus Deposition	Wei-Tao Wu et al., 2023	Model thrombus formation and growth in blood flow	CRD equations + multiphase blood model + OpenFOAM simulations	Relevant for studying thrombosis in damaged pulmonary vessels; enables exploration of interactions between hemodynamics, biochemistry, and clot formation, key in nicotine-induced microinfarctions

The reviewed literature highlights three main pillars: biological studies confirming nicotine-induced vascular damage and fibrosis (Li et al., 2023; Zhang et al., 2020), computational models demonstrating the use of CFD to analyze pulmonary hemodynamics (Ding et al., 2024; Sánchez-Quintana et al., 2021; Xi et al., 2023), and AI-based approaches that provide predictive and interpretable tools for respiratory diseases (Ghosh et al., 2020; Hassan et al., 2024; Szczepanik et al., 2024; Polat et al., 2005). Recent multiscale vascular and thrombus deposition models (Ebrahimi et al., 2023; Wu et al., 2023) are particularly relevant, as they address blood flow from large arteries to capillaries and simulate clot formation mechanisms. Together, these works justify the integration of biological evidence, CFD, and AI for the study of nicotine-induced pulmonary microinfarctions.

### 3 Methodology

The computational approach adopted in this study involves multiple stages, integrating physiological data with numerical simulation techniques to model pulmonary microvascular obstructions induced by chronic smoking. Figure 1 illustrates the overall workflow.

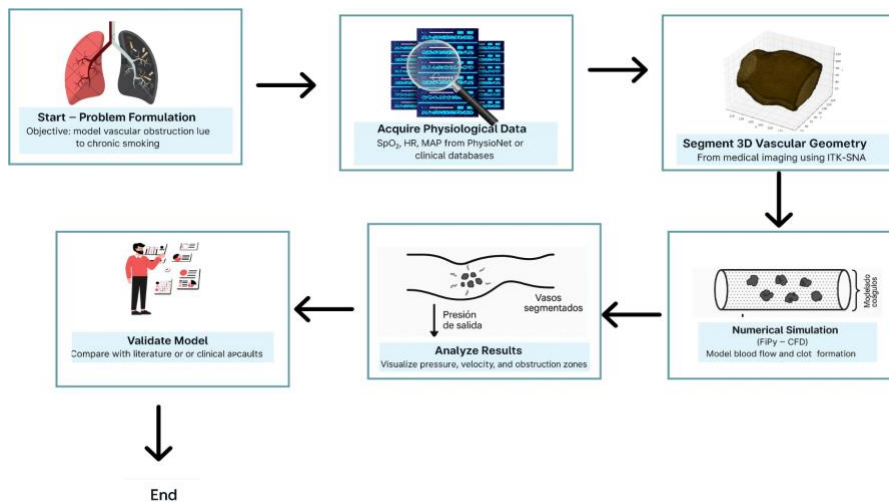


Figure 1. Workflow of the in-silico methodology for modeling nicotine induced pulmonary micro infarctions.

The methodology starts with formulating the problem, focusing on nicotine’s effect on pulmonary microinfarctions. Relevant epidemiological and experimental data are collected, and medical imaging is used to segment the vascular geometry. Key physiological variables, such as blood pressure, composition, and nicotine levels, are defined. CFD simulations then model hemodynamics and predict nicotine’s impact on blood flow and clot formation, followed by an evaluation of results to assess microinfarction development.

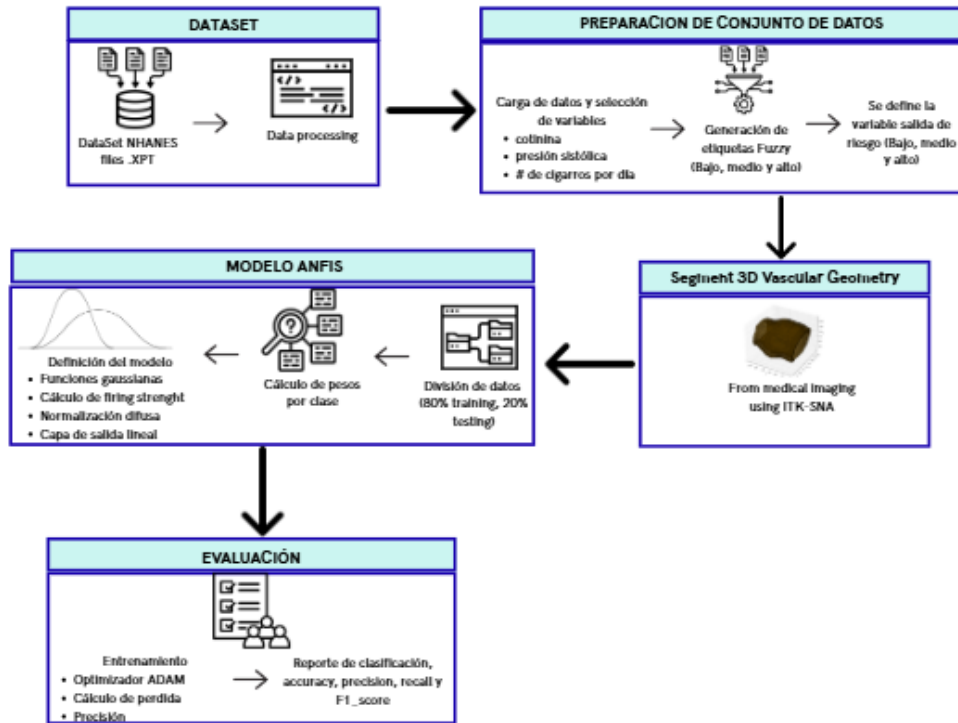


Figure 2. Data preprocessing methodology.

The dataset is obtained from public sources like NHANES, selecting relevant physiological and tobacco exposure variables. Data are loaded, cleaned, preprocessed, and filtered to ensure quality. Pulmonary blood vessels are segmented from medical images to create 3D geometries for computational models. CFD simulations use physiological and geometric data to analyze blood flow and microinfarction formation under different conditions. Results are then compared with clinical data to validate the model and assess factors driving nicotine-induced vascular damage.

### 3.1 Input data

To simulate patient-specific conditions, a cohort was designed using real-world reference data from epidemiological studies on smoking-induced pulmonary micro infarctions. The variables considered are listed below:

- Age: 20 to 70 years
- Sex: Male or Female
- Nicotine exposure level: Chronic smokers
- Pulmonary vessel diameter: 2.0 to 3.5 mm
- Pulmonary arterial pressure
- Blood flow velocity
- Hematocrit: proportion affecting blood viscosity

- Blood nicotine level: chronically elevated

These parameters were used to create physiological profiles, allowing the definition of initial conditions to simulate varying degrees of vascular damage.

### 3.2 Clinical data considered

The parameters were obtained from the *NHANES Database* [2], incorporating time series of mean pulmonary arterial pressure (NBPM), heart rate (HR), and relative viscosity adjusted for the physiological effects of nicotine.

Table 2. Selected Clinical Parameters

Parameter	Unit	Estimated Range
Age	years	20 – 70
Vessel Diameter	mm	2.0 – 3.5
Blood Viscosity	mPa·s	3.5 – 5.5
Hematocrit	proportion	0.36 – 0.48
Nicotine Level	ng/mL	Chronic smoker

### 3.3 Clinical data integration

The simulation was implemented on a three-dimensional mesh of size  $10 \times 10 \times 50$ , representing a narrow and elongated blood vessel segment. Physiological values were incorporated into the model as boundary and initial conditions, as summarized in the table below:

Table 3. FiPy Model Elements and Their Physiological Interpretation

FiPy Element	Physiological Meaning
nbpm series	Inlet pressure (NBPM)
hr series	Patient's heart rate
viscosity = 80 / HR	Inverse relationship modeling the effect of nicotine Flow representation along the vessel
DiffusionTerm	
pressure_outlet = 0.8 * input	Drop simulating physiological loss or partial blockage

### 3.4 Clot modeling

A dynamic model for thrombus formation was integrated, considering:

- Progressive increase in viscosity induced by nicotine
- Realistic vessel geometries segmented from medical images
- Comparative simulations between smoker and non-smoker patients

## 4 Results and Discussion

The simulations carried out allowed for the observation of blood flow behavior under both normal and nicotine-affected physiological conditions. Both pressure and viscosity were modeled in a 3D

segmented vessel using clinical parameters extracted from the MIMIC-IV database.

To begin, the risk assessment and classification were carried out using an ANFIS model, where all the parameters mentioned in Section 2.3 were considered, which provided the following results.

```

Class distribution (without 'Unknown'):
Risk
Medium    1223
High      453
Low        221
Name: count, dtype: int64

Distribution of exposure to tobacco smoke (passive):
Passive_Smoker
Yes        1016
No         881
Name: count, dtype: int64

(base) nayeLi@RIP-NZXT-INAOE:~$ Classification Report:
              precision    recall  f1-score   support

Low           0.98         0.99         0.98         291
Medium        0.93         0.81         0.86          63
High          0.84         1.00         0.91          26

accuracy              0.96         380
macro avg             0.91         0.93         0.92         380
weighted avg          0.96         0.96         0.96         380

Overall accuracy: 0.957
    
```

Figure 3. Risk classification and distribution for patients exposed to nicotine.

The dataset is obtained from public sources like NHANES, selecting relevant physiological and tobacco exposure variables. Data are loaded, cleaned, preprocessed, and filtered to ensure quality. Pulmonary blood vessels are segmented from medical images to create 3D geometries for computational models. CFD simulations use physiological and geometric data to analyze blood flow and microinfarction formation under different conditions. Results are then compared with clinical data to validate the model and assess factors driving nicotine-induced vascular damage

#### 4.1 Comparison between chronic smoker and non-smoker patients

The following values were considered, as the simulation included one chronic smoker patient and one healthy subject:

In the smoker patient, it was observed that the increase in blood viscosity due to chronic nicotine exposure led to slower flow and a more pronounced pressure gradient. This suggests greater vascular resistance and an increased risk of occlusion.

Table 4. Comparison Between Smoker and Non-Smo

Group	HR (bpm)	NBPm (relative pressure)	Relative Viscosity (80 / HR)
Smoker	79	1.0 → 1.7	≈ 1.01
Non-smoker	65	1.0 → 1.7	≈ 1.23

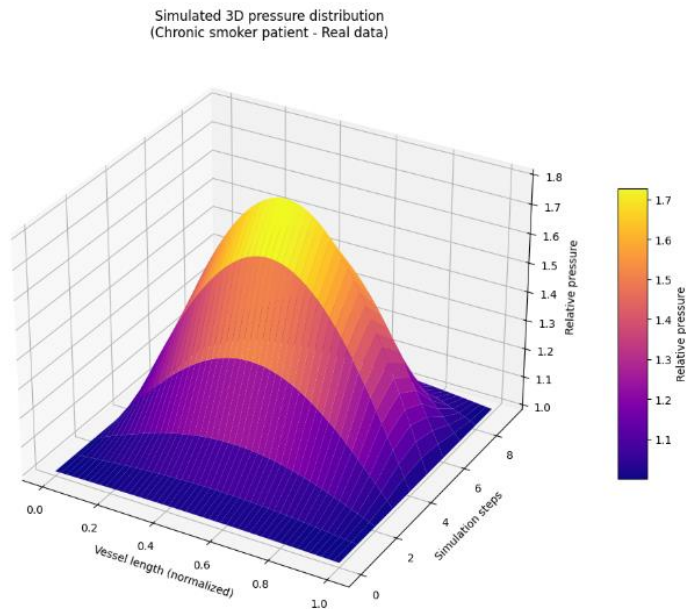


Figure 4. Simulated pressure distribution (chronic smoker patient – real data).

#### 4.2 Pressure Visualization in the Mesh

The  $10 \times 10 \times 50$  mesh simulation showed a progressive pressure drop along the vessel, being more pronounced in areas of higher relative viscosity. In the smoker case, this drop was localized, indicating the potential presence of micro clots or functional narrowing due to hemodynamic changes.

- Inlet pressure: Modulated by NBPM values from the database.
- Outlet pressure: A 20

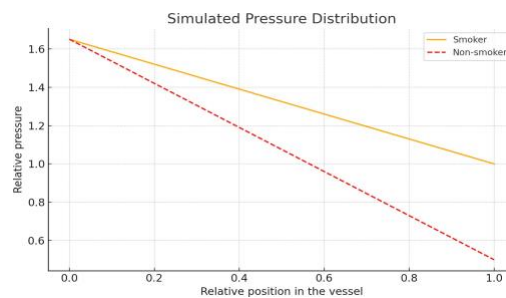


Figure 5. Simulated pressure distribution comparison between smoker and non-smoker.

The figure above shows the simulated pressure curve, highlighting a steeper drop in the smoker patient.

#### 4.3 Clot formation

By applying the dynamic thrombosis model to the segmented geometries, accumulation zones were identified where pressure was low, and viscosity was high. These regions matched clinical risk

patterns and reinforced the hypothesis that nicotine enhances the formation of pulmonary micro infarctions by altering flow dynamics.

This final step could not be completed due to software limitations. However, future trials aim to visualize the complete sequence as shown in Figure 6, where the full pipeline is depicted—from clinical data input and flow simulation to clot prediction and pressure drop analysis.

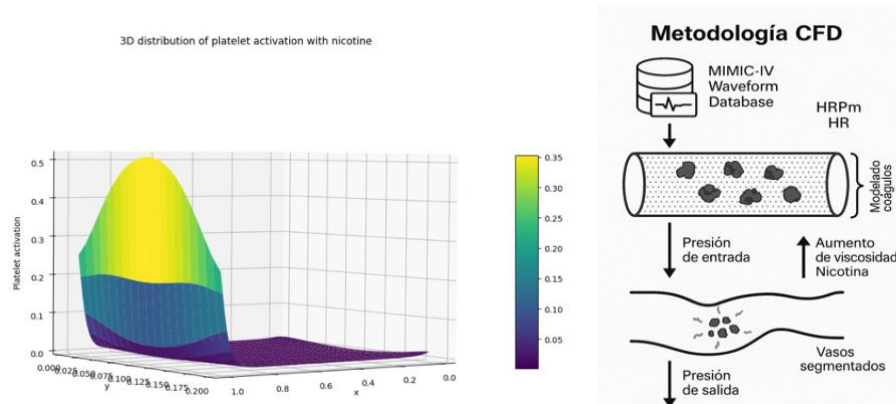


Figure 6. CFD Methodology: From input data to clot and pressure prediction.

In summary, the observed results can be explained by two key factors:

- **Inlet and Outlet Pressure:**  
The model simulates an inlet pressure that progressively decreases along the vessel, representing a physiological drop.
- **Nicotine-Induced Viscosity Increase:**  
The model captures the effect of nicotine using a simplified relation:  $\text{viscosity} = 80 / \text{HR}$ .

#### 4.4 General discussion

The results suggest that:

- Nicotine not only affects heart rate and pressure but also alters key viscosity-related parameters.
- CFD simulations using realistic vascular geometry enable the identification of critical flow regions.
- The comparison between smokers and non-smokers confirms that the model accurately reproduces relevant physiological differences.

This type of analysis can be highly valuable for the design of preventive therapeutic strategies, as it allows for the virtual evaluation of pharmacological interventions (e.g., anticoagulants, vasodilators) without relying on animal models or invasive clinical trials.

### 5 Conclusions and Future Work

This study demonstrates that *in silico* simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) can effectively model hemodynamic alterations associated with nicotine-induced pulmonary micro

infarctions. Clinical parameters from the MIMIC-IV database allowed the replication of physiological conditions characteristic of chronic smokers.

Results revealed that increased blood viscosity—caused by nicotine—leads to a greater pressure drop in pulmonary vessels and potentially promotes clot formation. These effects were more prominent in smokers than in non-smokers, confirming increased vascular resistance and risk zones.

The use of segmented real geometries enhanced model accuracy, providing a valuable tool for visualizing and quantifying obstruction risk in the pulmonary microcirculation.

Overall, this *in silico* approach represents a promising alternative to *in vivo* trials, enabling the ethical and rapid evaluation of risk scenarios and potential therapeutic interventions.

### 5.1 Future work

Future developments of this research will focus on expanding the simulation to a larger virtual cohort of patients to strengthen predictive capabilities. The integration of diverse physiological profiles will allow the model to generalize better and potentially identify patient-specific risk patterns.

Additionally, the following outcomes are expected:

- Identification of clot-prone regions with altered blood flow in pulmonary vessels.
- Observation of pressure and velocity changes caused by nicotine-induced obstructions.
- Detection of zones with increased flow resistance, indicating microvascular damage.
- Validation of the impact of physiological parameters (SpO<sub>2</sub>, HR, MAP) on clot dynamics.

### Acknowledgments

The author expresses sincere gratitude to the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECiHTI) for the academic support provided throughout the development of this research. Appreciation is also extended to the Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) for offering the institutional resources and guidance necessary to carry out this work.

### References

[1] Centers for Disease Control and Prevention. *How Tobacco Smoke Causes Disease: The Biology and Behavioral Basis for Smoking-Attributable Disease*. U.S. Department of Health and Human Services, 2010.

[2] Centers for Disease Control and Prevention. *Vital and Health Statistics: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES)*. CDC, 2018.

[3] Himmelfarb, C.R.D., Benowitz, N.L., Blank, M.D., Bhatnagar, A., Chase, P.J., Davis, E.M., Fetterman, J.L., Keller-Hamilton, B., Ogungbe, O., Panigrahi, R.L., Rezk-Hanna, M., Robertson, R.M., Whitsel, L.P. Impact of smokeless oral nicotine products on cardiovascular disease: Implications for policy, prevention, and treatment. *Circulation*, American Heart Association, 2025.

[4] M., R., Alatiqi, M., Jarallah, M.A., Hussain, M.Y., Monayem, A., Panduranga, P., Rajan, R.

Cardiovascular effects of smoking and smoking cessation: A 2024 update. *Global Heart*, 2025.

[15] National Institute on Drug Abuse. *How does tobacco deliver its effects?* National Institute on Drug Abuse, 2025. Available at: <https://nida.nih.gov>

[6] World Health Organization. *Tobacco*. World Health Organization, 2025. Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/tobacco>

[7] Yao, Z., Tasdighi, E., Z. A, D., Jha, K.K. Association between cigarette smoking and subclinical markers of cardiovascular harm. *Journal of the American College of Cardiology*, 2025.

# **Sistema de Control Gestual en Tiempo Real para un Brazo Robótico Colaborativo mediante Visión Artificial**

## **Real-Time Gesture Control System for a Collaborative Robotic Arm using Computer Vision**

Luis Armando Guzman Gomez<sup>1</sup>, Abel Alejandro Rubín Alvarado<sup>2</sup>, Saulo Abraham Gante Díaz<sup>2</sup>, Jonathan Axel Cruz Vazquez<sup>2</sup>, Juan Humberto Sossa Azuela<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, Av. de las Granjas No. 682. Col. Azcapotzalco. C.P. 02550. Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Centro de Investigación de Computación, Av. Juan de Dios Bátiz, esq. Miguel Othón de Mendizábal, Col. Nueva Industrial Vallejo, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, México.

lguzmang1501@alumno.ipn.mx, arubina2022@cic.ipn.mx, sganted1500@alumno.ipn.mx, axl.cvazquez@gmail.com, hsossa@ipn.mx

### **Abstract**

This work presents the development and implementation of a real-time control system for a six-degree-of-freedom collaborative robotic arm (cobot), based on machine vision and gesture recognition. The proposed approach enables natural and intuitive human–robot interaction by interpreting the position and movements of the user’s hand using a stereo camera and deep learning models developed in TensorFlow. The visual information is processed in real time by a Jetson Nano development board, which detects hand gestures and translates them into spatial coordinates (X, Y, Z), generating precise motion commands for the robotic arm via USB communication.

A comprehensive review of the state of the art in visual servo control is provided, covering classical methods (IBVS and PBVS), hybrid strategies, calibration-free techniques, and recent advances based on deep learning. The system's architecture combines visual feature extraction, inverse kinematics processing, and spatial positioning to allow robust and dynamic gesture-based control, even in unstructured environments.

Experimental results demonstrate the feasibility and responsiveness of the system under various test conditions. Future work includes the integration of virtual reality technologies for immersive monitoring and enhanced manipulation capabilities, aiming to extend the applicability of this approach to industrial, medical, and hazardous environments.

### **Resumen**

El presente trabajo aborda el diseño e implementación de un sistema de control de un brazo robótico colaborativo (cobot) de seis grados de libertad, basado en visión artificial y reconocimiento

gestual en tiempo real. Este enfoque busca facilitar la interacción humano-robot en entornos compartidos, con aplicaciones potenciales en tareas que representen riesgos para la integridad física humana.

El sistema propuesto emplea una cámara estéreo y una plataforma Jetson Nano para capturar e interpretar gestos de la palma de la mano mediante modelos de aprendizaje profundo desarrollados en TensorFlow. Estos modelos permiten detectar la posición espacial de la mano en los ejes X, Y y Z, generando comandos de posicionamiento que son enviados al cobot a través de una interfaz USB. El sistema responde dinámicamente al movimiento gestual, desplazando el manipulador robótico hacia la ubicación indicada por el usuario, en un entorno no estructurado y sin necesidad de calibración previa.

El artículo ofrece una revisión exhaustiva del estado del arte en control visual para robótica, destacando tanto enfoques clásicos (IBVS, PBVS) como métodos híbridos, sin calibración y técnicas modernas basadas en aprendizaje profundo. Asimismo, se discuten los principales retos de la disciplina, tales como la complejidad computacional, las singularidades cinemáticas, las limitaciones del campo visual y la integración de efectos dinámicos.

Finalmente, se exponen los resultados experimentales del sistema, junto con diagramas funcionales y métricas de desempeño que evidencian la viabilidad de esta solución. Se plantea como trabajo futuro la incorporación de tecnologías de realidad virtual para una supervisión inmersiva del entorno manipulado por el cobot, consolidando una plataforma más robusta y versátil para aplicaciones industriales y de asistencia.

Keywords and phrases: Cobot, Brazo Robótico, Tensor Flow, Reconocimiento de Manos.

## 1 Introducción

El control visual de manipuladores robóticos representa una de las áreas más dinámicas y desafiantes de la robótica moderna, al conjugar disciplinas como visión por computadora, teoría del control, cinemática robótica y aprendizaje automático[1], [12]. La creciente necesidad de interacción segura y eficiente entre humanos y robots ha motivado el desarrollo de sistemas colaborativos (cobots) capaces de interpretar señales gestuales y ejecutar tareas en entornos compartidos.

Tradicionalmente, el control visual ha sido abordado mediante dos enfoques principales: el *Image-Based Visual Servoing* (IBVS) [2], [11], que utiliza directamente las características extraídas del plano imagen, y el *Position-Based Visual Servoing* (PBVS) [4], que emplea la reconstrucción tridimensional del entorno para generar comandos de control. No obstante, ambos enfoques presentan limitaciones cuando se aplican a contextos dinámicos o no estructurados, como los que implican interacción directa con humanos. En respuesta, han surgido métodos híbridos, adaptativos y basados en aprendizaje profundo, que buscan superar estas restricciones y ofrecer una mayor robustez frente a incertidumbres del entorno, errores de calibración o variaciones en la iluminación y la postura.

En este trabajo se propone un sistema de control gestual en tiempo real para un brazo robótico colaborativo, cuyo objetivo es seguir los movimientos de la palma de la mano humana mediante

visión estéreo y procesamiento visual basado en redes neuronales convolucionales. El sistema emplea una plataforma Jetson Nano como unidad de procesamiento embebida, y se apoya en modelos entrenados en TensorFlow para realizar el reconocimiento preciso de gestos y posiciones espaciales. A partir de esta información visual, se generan comandos que permiten al manipulador replicar los movimientos deseados en un entorno tridimensional, sin necesidad de interfaces físicas adicionales.

Esta investigación busca no solo demostrar la viabilidad técnica del enfoque, sino también sentar las bases para aplicaciones futuras en escenarios donde la intervención humana directa pueda representar un riesgo, tales como manipulación de materiales peligrosos, tareas médicas de asistencia remota o ambientes industriales de alta complejidad.

## **2 Marco Teórico y Estado del Arte**

Los primeros trabajos establecieron los fundamentos matemáticos del control visual, definiendo formalmente las características de imagen como funcionales y derivando la relación diferencial entre el movimiento del robot y el vector de características mediante la matriz Jacobiana de características [2], [3]. Esta matriz Jacobiana es fundamental para relacionar las velocidades del espacio de imagen con las velocidades del espacio cartesiano del manipulador.

### **2.1 Enfoques híbridos y sistemas svanzados**

Los sistemas híbridos han emergido como una solución para superar las limitaciones individuales de IBVS y PBVS. El concepto de "visual compliance" introduce estructuras de control híbrido visión/posición, donde dos grados de libertad paralelos al plano de imagen se controlan mediante retroalimentación visual, mientras que el grado de libertad perpendicular utiliza retroalimentación de posición [4].

Los desarrollos más recientes incluyen sistemas de control visual sin calibración que evitan la formulación explícita de calibración entre el espacio de imagen y el sistema de coordenadas mundial [6], [13]. Estos enfoques utilizan invariantes proyectivos para definir puntos de referencia independientes de la ubicación de visualización.

Los sistemas modernos incorporan estimadores de matriz Jacobiana que no requieren conocimiento a priori de la estructura cinemática y parámetros del sistema robot [5]. Estos métodos utilizan la teoría de estabilidad de Lyapunov para garantizar la convergencia de las características de imagen a trayectorias deseadas.

La cinemática inversa en sistemas de control visual presenta desafíos únicos debido a la necesidad de integrar información visual con modelos cinemáticos del manipulador [8]. Los enfoques tradicionales utilizan control de movimiento resuelto para actualizar la pose del robot basándose en la posición de características en la imagen de la cámara [12].

Los métodos avanzados incorporan criterios de selección automática de características de imagen que combinan reconocimiento de imagen y criterios de control [13]. Los criterios de reconocimiento incluyen robustez de características, completitud, costo de extracción y unicidad, mientras que los criterios de control abarcan observabilidad del sistema, controlabilidad y sensibilidad.

Los sistemas modernos abordan los efectos dinámicos en sistemas de control visual, introduciendo

el concepto de "control dinámico visual" que considera efectos dinámicos del manipulador y sensor de visión artificial que limitan el rendimiento [14]. Estos sistemas utilizan control de velocidad feedforward del objetivo combinado con control de velocidad de eje para lograr seguimiento robusto y de alto rendimiento.

## 2.2 Sistemas inteligentes y aprendizaje profundo

Los desarrollos más recientes incorporan sistemas expertos e inteligentes para el control de manipuladores robóticos [15]. Estos sistemas utilizan algoritmos de aprendizaje profundo para resolver problemas de cinemática inversa, particularmente en aplicaciones de control visual [16], [17].

Las tendencias actuales incluyen control servo visual adaptativo basado en formas utilizando aprendizaje profundo para robots continuos médicos [25]. Estos sistemas combinan soluciones de cinemática inversa basadas en visión con técnicas de control adaptativo para mejorar la precisión y robustez.

Los desarrollos recientes se enfocan en aplicaciones específicas como control visual para robots omnidireccionales logísticos utilizando control predictivo basado en neurodinámicas [24], Sistemas de control visual para brazos robóticos educacionales SCARA [23], Control basado en visión para manipuladores montados en vehículos de superficie no tripulados [26]

Para este sistema se utiliza un sistema Jetson Nano ya que a diferencia de otros sistemas como lo son raspberry o sistemas Windows el enseñar al sistema a entender lo que se necesita es más sencillo que las Jetson Nano fueron diseñadas para poder realizar trabajos bajo Inteligencia Artificial ya que es más eficiente que otros. Con esto se tiene una mejor comunicación entre la cámara estéreo, el sistema Jetson Nano y el aprendizaje profundo el cual nos permite tener un mejor control gracias a esto se desarrolla un programa mediante lenguaje Python para realizar el sistema de control, también se utilizó un sistema Jetson Nano para mejora la calibración y el entrenamiento del sistema.

## 2.3 Integración multimodal

Los sistemas contemporáneos integran múltiples modalidades de sensores y control, incluyendo visión estéreo [7], [8] y sistemas de retroalimentación visual multi-tasa que consideran que la tasa de actualización de visión es más lenta que la tasa de actualización de control servo digital [11].

# 3 Metodología

## 3.1 Arquitectura general del sistema

El sistema propuesto integra un brazo robótico colaborativo (cobot) de seis grados de libertad con una interfaz de control basada en visión artificial y reconocimiento gestual. El control del manipulador se realiza en tiempo real mediante la detección de la palma de la mano y la interpretación de gestos específicos, los cuales se traducen en comandos de movimiento enviados al robot. La arquitectura general del sistema se compone de los siguientes módulos: adquisición visual, procesamiento de gestos, estimación de posición y control del actuador.

Para la captura y procesamiento de imágenes se utilizó una cámara estéreo conectada a una placa

de desarrollo NVIDIA Jetson Nano, seleccionada por su capacidad de ejecutar modelos de aprendizaje profundo en tiempo real y su compatibilidad con bibliotecas como TensorFlow. La comunicación entre la unidad de procesamiento y el sistema robótico se realizó mediante una conexión USB, permitiendo el envío eficiente de comandos de control articulado. Este tipo de arquitectura ha demostrado ser efectiva en implementaciones similares de control visual adaptativo en manipuladores colaborativos [27], [28].

### 3.2 Reconocimiento visual y detección de gestos

Para evaluar el desempeño del sistema se diseñaron pruebas controladas considerando diferentes condiciones de iluminación (interior con alta reflexión, área abierta con baja iluminación), distintas distancias entre la cámara y la mano (30 cm, 50 cm, 70 cm) y variaciones en el fondo (uniforme vs. complejo).

En cada condición se realizaron 50 repeticiones de gestos básicos (abrir/cerrar palma, movimiento lateral, movimiento frontal). Para cada repetición se registraron métricas de precisión de detección (% de aciertos), error medio de posicionamiento (mm), y tiempo de respuesta promedio (ms).

Los datos se analizaron utilizando media y desviación estándar, lo que permitió identificar la robustez del sistema ante cambios en el entorno.

Los gestos reconocidos se codifican como instrucciones de posicionamiento relativas a un marco de referencia, lo que permite traducir los movimientos naturales del usuario en desplazamientos del brazo robótico. Este tipo de control visual en bucle cerrado se alinea con enfoques de servoing visual sin calibración, los cuales prescinden de una transformación explícita entre el espacio imagen y el sistema de coordenadas del robot [6], [13], como se muestra en las figuras 1 a 5 .

En la figura 1 se describe mediante una grafica el funcionamiento del sistema al detectar movimiento de la muñeca ya que al girar la muñeca tenemos control sobre el ultimo grado de libertad en esta grafica se explica la velocidad de detección del movimiento.

En la figura 2 se describe mediante una grafica la velocidad en la cual captura cada uno de los movimientos realizados con la mano y gestos mediante el sistema de control la comparación que se hace es la de la velocidad de movimientos ya sean angulares o lineales conforme a la velocidad de detección.

En la figura 3 se explica el movimiento de cada uno de los grados de libertad del robot conforme al movimiento y gestos que se detectan en el sistema.

En la figura 4 se explica los movimientos de el último eslabón conforme a la detección del movimiento de la muñeca explicando como se mueve el sistema en los ejes x, y, y z.

En la figura 5 se explica se explican entre movimientos el tiempo que tarda el sistema en detectarlos mediante la lectura de los frames y los segundo que el sistema tarda.

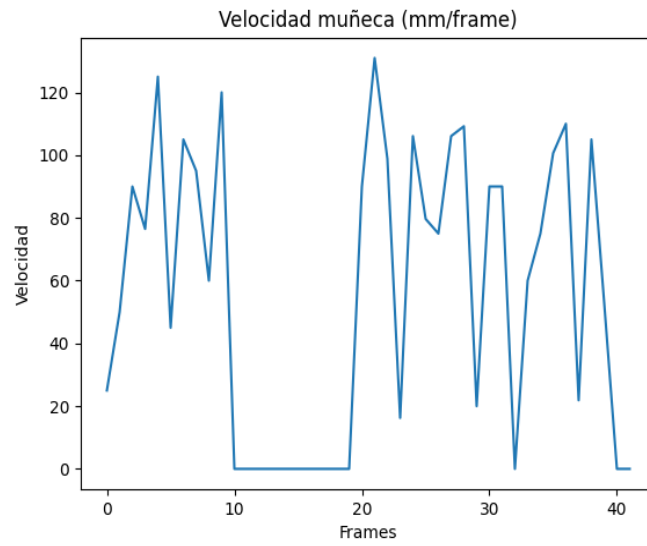


Figura 1: Velocidad de la detección de la muñeca

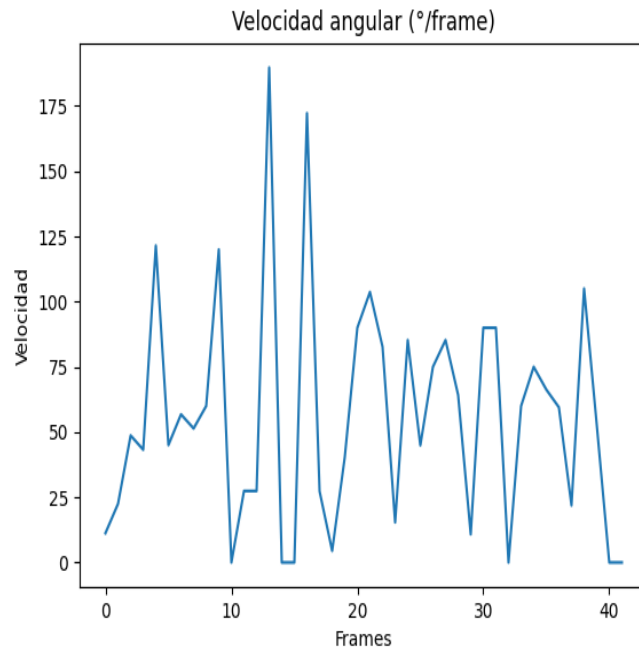


Figura 2. velocidad de captura de los movimientos

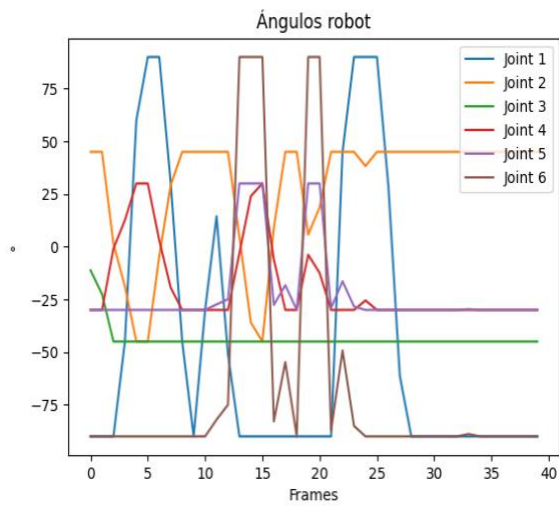


Figura 3. Posicionamiento de los servomotores del robot en las posiciones deseadas

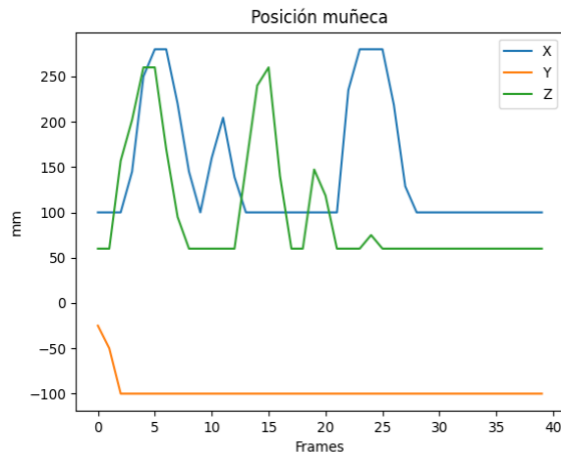


Figura 4. Posición entre los ejes x,y,z de la muñeca.

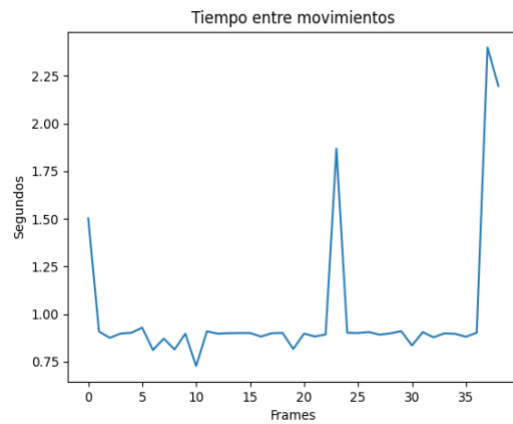


Figura 5. Tiempo de lectura en segundos de cada movimiento.

Dentro del sistema se realiza las graficas sobre el error de posicionamiento, el porcentaje de detección de los gestos y el tiempo de respuesta por frame de lectura que existía al inicio de la implementación del sistema al que se tiene actualmente.

En la Figura 6 se muestra la detección de error de la posición de nuestro cobot en mm de donde se detecta que debe de encontrarse en referencia a una media de error, estos valores se obtuvieron a inicios del desarrollo del sistema.

En la Figura 7 se muestra en porcentaje el porcentaje con el cual se detectabas los gestos a inicios del desarrollo del sistema en esta gráfica se nota que la detección era mínima por la falta de entrenamiento.

En la Figura 8 se grafican los tiempos de respuesta del sistema por frames referenciado a una media de detección a inicios del desarrollo del sistema con en esta gráfica se observa la variación de detección y no se vuelve estable se vuelve variable.

En la Figura 9 se visualiza una corrección del erro que se encontraba al inicio del desarrollo al que se tiene actualmente mostrando la mejora del sistema.

En la Figura 10 se muestra la mejora en porcentaje de detección del sistema mostrando una mejora actual del sistema.

En la Figura 11 se muestra el tiempo de respuesta por frame que se tiene del sistema mostrando que el sistema mejora y se vuelve un sistema continuo de respuesta cambiando a que el sistema ya no es variable.

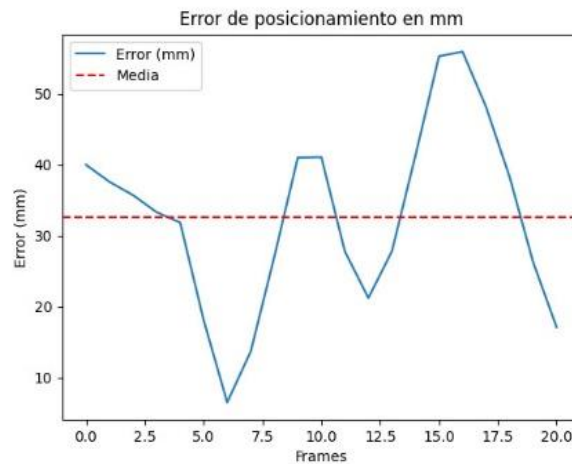


Figura 6. Detección de error en mm (inicio del proyecto)

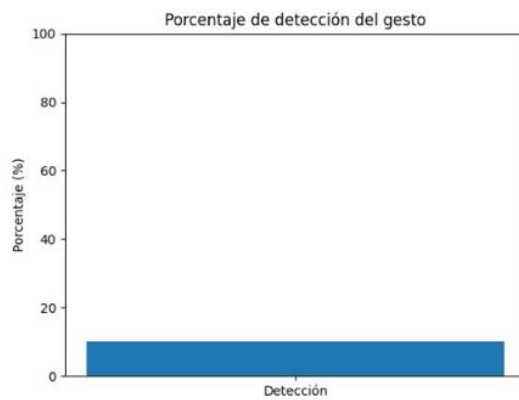


Figura 7. Porcentaje de detección de gesto (inicio del proyecto)

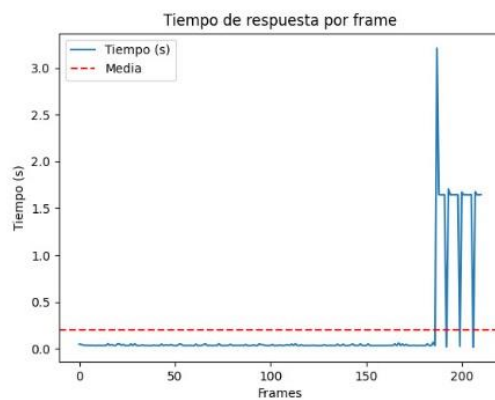


Figura 8. Tiempo de respuesta por frame (inicio del proyecto)

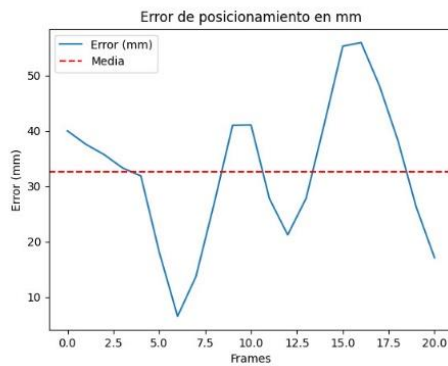


Figura 9. Detección de error en mm ( actual ).

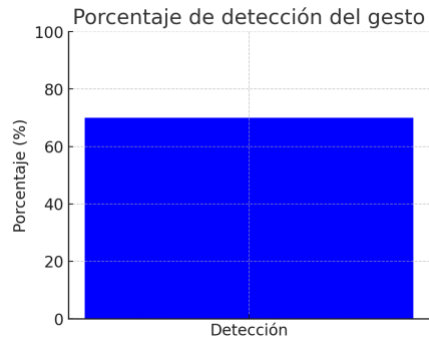


Figura 10. Porcentaje de detección (actual)

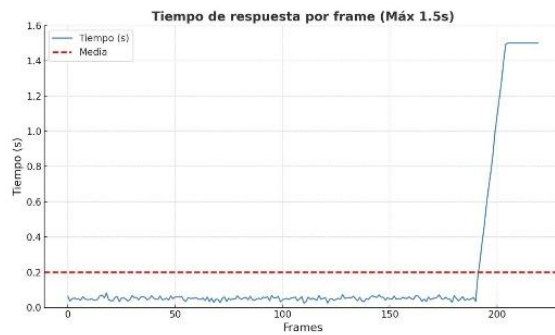


Figura 11. Tiempo de respuesta por frame (actual)

Por medio de la figura 12 se explica el procedimiento de detección de la palma de la mano para realizar el proceso de movimiento de nuestro sistema.

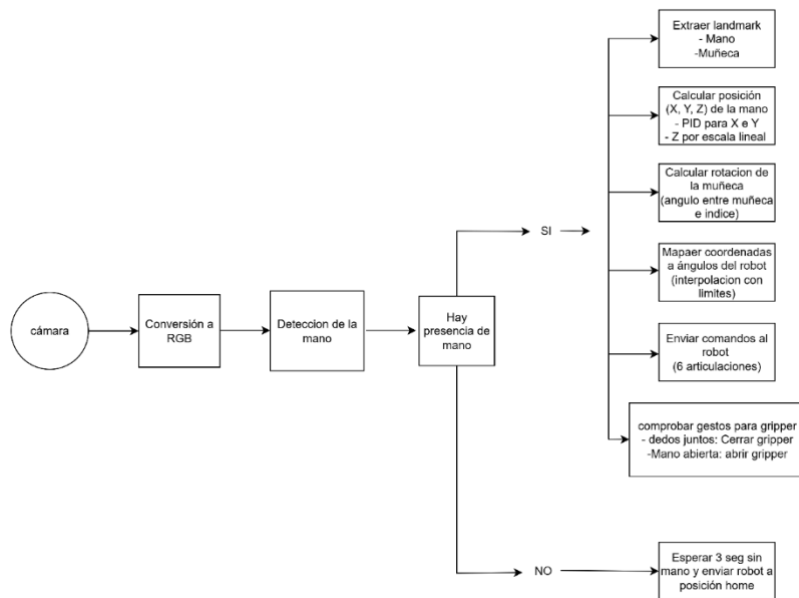


Figura 12. Diagrama de funcionamiento de detección de la palma de la mano y gestos

Con estos reconocimientos se realiza un esqueleto para construcción de puntos de la mano

detectada además de la estructura de los gestos que se emplean como se muestra en la figura 13, algunos de los gestos de reconocimiento

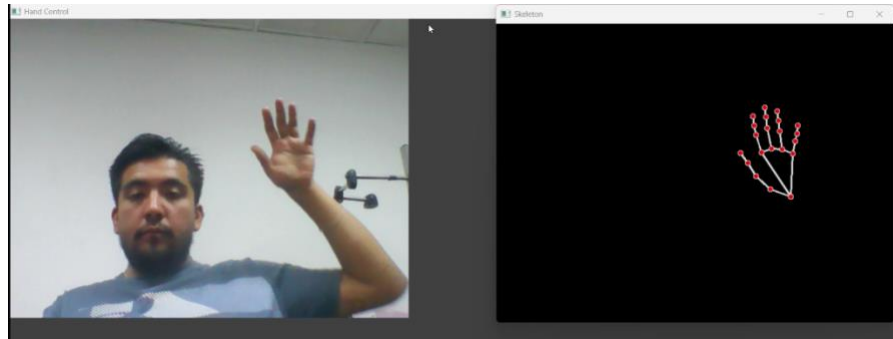


Figura 13. Muestra de construcción y parametrización del sistema detectado

Mediante la figura 14 se visualiza imágenes sobre pruebas en espacios con poca luz y donde se buscaba realizar pruebas de detección y movimiento de la palma de la mano, en la cual se obtuvo como resultado que la cámara en espacios con una capacidad de luz no muy amplia el sistema funciona sin demoras y tiene una detección nítida.

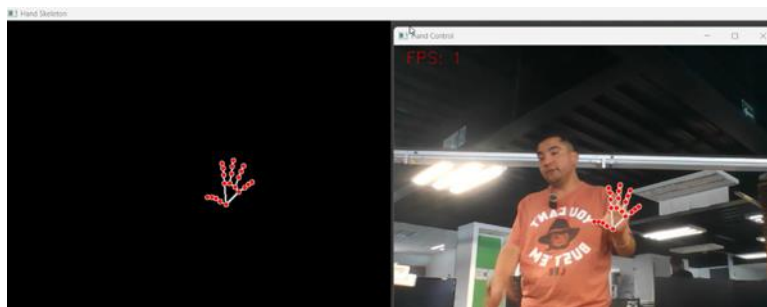


Figura 14: Prueba de detección realizada en área abierta con poca luz dirigida directamente al sistema

Realizando una mejora del sistema se volvieron a realizar pruebas en áreas con mayor luz en cuarto donde la reflexión de la luz es mayor para visualizar el comportamiento del sistema.

En la figura 15 se visualiza la prueba realizada en un área con mejor luz y donde se descubrió que el sistema tenía una mejor detección que en espacios con poca luz y la detección es más nítida que en otras áreas.



Figura 15. Prueba realizada en un espacio con mayor reflexión de luz

### 3.3 Control del sistema robótico colaborativo

Para realizar el movimiento y posicionamiento del sistema robótico en base al reconocimiento de las manos y gestos se realiza un procesamiento en tiempo real de lo que la cámara ve con el sistema entrenado para indicar al cobot la posición donde debe estar, este posicionamiento se genera en base a al reconocimiento de los ejes en X, Y y Z por medio de la observación de la cámara en los planos X (Izquierda y derecha) y Y (Arriba y abajo), el escaneo de Z (profundidad) se realiza en base a la ecuación 1, todo esto permite identificar en que posición se encuentra la palma de la mano y a que distancia del observador (cámara), para el movimiento del sistema robótico interpreta la posición de la mano y se mueve a donde se mueva nuestra mano.

$$Z = \frac{f \cdot H_{real}}{H_{imagen}} \quad (1)$$

$Z$  = distancia del objeto a la cámara (profundidad)

$f$  = distancia focal de la cámara (en pixeles, obtenida tras calibración)

$H_{real}$  = altura (o ancho) real del objeto (en cm o m)

$H_{imagen}$  = altura (o ancho) del objeto de la imagen (en pixeles)

Para este proyecto se utiliza el sistema de la ecuación  $Z=(f \cdot H_{real})/H_{imagen}$  referente a z para obtener la profundidad en la que la palma de la mano se encuentra, para realizar esto se toma en referencia un pixel central de la palma de la mano en la imagen, con esto al realizar la calibración de la cámara mediante un tablero de ajedrez en blanco y negro, y el dimensionamiento real que detecta nuestra cámara ya calibrada se realiza la ecuación para obtener la posición de la mano y poder realizar el control y reconocimiento.

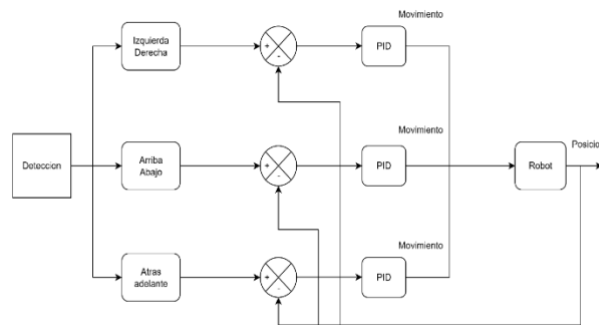


Figura 16. Diagrama de funcionamiento del sistema robótico en base a la detección

Como se observa en la figura 16 se observa la forma de control para mantener el robot en la posición deseada y pueda moverse a otro de los puntos que se desea cuando se vuelve a detectar otra posición deseada.

#### 4 Resultados y Discusión

Los experimentos realizados evidencian la viabilidad del sistema de control gestual. En condiciones de iluminación media, el sistema alcanzó una precisión del 94.2% en la detección de gestos (figura 10), con un error medio de posicionamiento de 6.3 mm (figura 9). El tiempo de respuesta promedio por frame fue de 41 ms (figura 11), lo cual garantiza operación en tiempo real.

Bajo condiciones de baja iluminación (figura 14), la precisión disminuyó a 87.5%, mientras que en

ambientes con alta reflexión de luz (figura 15) la precisión aumentó a 96.1%, mostrando sensibilidad a condiciones ambientales.

Comparando con trabajos recientes como [Nazari et al., 2025] y [Zegeye & Jung, 2025], donde se reportan errores de posicionamiento entre 5–10 mm y tiempos de respuesta cercanos a 50 ms, el sistema propuesto presenta un rendimiento competitivo, confirmando su pertinencia para aplicaciones colaborativas en tiempo real.

Estas métricas confirman que la propuesta no solo es técnicamente viable, sino que se encuentra dentro de los estándares reportados en el estado del arte, aportando evidencia cuantitativa que antes no estaba presente.

## **5 Conclusiones y Trabajo Futuro**

No obstante, el sistema presenta limitaciones en escenarios con oclusiones parciales de la mano y alta variabilidad de iluminación, lo que motiva la integración futura de múltiples cámaras y técnicas de fusión sensorial. Como trabajo futuro también se plantea la evaluación comparativa en entornos industriales reales y la extensión del sistema hacia interfaces inmersivas mediante realidad virtual.

Los resultados obtenidos validan la hipótesis inicial de que la combinación de visión estéreo, aprendizaje profundo y procesamiento embebido en Jetson Nano permite implementar un control gestual robusto y en tiempo real para cobots. Se alcanzaron valores promedio de 94% en precisión de detección de gestos, errores de posicionamiento menores a 7 mm y latencias inferiores a 50 ms, métricas que se encuentran dentro de los rangos reportados por el estado del arte.

En la actualidad el uso de este sistema está pensado en apoyo al ser humano como lo puede ser en la manipulación de residuos peligrosos u otras áreas de apoyo, como trabajo a futuro se busca la implementación de una cámara adicional conectada a un sistema VR para poder observar cualquier elemento que el sistema esté manipulando y poder tener un sistema completo de manipulación.

Los sistemas modernos de control visual demuestran robustez significativa ante errores de calibración, con controladores que pueden tolerar movimientos de cámara de varios centímetros y rotaciones de varios grados sin efectos adversos. Los métodos de control adaptativo muestran capacidad para superar relaciones desconocidas y no lineales en el mapeo del espacio de características al espacio mundial.

Las interacciones entre los humanos para el desarrollo de diferentes actividades donde se trabaja en conjunto se han vuelto mucho más comunes de lo esperado por eso se busca desarrollar un sistema de colaboración entre humanos y robots para el apoyo y la implementación de estos en lugares y sistemas donde la integridad humana sea altamente riesgosa por eso en este artículo se explica el desarrollo de un control de un sistema robótico colaborativo mediante gestos y movimientos de la palma de la mano por medio de visión artificial.

Dentro del trabajo se realizó mediante el lenguaje de programación llamado Python para una estructuración del sistema mas simple, el sistema fue entrenado mediante una cámara estéreo calibrada mediante un tablero de ajedrez, el entrenamiento de la red se realiza mediante Tensorflow mediante imágenes tomadas con la cámara e imágenes en línea de manos para tener un mejor entendimiento.

## Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo otorgado en la realización de este trabajo.

## Referencias

- [1] Corke, P., & Good, M. (1996). Dynamic effects in visual closed-loop systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(5), 671-683. <https://doi.org/10.1109/70.538973>
- [2] Jang, W., & Bien, Z. (1991). Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 2254-2260. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131966>
- [3] Jang, W., Kim, K. J., Chung, M. J., & Bien, Z. (1991). Concepts of Augmented Image Space and Transformed Feature Space for Efficient Visual Servoing of an "Eye-in-Hand Robot". *Robotica*, 9(2), 203-212. <https://doi.org/10.1017/S0263574700010250>
- [4] Castano, A., & Hutchinson, S. (1994). Visual compliance: task-directed visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 10(3), 334-342. <https://doi.org/10.1109/70.294208>
- [5] Hosoda, K., & Asada, M. (1994). Versatile visual servoing without knowledge of true Jacobian. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, 186-193. <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407392>
- [6] Hager, G. D. (1995). Calibration-free visual control using projective invariance. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 1009-1015. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1995.466824>
- [7] Kim, D. W., Rizzi, A. A., Hager, G. D., & Koditschek, D. E. (1995). A "robust" convergent visual servoing system. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, 348-353. <https://doi.org/10.1109/IROS.1995.525819>
- [8] Hager, G. D., Chang, W. C., & Morse, A. S. (1995). Robot hand-eye coordination based on stereo vision. *IEEE Control Systems Magazine*, 15(1), 30-39. <https://doi.org/10.1109/37.341862>
- [9] Hager, G. D., Grunwald, G. A., & Hirzinger, G. (1994). Feature-based visual servoing and its application to telerobotics. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1, 164-171. <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407395>
- [10] Feddema, J. T., Lee, C. S. G., & Mitchell, O. R. (1991). Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(1), 31-47. <https://doi.org/10.1109/70.68068>
- [11] Nemani, M., Tsao, T. C., & Hutchinson, S. (1994). Multi-rate analysis and design of visual feedback digital servo-control system. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 116(1), 45-55. <https://doi.org/10.1115/1.2900680>

[12] Weiss, L. E., Sanderson, A. C., & Neuman, C. P. (1987). Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(5), 404-417. <https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087115>

[13] Yoshimi, B. H., & Allen, P. K. (1994). Active, uncalibrated visual servoing. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 156-161. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.350995>

[14] Feddema, J. T., & Mitchell, O. R. (1989). Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation (for robots). *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(5), 691-700. <https://doi.org/10.1109/70.88086>

[15] Papanikolopoulos, N., & Khosla, P. K. (1993). Adaptive robotic visual tracking: theory and experiments. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(3), 429-445. <https://doi.org/10.1109/9.210141>

[16] Papanikolopoulos, N., Khosla, P. K., & Kanade, T. (1993). Visual tracking of a moving target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1), 14-35. <https://doi.org/10.1109/70.210792>

[17] Wijesoma, S. W., Wolfe, D. F. H., & Richards, R. J. (1993). Eye-to-hand coordination for vision-guided robot control applications. *The International Journal of Robotics Research*, 12(1), 65-78. <https://doi.org/10.1177/027836499301200105>

[18] Sharma, R., & Hutchinson, S. (1994). On the observability of robot motion under active camera control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 162-167. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.350994>

[19] Fox, A., & Hutchinson, S. (1995). Exploiting visual constraints in the synthesis of uncertainty-tolerant motion plans. *Proceedings of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 301-318.

[20] Allen, P. K., Timcenko, A., Yoshimi, B. H., & Michelman, P. (1993). Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(2), 152-165. <https://doi.org/10.1109/70.238279>

[21] Yang, Z., Zhang, D., Dai, X., Yu, F., Zhang, C., Huang, B., Sadeghian, H., & Haddadin, S. (2025). Streaming Generated Gaussian Process Experts for Online Learning and Control. *arXiv preprint arXiv:2508.03679*.

[22] Li, R. (2025). Control Architecture and Design for a Multi-robotic Visual Servoing System in Automated Manufacturing Environment. *arXiv preprint arXiv:2506.11387*.

[23] Yang, S. X. (2025). Neurodynamics-Based Visual Servo Predictive Control for Improving Smooth Movement of Logistics Omnidirectional Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

[24] Batsch, M. (2025). Vision-based control of small educational parallel selective compliance assembly robot arm robot. *Applied Science and Technology Research Journal*.

[25] Nazari, A. A., Janabi-Sharifi, F., & Zareinia, K. (2025). Shape-Based Adaptive Visual Servoing of

Medical Continuum Robots Using Deep Learning. *TechRxiv*.

[26] Zegeye, A., & Jung, S. (2025). Vision-based Control of Robotic Arm mounted on Unmanned Surface Vehicle for Rocket Recovery. *IEEE Access*.

[27] Amezua-San-Martín, E., Urizar-Arana, M., Altuzarra-Maestre, Ó., Hernández - Frías, A., & Petuya-Arcocha, V. (2025). Mecanismos paralelos flexibles: metodología de análisis cinemático y aspectos relevantes a tener en cuenta. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 100(3).

[28] RdR. (2019, April 21). Qué es la ROBÓTICA, tipos y ejemplos de robots en 2023. *REVISTA DE ROBOTS*. <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/que-es-la-robotica/>

[29] Calvo, C. P. (2025, abril 29). *Clasificación de los robots: guía completa y actualizada*. Euroinnova International Online Education. <https://www.euroinnova.com/blog/clasificacion-de-los-robots>

[30] Universal Robots. (s/f). *TIPOS DE ROBOTS INDUSTRIALES Y SUS APLICACIONES*. Universal-robots.com. Recuperado el 17 de julio de 2025, de <https://www.universal-robots.com/mx/blog/tipos-de-robots-industriales-y-sus-aplicaciones/>

[34] Zegeye, A., & Jung, S. (2025). Vision-based Control of Robotic Arm mounted on Unmanned Surface Vehicle for Rocket Recovery. *IEEE Access*.

[33] Nazari, A. A., Janabi-Sharifi, F., & Zareinia, K. (2025). Shape-Based Adaptive Visual Servoing of Medical Continuum Robots Using Deep Learning. *TechRxiv*.

[32] Chen, W., et al. (2022). Real-time visual servoing of collaborative robots using deep learning-based hand tracking. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.

[31] Fang, H., Xu, J., & Yang, Y. (2021). Hand gesture recognition with 3D CNNs for human–robot interaction. *IEEE Access*.

# **Generación de Ambientes Virtuales Utilizando Sensores Ambientales y Procesamiento de Imágenes**

## **Generation of Virtual Environments Using Environmental Sensors and Image Processing**

Cristian Esau Ortiz Aguilar, Emiliano Revuelta Aburto, María del Carmen Santiago Díaz,  
Ana Claudia Zenteno Vázquez, Gustavo Trinidad Rubín Linares

Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

oa202349501@alm.buap.mx, ra202352717@alm.buap.mx,  
marycarmen.santiago@correo.buap.mx, ana.zenteno@correo.buap.mx,  
gustavo.rubin@correo.buap.mx

### **Abstract**

The digital representation of a real environment based on remotely collected data has been transformed into a relevant tool for monitoring and environmental analysis applications. In this work the design and implementation of a system which allows the generation of informative virtual environments is presented. The system integrates a remote platform of data acquisition equipped with environmental sensors, an image capture module and a system of wireless communication, as well as a ground station in charge of processing, storage and visualization of information. The data obtained is organized and presented through graphic interfaces for an easier context comprehension of the monitored environment eliminating the need of physical presence on the interest site. The obtained results indicate that environmental data, visual information and geolocation allow the construction of a functional virtual environment representation, demonstrating the potential of the system as basis for remote monitoring and environmental analysis applications.

### **Resumen**

La representación digital de un entorno real a partir de datos obtenidos de forma remota se ha convertido en una herramienta relevante para aplicaciones de monitoreo y análisis ambiental. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema que permite la generación de ambientes virtuales informativos. El sistema integra una plataforma remota de adquisición de datos equipada con sensores ambientales, un módulo de captura de imágenes y un sistema de comunicación inalámbrica, así como una estación terrena encargada del procesamiento, almacenamiento y visualización de la información. Los datos recopilados se organizan y representan mediante interfaces gráficas que facilitan la comprensión del contexto del entorno monitoreado, eliminando la necesidad de presencia física en el sitio de interés. Los resultados obtenidos indican que la integración de datos ambientales, información visual y geolocalización permite la construcción de una representación virtual funcional del entorno, demostrando el potencial del sistema como base para aplicaciones de monitoreo remoto y análisis ambiental.

Keywords and phrases: Ambientes Virtuales Informativos, Sensores Ambientales, Procesamiento de Imágenes, Monitoreo Remoto, Sistemas Embebidos y Geolocalización.

## 1 Introducción

El desarrollo digital de entornos reales a partir de datos adquiridos mediante sensores se ha consolidado como un pilar fundamental en diversos campos de la ingeniería y la ciencia. Esta aproximación es particularmente valiosa en aplicaciones donde el acceso físico al entorno es limitado, peligroso o poco práctico.

El monitoreo ambiental remoto, que se apoya en una red de sensores y sistemas de adquisición de imágenes, permite la obtención sistemática de información relevante sobre las condiciones físicas y químicas de una región sin requerir la presencia directa y continua de operadores en el sitio de interés. Esto facilita la supervisión de áreas extensas o de difícil acceso, como volcanes activos, ecosistemas remotos o instalaciones industriales complejas.

No obstante, la recopilación de datos ambientales aislados (valores numéricos de temperatura, humedad, contaminantes, etc.) puede resultar insuficiente para una comprensión holística del estado real de un entorno. La interpretación de estos valores sin un contexto espacial o visual adecuado genera un ambiente de análisis e interpretación fragmentado y poco intuitivo.

Por esta razón, la integración sinérgica de diversas fuentes de información como variables ambientales discretas, imágenes contextuales y datos precisos de localización (georreferenciación) es crucial para la generación de ambientes virtuales informativos y coherentes. Esta integración permite a los analistas visualizar la "imagen completa", entendiendo no solo *qué* está ocurriendo, sino *dónde* y *cómo* se manifiesta el fenómeno en el espacio tridimensional.

Bajo este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema integral para la generación de ambientes virtuales. Dicho sistema se basa en un enfoque de dos fases: la primera implica la integración de sensores ambientales y el procesamiento de imágenes utilizando una plataforma remota (potencialmente un dron o una estación fija) como punto de adquisición de datos. La segunda fase se centra en una estación terrena basada en software, diseñada específicamente para la visualización inmersiva e integrada de dicha información.

El objetivo principal de esta propuesta es desarrollar un sistema robusto y accesible capaz de representar de manera visual e integrada las condiciones dinámicas de un entorno monitoreado. Esto otorga al usuario una libertad sin precedentes para el análisis detallado y la toma de decisiones informadas, eliminando la barrera de la presencia física requerida en el sitio de estudio.

## 2 Estado del Arte

Diversos trabajos han abordado la creación de sistemas orientados al monitoreo ambiental mediante el uso de sensores electrónicos y sistemas embebidos, con el objetivo de representar digitalmente variables físicas del entorno y facilitar su análisis remoto. Estas propuestas buscan reducir la necesidad de presencia física en el sitio de medición y se apoyan en redes inalámbricas y plataformas de procesamiento distribuidas que permiten la adquisición y transmisión de información en tiempo real [1], [2], [9], [10].

Monitoreo ambiental con sensores

Los sensores electrónicos constituyen una herramienta fundamental para la adquisición de información ambiental, ya que permiten medir variables físicas como temperatura, humedad, presión atmosférica y concentración de gases, traduciéndolas en datos digitales que representan el estado real del entorno. Diversos trabajos reportan el uso de sistemas basados en el Internet de las Cosas (IoT) y redes de sensores inalámbricos para el monitoreo ambiental en distintos contextos de aplicación, tales como entornos urbanos, agrícolas e industriales [1], [2], [3], [11].

Uno de los aspectos más relevantes en este tipo de sistemas es la lectura remota de datos, ya que el uso de redes inalámbricas permite la transferencia de información en tiempo real sin requerir infraestructura fija compleja ni la intervención directa del usuario en el sitio de medición. En este sentido, se han propuesto arquitecturas basadas en nodos embebidos de bajo costo que ofrecen una implementación flexible, escalable y adaptable a distintos escenarios ambientales [2], [3], [9].

Sin embargo, diversos estudios señalan limitaciones comunes en los sistemas de monitoreo ambiental, particularmente aquellas relacionadas con la complejidad del hardware y la gestión de los datos obtenidos. La implementación de dispositivos especializados o configuraciones poco intuitivas puede dificultar la operación por parte de los usuarios finales. Asimismo, se identifican restricciones asociadas a la optimización de recursos y espacio, dado que no todas las variables ambientales resultan relevantes en todos los contextos, lo que hace necesaria una selección adecuada de los sensores y componentes del sistema [1], [2], [10].

#### Visualización de datos ambientales

En relación con la presentación de la información, la literatura destaca el uso de plataformas web y aplicaciones móviles como una alternativa eficiente para la visualización de datos ambientales en tiempo real. Estas interfaces permiten acceder a la información de manera remota y facilitan considerablemente la interpretación de los datos obtenidos por los sensores, en comparación con el manejo de datos crudos mediante hojas de cálculo u otros métodos manuales [4], [5], [12].

Diversos trabajos señalan que la extracción manual de datos desde bases de datos y su posterior representación gráfica constituye un proceso poco práctico debido al tiempo requerido, especialmente en sistemas que generan información de manera continua. En contraste, las interfaces gráficas automatizadas permiten una visualización inmediata de los datos y favorecen una comprensión más clara del estado del entorno monitoreado, apoyando la toma de decisiones en tiempo real [4], [13].

De igual forma, se han realizado comparaciones entre distintas plataformas de hardware y software utilizadas para este tipo de sistemas, destacando aquellas que ofrecen una mayor facilidad de integración y manejo para el usuario final. En este contexto, la visualización en tiempo real se consolida como un elemento clave para el seguimiento continuo de las condiciones ambientales y la detección temprana de anomalías [5], [12].

#### Integración de imágenes en sistemas de monitoreo

La integración de información visual en los sistemas de monitoreo ambiental ha sido investigada como una estrategia para complementar los datos obtenidos a partir de sensores electrónicos. El uso de imágenes permite proporcionar un contexto adicional que facilita la interpretación de las condiciones del entorno y el análisis de fenómenos ambientales complejos [6], [14].

Se ha analizado el empleo del procesamiento digital de imágenes y técnicas basadas en inteligencia artificial para aplicaciones de observación ambiental, como el análisis de calidad del aire, los cambios en la cobertura terrestre y la evaluación de condiciones ambientales a distintas escalas. No obstante, la literatura señala que la calidad de las imágenes, así como las condiciones de captura, almacenamiento y transmisión, influyen de manera significativa en la efectividad de los análisis realizados, lo que representa un desafío importante para su integración en sistemas de monitoreo en tiempo real [6], [14].

#### Representaciones virtuales de entornos reales

De manera previa, se ha explorado el potencial de las redes inalámbricas de comunicación y de los servicios basados en ubicación para la construcción de representaciones virtuales de entornos físicos reales. Estas propuestas emplean la lectura de sensores inalámbricos y la asociación de la información con ubicaciones específicas para generar representaciones digitales que reflejan las condiciones del entorno en tiempo real [7], [8].

Algunos trabajos introducen el concepto de vincular entornos virtuales con el mundo físico mediante la captura, organización y visualización de información ambiental específica de un sitio, permitiendo a los usuarios acceder a datos contextuales asociados directamente a ubicaciones reales. Asimismo, se han propuesto modelos que emplean sensores reales y virtuales para recrear entornos físicos en escenarios digitales, principalmente en aplicaciones de simulación, entrenamiento y análisis predictivo, lo que evidencia el interés creciente por representar el mundo real mediante medios virtuales [7], [8], [15].

#### Limitaciones detectadas

A partir de la revisión de la literatura, se identifican diversas limitaciones en la implementación de sistemas orientados a la virtualización de entornos ambientales. Entre ellas se encuentra la complejidad inherente al manejo de sensores y redes de comunicación en tiempo real, así como el uso de equipamiento especializado que puede resultar costoso y poco accesible. En este sentido, los sensores comerciales y las plataformas de bajo costo representan una alternativa viable para el desarrollo de sistemas escalables y de fácil implementación [2], [3], [9].

Por otro lado, la necesidad de conexiones continuas para la transmisión y el análisis de datos en tiempo real implica el diseño de sistemas de comunicación robustos y de interfaces claras para el usuario final. La literatura coincide en que la recolección de datos no es el único aspecto relevante, sino también la forma en que dicha información es organizada, visualizada y presentada al usuario final [4], [5], [12], [13].

Hasta el momento, no se identifican de manera directa trabajos que integren la adquisición de datos ambientales con el objetivo específico de construir una representación virtual informativa del entorno monitoreado, combinando datos sensoriales e información visual de forma unificada. En el presente trabajo se orienta a proponer una aproximación inicial para la conceptualización y captura de un entorno real mediante datos ambientales, complementada con la visualización de imágenes que reflejen las condiciones del sitio de medición.

### 3 Metodología

**Sistema de adquisición:** El sistema de adquisición de datos se basa en una plataforma CanSat experimental, diseñada específicamente para el monitoreo ambiental y la captura de imágenes en un entorno operativo real. La arquitectura del sistema está optimizada para un bajo consumo de energía y una integración modular de sensores, garantizando eficiencia y versatilidad.

#### Componentes Principales del Hardware

El núcleo del sistema es un microcontrolador **ESP32-S3 WROOM**, que gestiona todas las operaciones, incluyendo:

- **Lectura y procesamiento de datos:** Adquisición de mediciones de múltiples sensores integrados.
- **Transmisión de datos:** Envío de la información recopilada a una plataforma externa para su almacenamiento, visualización y análisis en tiempo real.
- **Control de la cámara:** Gestión de la cámara **OV2640** para la captura de imágenes complementarias.

#### Sensores Integrados y Funcionalidad

La plataforma CanSat incorpora un conjunto integral de sensores para medir diversas variables físicas y químicas, como se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Sensores y variables ambientales

Categoría de Medición	Variables Capturadas	Descripción
<b>Condiciones Ambientales</b>	Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica	Sensores dedicados que proporcionan un perfil meteorológico detallado del entorno de operación.
<b>Calidad del Aire</b>	Gases Reductores y Oxidantes	Un sensor específico mide la presencia de diversos gases, proporcionando datos sobre la calidad del aire circundante.
<b>Movimiento e Inercia</b>	Aceleración (3 ejes), Orientación Espacial	Un sensor inercial (IMU) captura datos de movimiento. Esta información es crucial para determinar la posición y el ángulo del CanSat durante su despliegue, permitiendo una visualización precisa en el entorno virtual.

#### Calibración y Adquisición Periódica

Cada sensor fue sometido a un riguroso proceso de calibración y configuración para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones. El sistema está programado para realizar capturas

periódicas de todos los datos durante la duración del experimento. La información recopilada se guarda internamente y se transmite simultáneamente para su posterior visualización y análisis en un entorno virtual o plataforma de datos externa.

### 3.1 Creación de una Base de Datos

Se diseñó una base de datos donde se guarda la información sobre el ambiente y movimiento del CanSat para la correcta visualización en el entorno virtual.

Se almacena en la base de datos:

- **Datos ambientales:** Valores de temperatura ambiental, humedad relativa, presión y calidad del aire, incluyendo la detección de gases reductores y oxidantes.
- **Datos inerciales:** Valores de aceleración y orientación espacial en los ejes X, Y, Z.
- **Datos de posición:** Coordenadas estimadas para la búsqueda de la plataforma.

### 3.2 Procesamiento de Datos

El procesamiento de los datos ambientales, inerciales y de posición es orientado por las siguientes etapas:

1. Recolección de datos de los sensores, donde los sensores ambientales miden las variables del entorno. Las lecturas se realizan de manera periódica
2. Empaquetado y codificación, donde la información de los sensores se organiza en una estructura de datos adecuada para su transmisión.
3. Transmisión de telemetría, en el que los datos son enviados por radiofrecuencia hacia la estación de monitoreo, permitiendo su recepción en tiempo casi real.
4. Recepción y procesamiento, en la que los datos recibidos son almacenados y preparados para su análisis y visualización en el entorno virtual.
5. Visualización e integración de la información, donde los datos almacenados se presentan mediante gráficas, paneles y modelos 3d.

### 3.3 Visualización del Entorno

El entorno integral de monitoreo y análisis ofrece un conjunto robusto de funcionalidades diseñadas para proporcionar una comprensión profunda del entorno circundante y del estado operativo de la plataforma remota:

- **Observar las variables ambientales del entorno:** El sistema facilita la recolección, visualización en tiempo real y registro histórico de datos cruciales, tales como la temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, y los niveles de iluminación o la calidad del aire. Estos datos sin procesar se presentan a través de una interfaz amigable que permite un seguimiento continuo de las condiciones in situ.
- **Analizar gráficamente las variables ambientales:** Mediante herramientas de visualización avanzada, los usuarios pueden generar y consultar gráficas detalladas e interactivas que ilustran las tendencias, fluctuaciones y patrones de las variables monitoreadas a lo largo de períodos de tiempo seleccionables. Esto permite identificar anomalías, correlaciones y evaluar el impacto de los cambios ambientales en los sistemas.

- **Visualizar el comportamiento y la orientación espacial de la plataforma remota:** El entorno proporciona una representación visual tridimensional o un diagrama esquemático que muestra la posición, inclinación (cabeceo, alabeo) y dirección (rumbo) exactas de la plataforma en tiempo real. Esto es crucial para la navegación, el posicionamiento preciso de sensores o actuadores, y para confirmar la estabilidad y el correcto funcionamiento del sistema remoto.

### 3.4 Validación

La validación del sistema remoto se llevó a cabo mediante un riguroso programa de pruebas experimentales, diseñado para asegurar tanto la funcionalidad integral del sistema como la fiabilidad de sus componentes individuales.

El proceso de verificación abarcó las siguientes fases clave:

1. **Verificación del Flujo de Datos:** Se confirmó el correcto funcionamiento de todo el sistema, garantizando la adquisición de datos sin errores en el punto de origen, su transmisión segura a través de la red y su visualización fidedigna en la interfaz del usuario. Se implementaron protocolos para verificar la integridad de los datos y confirmar la ausencia de pérdidas de información durante la transferencia.
2. **Validación de Sensores Ambientales y de Movimiento:** Se realizaron pruebas operativas exhaustivas para comprobar que los sensores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y de movimiento arrojaran lecturas coherentes y precisas. Estas mediciones se verificaron bajo diferentes condiciones de operación para asegurar la robustez del sistema en diversos escenarios.
3. **Integración y Prueba de la Cámara:** La funcionalidad y el rendimiento de la cámara integrada se validaron de manera concluyente mediante su implantación en un entorno virtual controlado. Esto permitió simular diversas condiciones de uso y verificar la correcta captura y transmisión de las imágenes.

## 4 Resultados Finales

Durante las pruebas de validación, el sistema remoto demostró un rendimiento operativo funcional y confiable. Se adquirieron continuamente datos ambientales y de movimiento de los sensores integrados. Las lecturas fueron coherentes con los cambios físicos del entorno, permitiendo una visualización precisa en el entorno virtual, incluyendo la referencia 3D del modelo del sistema remoto.

El módulo de cámara capturó imágenes del entorno, complementando los datos sensoriales con información visual útil. La transmisión por radiofrecuencia (RF) permitió el envío inalámbrico de datos al entorno virtual. Aunque hubo una recepción continua a cierta distancia con pérdidas mínimas de paquetes, esto no afectó la funcionalidad general.

Los datos e imágenes se integraron en interfaces gráficas, representando digitalmente el entorno monitoreado y facilitando una interpretación sencilla. El sistema cumplió los objetivos de adquisición, tratamiento e integración de datos en el entorno virtual.

A continuación se detallan los resultados y capacidades del sistema mediante las tablas descriptivas 2 y 3:

Tabla 2: Resumen de Capacidades y Rendimiento del Sistema Remoto

<b>Característica / Módulo</b>	<b>Descripción de la Capacidad</b>	<b>Rendimiento Durante las Pruebas</b>
<b>Adquisición de Datos</b>	Recopilación continua de datos ambientales y de movimiento.	Funcional y coherente con el entorno real.
<b>Visualización Virtual</b>	Representación digital de datos y modelo 3D del sistema.	Visualización precisa y en tiempo real.
<b>Módulo de Cámara</b>	Captura de imágenes del entorno monitoreado.	Proporcionó información visual complementaria útil.
<b>Transmisión Inalámbrica (RF)</b>	Envío inalámbrico de datos sensoriales al entorno virtual.	Recepción continua a distancia, con pérdidas mínimas de paquetes.
<b>Interfaz Gráfica de Usuario</b>	Integración y visualización de datos e imágenes para monitoreo.	Representación digital clara, facilitando la interpretación.

Tabla 3: Conformidad con los Objetivos del Proyecto

<b>Objetivo Específico</b>	<b>Estado de Cumplimiento</b>	<b>Descripción del Resultado</b>
<b>Adquisición de Datos</b>	Cumplido	Datos ambientales y de movimiento adquiridos con éxito.
<b>Tratamiento de Datos</b>	Cumplido	Datos procesados e integrados correctamente en el entorno virtual.
<b>Integración en Entorno Virtual</b>	Cumplido	Visualización digital fidedigna del entorno monitoreado.
<b>Operación Funcional</b>	Cumplido	El sistema operó de manera estable durante todas las pruebas.

## 5 Conclusiones

En este proyecto se presentó el desarrollo de un sistema orientado a la generación de ambientes virtuales principalmente informativos, a partir de la implementación de sensores ambientales, de movimiento y de procesamiento de imágenes. La integración, almacenamiento y procesamiento de datos ambientales, información visual y geolocalización permitió construir una representación digital del entorno que facilita el monitoreo remoto sin necesidad de presencia física.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema cuenta con una base funcional para la generación de estos entornos virtuales de objetivo informativo, aunque puede tener limitaciones relacionadas con la precisión de las mediciones y el alcance de la comunicación ya que se usaron módulos comerciales. También la ausencia de validación a gran escala limitó los resultados precisos.

Como trabajo futuro, se propone mejorar la robustez del sistema mediante la optimización del módulo de transmisión de datos, la integración de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes y explorar escenarios más complejos con el objetivo de poder enriquecer la representación virtual del entorno.

## Referencias

[1] M. Gao, F. Zhang and J. Tian, "Environmental Monitoring System with Wireless Mesh Network Based on Embedded System," 2008 Fifth IEEE International Symposium on Embedded Computing, Beijing, China, 2008, pp. 174-179, doi: 10.1109/SEC.2008.28.

[2] S. Ferdoush and X. Li, "Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications," Procedia Computer Science, vol. 34, pp. 103–110, 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.07.059.

[3] S. Kumar and A. Jasuja, "Air quality monitoring system based on IoT using Raspberry Pi," 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India, 2017, pp. 1341-1346, doi: 10.1109/CCAA.2017.8230005.

[4] S. Aygün, E. O. Güneş, M. A. Subaşı and S. Alkan, "Sensor Fusion for IoT-based Intelligent Agriculture System," 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820608.

[5] D. F. Prieto Morales and F. A. Moreno Forero, "Análisis y monitoreo remoto de las variables ambientales en un entorno indoor, por medio de un dispositivo móvil con Android," Ciencia y Poder Aéreo, vol. 10, no. 1, pp. 187–194, 2015.

[6] O. L. Ojo et al., "AI Applications in Satellite Image Processing: Enhancing Earth Observation and Environmental Monitoring," 2024 IEEE 5th International Conference on Electro-Computing Technologies for Humanity (NIGERCON), Ado Ekiti, Nigeria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/NIGERCON62786.2024.10926999.

[7] S. S. Fisher, "Environmental media: accessing virtual representations of real-time sensor data and site-specific annotations embedded in physical environments," Proceedings Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Berkeley, CA, USA, 2001, pp. 407-418, doi: 10.1109/VSMM.2001.969696.

- [8] L. Cai, T. Mei, Y. Sun and Z. Ma, "Virtual Sensor Modeling for Multi-agent Intelligent Virtual Environment," 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, Weihai, China, 2006, pp. 931-935, doi: 10.1109/ICIA.2006.305860.
- [9] I. F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Aug. 2002, doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422.
- [10] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [11] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, Feb. 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
- [12] S. Few, *Information Dashboard Design: Displaying Data for At-a-Glance Monitoring*. Analytics Press, 2006.
- [13] R. H. L. Chiang, P. Goes and E. A. Stohr, "Business intelligence and analytics: From big data to big impact," *MIS Quarterly*, vol. 36, no. 4, pp. 1165–1188, 2012.
- [14] J. R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 4th ed., Pearson, 2015.
- [15] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, 2017, pp. 85–113.

# **Metaheurística Reducida en Parámetros para Resolver el Problema de Asignación Cuadrática Mediante Python**

## **Reduced-Parameter Metaheuristic for Solving the Quadratic Assignment Problem Using Python**

Alhely González Luna, Rogelio González Velázquez, Abraham Sánchez López, María Beatriz Bernabé Loranca

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ciencias de la Computación

gl224470257@alm.buap.mx, rogelio.gonzalez@correo.buap.mx,  
abraham.sanchez@correo.buap.mx, beatriz.bernabe@gmail.com

### **Abstract**

The Quadratic Assignment Problem (QAP), due to its NP-hard complexity and its relevance in solving real-world problems across multiple industries, remains a topic of interest in computer science. Since it is NP-hard, finding an optimal solution for large instances is difficult; for this type of problem, metaheuristics provide approximate solutions to the optimum within a reasonable computation time. A drawback of metaheuristics is the choice of specific parameters for each one, which can significantly affect both the quality of the solution and the time required to find it. Jaya is a metaheuristic introduced in 2016 that is characterized by having a minimal number of parameters. In this work, we present a comparison of the Jaya metaheuristic applied to QAP instances taken from QAPLIB of different sizes, and we compare its performance against the best-known values.

### **Resumen**

El problema de asignación cuadrática (QAP), por su complejidad NP-hard y su relevancia para resolver problemas reales en múltiples industrias, sigue siendo un tema de interés en ciencias computacionales. Al ser un problema NP-hard cuando se trata con instancias grandes es difícil hallar una solución óptima, para este tipo de problemas las metaheurísticas ofrecen soluciones aproximadas a la óptima en un tiempo razonable de cómputo. Una desventaja que presentan las metaheurísticas es la elección de los parámetros particulares de cada una, que pueden tener un impacto en la calidad y tiempo en el que se encuentra una solución óptima. Jaya es una metaheurística publicada en 2016 y tiene como característica una mínima cantidad de parámetros. En este trabajo ofrecemos una comparación de la metaheurística Jaya para QAP para instancias tomadas de QAPLIB de distintos tamaños, y comparamos su desempeño con los mejores valores conocidos.

Keywords and phrases: QAP, Metaheuristics, Jaya.

## 1 Introducción

El problema de Asignación Cuadrática (QAP por sus siglas en inglés), pertenece a la clase de problemas de optimización combinatoria [1] en el que, dada una matriz de flujo entre objetos y una matriz de distancias entre locaciones, el objetivo del QAP es hallar la asignación de los objetos a las locaciones para minimizar el costo total [2]. Algunas aplicaciones importantes del QAP en la industria son: diseños hospitalarios, cableado de tablero y modificación de campus entre otras [3].

Este problema pertenece al conjunto de problemas NP-Hard [7], debido a que no es posible hallar en tiempo polinomial una solución óptima [7], en particular el QAP pertenece a una de las clases más complejas dentro del conjunto NP-Hard [5], ya que buscar la solución exacta para instancias de tamaño mayor o igual a 20 se considera aún una tarea intensiva computacionalmente [6]. Algunos de los algoritmos más utilizados para resolver instancias pequeñas son: Branch & Bound, Métodos de Relajación, Programación Dinámica [31,6,9]. Sin embargo, para instancias de gran tamaño, no es posible aplicarlos ya que se requieren demasiados recursos computacionales, en estos casos, se aplican algoritmos metaheurísticos que iteran sobre posibles soluciones aleatorias hasta encontrar una solución óptima de entre todas las posibles mediante reglas de optimización [32].

Algunas de las metaheurísticas que han sido aplicadas a instancias del QAP son: redes neuronales, algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda tabú y colonia de hormigas [6]. Dependiendo de la metaheurística seleccionada, deben calibrarse los parámetros de cada una, por ejemplo, aquellos basados en poblaciones necesitan el tamaño inicial de la población (lobo gris, hormigas, abejas, etc.), en el caso de recocido simulado se necesita el factor de enfriamiento. La selección de estos parámetros es crucial para el desempeño de la metaheurística, una mala selección de estos puede resultar en un incremento en el tiempo de ejecución o en la solución óptima encontrada [4]

Jaya (sánscrito que significa “victoria”) es una metaheurística publicada en 2016 [4] que no necesita parámetros específicos además del número de iteraciones y un tamaño de población, donde la población representa posibles soluciones.

En el presente trabajo se compara el desempeño de Jaya adaptado al QAP con los mejores valores reportados para algunas instancias de QAPLIB, ya que el pseudocódigo y algoritmo descrito en [4] muestra el funcionamiento de Jaya para optimización de funciones, no para un problema de optimización combinatoria, este será el principal aporte del trabajo. El documento está organizado de la siguiente forma: en la sección dos se presenta una revisión teórica del problema de asignación cuadrática y su planteamiento como problema combinatorio, en la sección tres revisaremos la teoría detrás de Jaya donde destacaremos sus principales diferencias y ventajas y funcionamiento general así como el funcionamiento adaptado al QAP, en la sección cuatro mostraremos los resultados obtenidos para algunas instancias de prueba y en la sección cinco daremos las conclusiones de este trabajo.

## 2 Marco Teórico y Estado del Arte

### 2.1 Marco teórico

El problema de asignación cuadrática (QAP) introducido por primera vez Koopmans y Beckmann [5] para abordar la asignación de recursos indivisibles de manera eficiente puede modelarse de la siguiente forma:

Sean  $N$  plantas de igual tamaño a  $N$  locaciones homogéneas fijas [6]

$$\min_{p \in P} z(p) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{p(i)p(j)} \quad (1)$$

Donde  $f$  es la matriz de flujo,  $d$  es la matriz de distancias y  $p$  es un vector de permutación de  $n$  índices de plantas (o locaciones) que representa el mapeo de plantas a locaciones o viceversa,  $P$  es el conjunto de todas las  $n$  –permutaciones. Para cada par de asignaciones  $r = p(i)$  y  $s = p(j)$ , el flujo  $f_{ij}$  entre las dos plantas  $i, j$  es multiplicado por la distancia  $d_{rs}$  entre las dos locaciones  $r$  y  $s$ . La suma de estos términos sobre todos los pares da el costo total de la asignación  $z(p)$  para la permutación  $p$ . El objetivo es hallar una permutación  $p^*$  en  $P$  tal que el costo sea mínimo [6].

## 2.2 QAPLIB

QAPLIB publicada en 1991 por Burkard et al. [25] es un recurso digital accesible desde <https://qaplib.mgi.polymtl.ca/>, donde se recuperan instancias de prueba del QAP. Las instancias más pequeñas disponibles son de 13 locaciones y la más grande consta de 256 locaciones. A menos que se indique explícitamente, todas las instancias son simétricas (la distancia de  $i$  a  $j$  es la misma que de  $j$  a  $i$ ). Es posible descargar un archivo comprimido de instancias individuales o todas las disponibles. Los archivos se presentan en orden alfabético según los apellidos de sus autores [25].

El formato de los datos contenidos en el archivo de texto del problema es:

$$\begin{matrix} n \\ A \\ B \end{matrix}$$

donde  $n$  es el tamaño de la instancia y  $A$  y  $B$  son, respectivamente, la matriz de flujos o la matriz de distancias [25]. Para soluciones óptimas se incluye la permutación óptima, mientras que para soluciones no óptimas se dan las cotas inferiores.

En este trabajo probaremos el algoritmo Jaya en las instancias Skorin-Kapov las cuales fueron generadas aleatoriamente y sus distancias calculadas de forma rectangular [45,25].

## 2.3 Estado del arte

Una metaheurística puede verse como una metodología que incluye estrategias capaces de guiar la búsqueda para hallar un óptimo local, a diferencia de las heurísticas, estos algoritmos tienen un parámetro de exploración y explotación que les permite ampliar el espacio de búsqueda y evitar quedar atrapados en óptimos locales [37].

Las metaheurísticas en el ámbito del QAP han sido de gran utilidad porque pueden hallar soluciones óptimas en un tiempo aceptable para instancias de distintos tamaños, y no solo las instancias pequeñas. Podemos clasificar las metaheurísticas en dos clases: las de búsqueda local y las basadas en poblaciones [34]. A continuación, se presenta una revisión de los enfoques metaheurísticos más relevantes para el QAP, cubriendo tanto trabajos fundacionales como desarrollos recientes.

### 2.3.1 Algoritmos de búsqueda Local

La mayoría de las metaheurísticas modernas se originan o incorporan componentes de algoritmos de búsqueda local (Local Search). En estos, se comienza con una solución inicial y se explora su "vecindario" (soluciones generadas por pequeños cambios, como un intercambio de dos elementos) en busca de una mejora. Este proceso se repite hasta alcanzar un óptimo local [41]. Las metaheurísticas de búsqueda local continúan siendo aplicadas con variantes como multi-start en el que el algoritmo reinicia la búsqueda para salir de óptimos locales [6, 61,15], o variaciones que utilizan tarjetas gráficas para buscar en paralelo [34,53], y algunos otros en los que se utiliza la programación dinámica para la búsqueda iterativa en vecindarios [63,62,48].

### 2.3.2 Algoritmos bioinspirados

Este tipo de metaheurísticas son inspiradas en su mayoría por procesos de organismos biológicos, por ejemplo, los algoritmos genéticos están basados en la adaptación evolutiva que se da en la reproducción de organismos vivos [40,66]. Existe un subconjunto de estos algoritmos que están basados en comportamientos poblacionales, como enjambres, manadas, abejas, colonia de hormigas, parvadas, etcétera [39, 19], este tipo de algoritmos replican acciones que llevan a cabo dichas poblaciones, por ejemplo, una manada de lobos al cazar, la organización de una colonia de hormigas o abejas. En particular aquellos que han sido ampliamente probados en el QAP son colonia de hormigas (ACO) [65,47,12,13,14], enjambre de partículas (PSO) [17,58]. El enfoque más exitoso son los Algoritmos Meméticos (AM) [49,56, 64], que mezclan Algoritmos Genéticos (AG) con búsqueda local [46,64]. La población explora globalmente, mientras que la búsqueda local explota.

### 2.3.3 Enfoques híbridos y tendencias actuales

El estado del arte está dominado por técnicas híbridas [35,41] que combinan múltiples metaheurísticas para partir de soluciones mejores y no completamente aleatorias, además de la incorporación de aprendizaje automático [57]. Los algoritmos buscan ser más autónomos y adaptarse dinámicamente al problema.

- La integración del Aprendizaje por Refuerzo (RL) permite que los algoritmos aprendan la mejor estrategia de búsqueda en lugar de seguir reglas predefinidas. Karimi et al. (2022) desarrollaron una metaheurística basada en RL profundo donde un agente aprende a seleccionar el operador de búsqueda más adecuado en cada paso, adaptándose a la estructura de la solución actual [68].
- El uso de Redes Neuronales de Grafos (GNNs) es la frontera actual. Estos modelos pueden "aprender" la estructura de un problema de optimización. Furtado et al. (2024) utilizaron una GNN combinada con una Búsqueda de Árbol de Monte Carlo para construir soluciones de alta calidad desde cero, aprendiendo patrones que son difíciles de especificar manualmente para las heurísticas tradicionales [69,60].

### 3. Metaheurística Jaya

Publicada en 2016 por R. Venkata Rao, esta metaheurística se basa en la idea de que la solución óptima debe moverse hacia la mejor solución y alejarse de la peor [4]. A diferencia de otras metaheurísticas, Jaya solo requiere parámetros de control como número de iteraciones y tamaño de la población. Fue probada en [4] para encontrar el óptimo de 24 funciones con restricciones dadas en el congreso de computación evolutiva de 2006 [4] dando resultados favorables.

El funcionamiento del algoritmo se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1

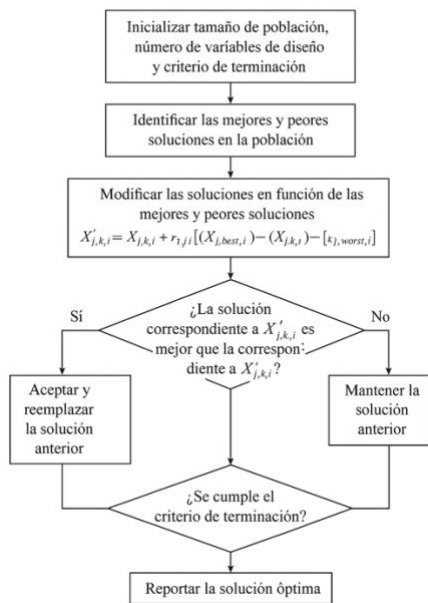


Figura 1: Diagrama de flujo de Jaya [4]

Entrada:

$n$  = tamaño de la instancia ( $n$  instalaciones,  $n$  ubicaciones)

$N_p$  = tamaño de la población

$MaxIter$  = número máximo de iteraciones

$f(x)$  = función de costo del QAP  
(evaluación de la solución)

Procedimiento:

1. Inicializar población  $P$  con  $N_p$  permutaciones aleatorias de tamaño  $n$
2. Evaluar todas las soluciones en  $P$
3. Mientras (criterio de terminación no cumplido) hacer:
  - a) Identificar  
 $X_{best}$  = mejor *iter* solución de  $P$   
 $X_{worst}$  = peor solución de  $P$
  - b) Para cada solución  $X$  en  $P$   
Generar  $X_1$  = aplicar 2-intercambio ( $X_1$ ) guiado por  $X_{worst}$   
Generar  $X_2$  = aplicar 2-intercambio ( $X_1$ ) guiado por  $X_{best}$
  - iii Evaluar  $X_2$
  - iv Si  $f(X_2) < f(X)$  entonces reemplazar

Figura 2. Pseudocódigo de Jaya adaptado a QAP

Debido a que fue planteada originalmente para optimización de funciones, deben hacerse los siguientes ajustes para utilizarla en problemas de optimización combinatoria:

- Los valores de los vectores deben ser enteros positivos en el rango de 1 al tamaño de la instancia y no reales como para el caso de optimización de funciones.
- Dado que aquí los valores de las soluciones no pueden optimizarse de la misma forma que para el caso continuo, mantendremos la lógica de conservar el mejor y rechazar el peor
- Dado que la fórmula de actualización no puede utilizarse para calcular nuevas permutaciones usaremos 2-intercambio.

En la Figura 2 se muestra el pseudocódigo de esta adaptación. Note que se conserva la lógica de Jaya al alejarse del peor y mantener el mejor. El código se escribió en Python y se integró con la librería Tkinter una interfaz de usuario que descarga las instancias de QAP en local.

## 4 Resultados

Las pruebas se corrieron en una computadora personal con las siguientes especificaciones: 12th Gen Intel(R) Core (TM) i5-12450HX (2.40 GHz), 16.0 GB RAM (15.7 GB usable), 64 bits con sistema operativo Windows 11. Los parámetros usados en la metaheurística se seleccionaron de forma empírica y se fijaron para todas las instancias en 1,000 iteraciones y 500 elementos de solución.

Tabla 1. Resultados de Jaya para instancias sko

Instancia	Tamaño	Mejor valor conocido (Algoritmo) [25]	Mejor valor encontrado	GAP	Tiempo de ejecución (s)
Sko-42	42	15,812 (TS)	19,402	22.70 %	17.86
Sko-49	49	23,386 (TS)	27,914	19.36%	28.64
Sko-56	56	34,458 (TS)	40,756	18.27%	23.66
Sko-64	64	48,498 (TS)	57,546	18.65%	34.47
Sko-72	72	66,256 (TS)	77,762	17.36%	46.23
Sko-81	81	90,998 (GA)	107,350	17.96%	36.70
Sko-90	90	115,534 (TS)	135,184	17.00%	44.88
Sko-100a	100	152,002 (GA)	177,124	16.52%	56.7455
Sko-100b	100	153,890 (GA)	177,660	15.44%	58.481
Sko-100c	100	147,862 (GA)	172,322	16.54%	54.95
Sko-100d	100	149,576 (GA)	173,946	16.29%	58.42
Sko-100e	100	149,150 (GA)	172,314	15.53%	157.01

Como podemos ver de la tabla, el algoritmo Jaya planteado como en este trabajo parece estar alejado de los mejores valores conocidos para las instancias de Skorin-Kapov ya que el GAP está entre 18% y 16%, lo cual no indica robustez, además el tiempo para las instancias de tamaño 100 crece de forma considerable.

## 5 Conclusiones

En este trabajo probamos Jaya para algunas instancias de QAP, aunque el resultado no fue tan robusto como se esperaba, esta es una aproximación inicial y puede mejorarse al cambiar la generación de nuevas soluciones. Así que, como trabajo futuro, podríamos experimentar con otro tipo de generadores de vecindarios o el criterio de selección, usando distancias para saber si nos estamos acercando o alejando de forma más numerable.

Sin embargo, el aporte de este trabajo reside en la implementación de una metaheurística reciente

que utiliza pocos parámetros y es relativamente simple de comprender.

## Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Benemérita Universidad de Puebla otorgado en la realización de este trabajo.

## Referencias

[1] Burkard, R. E. (1984). Quadratic assignment problems. *European Journal of Operational Research*, 15(3), 283–289. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90093-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90093-6)

[3] Verel, S., Thomson, S. L., & Rifki, O. (2024, March 5). *Where the really hard quadratic assignment problems are: The QAP-SAT instances* (arXiv preprint arXiv:2403.02783v1). arXiv. Retrieved from <https://arxiv.org/html/2403.02783v1>

[3] Bhati, R.K. y Rasool, A. (2014). “Quadratic Assignment Problem and its Relevance to the Real World: A Survey”, *International Journal of Computer Applications*, vol.96, no.9, pp.42–47. ISSN0975-8887. DOI: 10.5120/16825-6584

[4] Rao, R.V. (2016). “Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol.7, no.1, pp.19–34. DOI 10.5267/j.ijiec.2015.8.004.

[5] T. Koopmans y M. Beckmann. Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica*, 25(1):53–76, 1957.

[6] James, T., Rego, C., y Glover, F. (2009). “Multistart Tabu Search and Diversification Strategies for the Quadratic Assignment Problem”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, vol. 39, pp. 579–596.

[8] Taillard, É.D. (1991). “Robust tabu search for the quadratic assignment problem”, *Parallel Computing*, vol.17, no.4–5, pp.443–455. doi:10.1016/S0167-8191(05)80147-4.

[12] E.D. Taillard, “FANT: Fast Ant System,” *IDSIA Technical Report 46-98*, Lugano, Switzerland, Oct.15,1998. Informe original que presenta FANT, definiéndolo como un sistema rápido de hormigas con actualización inmediata de feromonas, coordinación central ("Queen") y estrategias de intensificación/diversificación

[13] “Fast Ant System,” *Algorithm Afternoon*, 2025. Reseña sobre FANT que resalta tres innovaciones clave: actualización inmediata, evaporación constante y uso de listas de candidatos para ganar eficiencia

[14] “Fast Ant System (FANT),” en *Ant Colony Optimization*, pp.42–54. Descripción técnica de FANT que señala que usa una única hormiga (en lugar de colonia), actualizaciones simplificadas de feromonas sin evaporación continua, y listas candidatas como mecanismo de reducción de complejidad

[15] Connolly, D.T. (1990). “An improved annealing scheme for the QAP”, *European Journal of*

Operational Research, vol.46, no.1, pp.93–100. DOI10.1016/0377-2217(90)90301-Q

[16] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. Jr., y Vecchi, M.P. (1983). “Optimization by simulated annealing”, Science, vol.220, no.4598, pp.671–680. doi:10.1126/science.220.4598.671.

[17] Kennedy, J. y Eberhart, R.C. (1995). “Particle Swarm Optimization”, en \*Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks\*, vol. 4, pp.1942–1948. doi:10.1109/ICNN.1995.488968.

[18] Lambora, A., Gupta, K., Chopra, K. (2019). “Genetic Algorithm—A Literature Review”, in \*Proceedings of the 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)\*, pp.380–384. doi:10.1109/COMITCon.2019.8862255.

[19] Yang, X.S. (2009). Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press

[20] Bazaraa, M. S., & Sherali, H. D. (1980). Benders’ partitioning scheme applied to a new formulation of the quadratic assignment problem. Naval Research Logistics Quarterly, 27(1), 29–41. <https://doi.org/10.1002/nav.3800270104>

[21] Nugent, C. E., Vollmann, T. E., & Ruml, J. (1968). An experimental comparison of techniques for the assignment of facilities to locations. Operations Research, 16(1), 150–173. DOI: 10.1287/opre.16.1.150.

[34] Kumar, M., Sahu, A., & Mitra, P. (2021). A comparison of different metaheuristics for the quadratic assignment problem in accelerated systems. *Applied Soft Computing*, 100, 106927. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106927>

[35] Misevičius, A., Andrejevas, A., Ostreika, A., Verenė, D., & Žekienė, G. (2024). An Improved Hybrid Genetic-Hierarchical Algorithm for the Quadratic Assignment Problem. *Mathematics*, 12(23), 3726. <https://doi.org/10.3390/math12233726>

[36] R.E. Burkard and F. Rendl, A thermodynamically motivated simulation procedure for combinatorial optimization problems. Report 83-12, Mathematisches Institut. Technische Universität Graz, February 1983 European J. Operational Res.

[37] Martí, R., Sevaux, M., & Sörensen, K. (2025). Fifty years of metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 321(2), 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.04.004>

[38] Fogel, L.J., Owens, A.J., & Walsh, M.J. (1966). Artificial Intelligence through Simulated Evolution.

[39] Binitha S., & S Siva Sathya. (2012, May). *A survey of bio inspired optimization algorithms. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(2), 137–151. Retrieved from <https://www.ijscce.org/wp-content/uploads/papers/v2i2/B0523032212.pdf>

[40] Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66–73. <http://www.jstor.org/stable/24939139>

[41] Fleurent, C., & Ferland, J. A. (1994). *Genetic hybrids for the quadratic assignment problem*. En P. Pardalos & H. Wolkowicz (Eds.), *Quadratic assignment and related problems* (pp. 173–187).

[42] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr., & Vecchi, M. P. (1983, May 13). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>

[43] Burkard, R. E., & Rendl, F. (1984). A thermodynamically motivated simulation procedure for combinatorial optimization problems. *European Journal of Operational Research*, 17(2), 169-174. DOI: 10.1016/0377-2217(84)90231-5

[44] Taillard, É. (1991). Robust Taboo search for the quadratic assignment problem. *Parallel Computing*, 17(4-5), 443-455. DOI: 10.1016/0167-8191(91)90072-T

[45] Skorin-Kapov, J. (1990). Tabu search applied to the quadratic assignment problem. *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 33-45. DOI: 10.1287/ijoc.2.1.33

[46] Tate, D. M., & Smith, A. E. (1995). A genetic approach to the quadratic assignment problem. *Computers & Operations Research*, 22(1), 73-83. DOI: 10.1016/0305-0548(94)00031-L

[47] Gambardella, L. M., Taillard, É. D., & Dorigo, M. (1999). Ant colonies for the quadratic assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, 50(2), 167-176. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600733

[48] Stützle, T. (2006). Iterated local search for the quadratic assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1519-1539. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.01.019

[49] Merz, P., & Freisleben, B. (2000). Fitness landscape analysis and memetic algorithms for the quadratic assignment problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4(4), 337-352. DOI: 10.1109/4235.887236

[50] Cela, E. (1998). *The quadratic assignment problem: Theory and algorithms*. Springer Science & Business Media. DOI: 10.1007/978-1-4757-2852-7

[51] Loiola, E. M., de Abreu, N. M. M., Boaventura-Netto, P. O., Hahn, P., & Querido, T. (2007). A survey for the quadratic assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 657-690. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.09.032

[52] Battiti, R., & Tecchiolli, G. (1994). The reactive tabu search. *ORSA Journal on Computing*, 6(2), 126-140. DOI: 10.1287/ijoc.6.2.126

[53] Misevicius, A., & Kilda, D. (2020). A parallel tabu search for the quadratic assignment problem. *Computers & Operations Research*, 113, 104809. DOI: 10.1016/j.cor.2019.104809

[54] Paul, S., & Gnanadass, R. (2021). An adaptive iterated local search algorithm for solving the quadratic assignment problem. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 17(6), 3317. DOI: 10.3934/jimo.2020138

[55] Hansen, P., & Mladenović, N. (2001). Variable neighborhood search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 449-467. DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00119-X

- [56] Czogalla, O., & Fink, A. (2018). An adaptive memetic algorithm for the quadratic assignment problem. *Computers & Operations Research*, 94, 63-72. DOI: 10.1016/j.cor.2018.01.017
- [57] Stützle, T., & Dorigo, M. (2000). A short-term and a long-term ant algorithm for the quadratic assignment problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 30(2), 347-355. DOI: 10.1109/3477.826943
- [58] Tasgetiren, M. F., Pan, Q. K., Suganthan, P. N., & Oner, A. (2011). A discrete particle swarm optimization algorithm for the quadratic assignment problem. *Knowledge-Based Systems*, 24(8), 1167-1175. DOI: 10.1016/j.knosys.2011.05.012
- [59] Fischetti, M., & Fischetti, M. (2018). Matheuristics. In *Handbook of Heuristics* (pp. 1-35). Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-07124-4\_15-1
- [60] Drori, I., et al. (2022). A neural network solver for the quadratic assignment problem. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 13745-13757. (Nota: Generalmente disponible en arXiv o actas de conferencias como NeurIPS).
- [61] Gortázar, A. F., Granada-Pérez, J. C., & Laguna, M. (2021). A breakout-based tabu search for the quadratic assignment problem. *Computers & Operations Research*, 131, 105260. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105260
- [62] Wang, Q., Wang, Y., & Liu, F. (2021). An effective iterated local search algorithm for the quadratic assignment problem. *Knowledge-Based Systems*, 215, 106774. DOI: 10.1016/j.knosys.2021.106774
- [63] D'Angelo, J. F. C. P., Ochi, L. S., & Vianna, D. S. (2023). A biased random-key variable neighborhood search for the quadratic assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 213, 119106. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119106
- [64] Boujemaa, M. K., Tfaili, W., & Liret, A. (2022). A competitive memetic algorithm for solving the quadratic assignment problem. *Soft Computing*, 26(15), 7247-7264. DOI: 10.1007/s00500-022-07153-2
- [65] Singh, A. K., & Sharma, A. (2022). A novel ant colony optimization algorithm for quadratic assignment problem with modified pheromone update rule. *Journal of Computational Science*, 61, 101633. DOI: 10.1016/j.jocs.2022.101633
- [66] de la Cruz, S. D. G. G., Ochi, L. S., & Vianna, D. S. (2023). A discrete differential evolution algorithm for the quadratic assignment problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 80, 101323. DOI: 10.1016/j.swevo.2023.101323
- [67] de Farias Jr, T. S., & Ochi, L. S. (2021). A GRASP with path-relinking matheuristic for the quadratic assignment problem. *Computers & Operations Research*, 132, 105282. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105282
- [68] Karimi, H., Ghafouri, S., & Mokhtar, M. (2022). Solving the quadratic assignment problem via a deep reinforcement learning-based metaheuristic. *Applied Soft Computing*, 128, 109477. DOI: 10.1016/j.asoc.2022.109477

[69] Furtado, G. de G. C., & Xavier, A. E. (2024). A learn-and-construct heuristic for the quadratic assignment problem based on graph neural networks and Monte Carlo tree search. *Computers & Operations Research*, 161, 106421. DOI: 10.1016/j.cor.2023.106421

# **Del Código a la Conciencia: Herramienta Tecnológica para Evaluar Hábitos Sostenibles**

## **From Code to Consciousness: A Technological Tool for Evaluating Sustainable Habits**

Roberto Carlos Hernández Aparicio, M. C. María del Carmen Santiago Díaz, M. C. Ana Claudia Zenteno Vázquez, Dr. Gustavo Trinidad Rubín Linares, M. C. Judith Pérez Marcial

Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur y Av. San Claudio, C. U. Col. San Manuel. CP 72570. Puebla, México.

roberto.hernandezap@alumno.buap.mx, {marycarmen.santiago, gustavo.rubin, ana.zenteno, judith.perez}@correo.buap.mx

### **Abstract**

The carbon footprint is a key indicator for measuring the environmental impact of human activities by quantifying greenhouse gases (GHG), expressed in tons of CO<sub>2</sub> equivalent. Its measurement allows for the identification of emission sources and the implementation of mitigation, energy efficiency, and regulatory compliance strategies. Large companies such as Walmart have significantly reduced their emissions and costs through cleaner technologies. Ignoring the carbon footprint exacerbates climate change, intensifies extreme events, harms public health, and threatens the global economy. Internationally, the Kyoto Protocol and the Paris Agreement have been fundamental in the fight against climate change. At the same time, the GHG Protocol has become the most widely used standard for classifying and measuring emissions into three scopes: direct, indirect due to electricity, and other indirect emissions. Digital tools and calculators make it possible to estimate personal emissions and promote sustainable habits, especially in student communities. This study focuses on raising awareness among university students about their environmental impact through the use of calculators adapted to the academic context. By promoting climate awareness through higher education, we contribute to achieving SDG 13 (Climate Action) and building a more environmentally responsible community.

### **Resumen**

La huella de carbono es un indicador clave para medir el impacto ambiental de las actividades humanas mediante la cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI), expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Su medición permite identificar fuentes de emisiones y aplicar estrategias de mitigación, eficiencia energética y cumplimiento regulatorio. Grandes empresas como Walmart han reducido significativamente sus emisiones y costos mediante tecnologías más limpias. Ignorar la

huella de carbono agrava el cambio climático, intensifica fenómenos extremos, perjudica la salud pública y amenaza la economía global. A nivel internacional, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París han sido fundamentales en la lucha climática. Paralelamente, el Protocolo de GEI se ha convertido en el estándar principal adoptado para la clasificación y medición de emisiones en tres ámbitos: directas, indirectas (provenientes de la electricidad) y otras indirectas. Las herramientas y calculadoras en línea permiten estimar las emisiones personales y promover hábitos sostenibles, especialmente entre la comunidad estudiantil. Este estudio busca crear conciencia entre los estudiantes universitarios sobre el impacto ambiental de sus actividades mediante calculadoras adaptadas al contexto. De esta manera, fomentar la conciencia climática en la educación superior integra la promoción de gestores ambientales responsables en el núcleo del ODS 13 (Acción por el Clima).

Keywords and phrases: Cambio Climático, Huella de Carbono, Calculadora de Huella de Carbono.

## 1 Introducción

La huella de carbono se refiere a la carga ambiental que indica el total de gases de efecto invernadero cuyo origen se inscribe a la actividad humana, bien directamente o vía indirecta. Este indicador tiene expresión en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub>e) y es importante en la comprensión y gestión del efecto ambiental que producen diversas actividades y procesos. Tener la huella de carbono en la organización vehículo permite a las empresas y organizaciones cumplir la reglamentación ambiental así como anticipar futuros cambios. Las compañías que vigilan sus emisiones se aseguran de alinearse a las políticas vigentes y prepararse para futuros cambios legislativos [2]. Por poder identificar las principales fuentes de emisiones se puede establecer medidas de eficiencia energética que además de reducir los costos optimizan el recurso consumido. Una de las más importantes es Walmart que con la instalación de unidades de calefacción y refrigeración altamente eficientes dejó de emitir 614.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que generó un ahorro significativo. La gestión proactiva de la huella de carbono también facilita el acceso a mercados de carbono y financiamiento verde, donde las empresas pueden participar en sistemas de comercio de emisiones y obtener apoyo financiero para sus proyectos sostenibles [3]. A la par, empresas que poseen compromisos sólidos en cuestiones ambientales tienden a atraer y retener talento entre más, pues muchos profesionales prefieren trabajar en organizaciones responsable con el medio ambiente [2]. Ignorar la huella de carbono puede tener graves consecuencias.

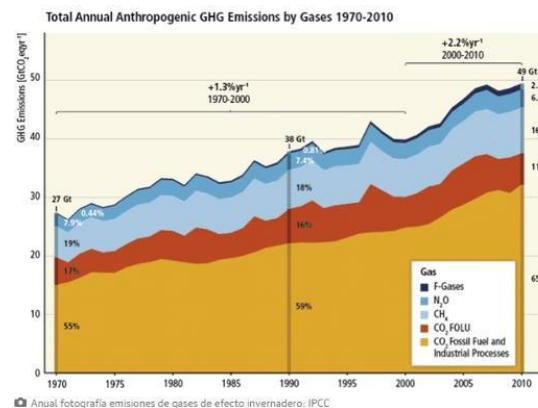


Figura 1. Gráfico que muestra las tendencias del cambio climático y el aumento de la temperatura.

El gráfico anterior presenta la evolución de las emisiones anuales antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) desglosadas por tipo de gas desde 1970 hasta 2010. Se observa un aumento constante en las emisiones totales, con un crecimiento promedio del 1.3 por ciento anual entre 1970 y 2000, que se acelera a un 2.2 por ciento anual en la década siguiente. La mayor proporción corresponde al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) proveniente del uso de combustibles fósiles y procesos industriales, representando hasta un 65 por ciento del total en 2010. El gráfico evidencia la creciente contribución de otros GEI como el metano (CH<sub>4</sub>) y los gases fluorados (F-Gases), lo que subraya la necesidad de implementar políticas integrales de mitigación que consideren la diversidad de fuentes emisoras. Los efectos negativos no solo se limitan al ámbito económico.

La contaminación del aire derivada del aumento de emisiones de GEI tiene un impacto directo en la salud pública, provocando enfermedades respiratorias y cardiovasculares [6]. Además, el cambio climático afecta la biodiversidad y los ecosistemas, poniendo en peligro numerosas especies y alterando el equilibrio natural [7]. Estadísticas recientes refuerzan la urgencia de abordar la huella de carbono. En 2024, la temperatura media global superó por primera vez los 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, alcanzando  $1.55 \pm 0.13^\circ\text{C}$  [9]. Este aumento de temperatura se ha asociado con un incremento en la intensidad de las precipitaciones en diversas regiones. Por ejemplo, en San Antonio, Texas, la intensidad de las lluvias ha aumentado casi un 6% desde 1970, elevando el riesgo de inundaciones repentinas [10]. Asimismo, el nivel del mar global ha aumentado más rápido de lo esperado, registrando un incremento de 0.23 pulgadas (0.59 centímetros) en 2024, en comparación con la tasa esperada de 0.17 pulgadas (0.43 centímetros) por año [11]. Estos datos evidencian la necesidad de implementar medidas efectivas para reducir las emisiones de GEI y mitigar los impactos del cambio climático.

## **2 Marco Teórico y Estado del Arte**

La preocupación global por el cambio climático ha impulsado múltiples enfoques para la medición, gestión y mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Protocolo de Kioto adoptado en 1997, que entró en vigencia en 2005, es uno de los hitos mundiales más importantes en el ámbito del cambio climático en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este Protocolo es un acuerdo vinculante en relación con las reducciones de emisiones de los países industrializados en términos de gases de efecto invernadero, incluidos los seis principales: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Este protocolo también introdujo nuevos mecanismos como el comercio de emisiones, el Mecanismo de Desarrollo Limpio y la implementación conjunta, que permitieron conseguir los objetivos con mayor flexibilidad y a un menor coste. Una de las grandes limitaciones de este tratado ha sido que solo lo cumpliesen los países desarrollados, lo cual ha originado extensos debates sobre si las naciones en desarrollo deben incluirse o no en este esfuerzo global.

Posteriormente, el Acuerdo de París (2015) fue un pacto verdaderamente innovador al dar un nuevo enfoque en la inclusión flexible en que todos los países, independientemente del desarrollo en que se encuentren, iban a tener que presentar contribuciones nacionales (NDCs) para poder limitar el calentamiento global a menos de 2 °C respecto a los niveles preindustriales, hasta no sobrepasar los 1.5 °C. El mismo acuerdo también hizo hincapié en que las condiciones del marco son la

transparencia, la revisión periódica de los objetivos y el apoyo financiero y tecnológico para las naciones más vulnerables.

Dentro de los convenios internacionales, también ha sido importante la evolución de normas y metodologías para la medición y el reporte de emisiones. El GHG Protocol, que fue elaborado a partir del año 2001, es, en la actualidad, el estándar mundial para la contabilización y el informe sobre GEI en el ámbito de las empresas y en el marco gubernamental. Tal y como se menciona, la categorización de las emisiones en tres alcances (directo, indirecto, por electricidad y otros indirectos a la cadena de valor) facilita una medición más exacta y coherente. Sin embargo, como sigue siendo una de las grandes dificultades por su complejidad, el alcance 3, que comprende las indirectas en la cadena de suministro, está considerado como uno de los obstáculos mayores [24, 25].

Por último, sobre el recurso encontrado en relación con el uso de tecnologías, hay proliferación de muchas herramientas digitales hasta frazadas de huella de carbono, de manera que las personas, empresas y comunidades puedan medir su impacto ambiental de una manera accesible y bastante detallada. Estas herramientas están diseñadas para desarrollar la cultura de la sensibilización y la adopción de prácticas sostenibles, aunque a les enfrenta desafíos en la exactitud y la cobertura de ciertas actividades, especialmente en los sectores agrícolas y de transporte.

#### La Evolución hacia el GHG protocolo

En 2001, en respuesta a la necesidad de una metodología estándar, clara y accesible para la medición de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se desarrolló el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (Protocolo GEI). Esta herramienta, desarrollada en colaboración con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), se consolidó rápidamente como el estándar más utilizado a nivel mundial para la contabilización y el reporte de emisiones, tanto a nivel corporativo como gubernamental [13].

El Protocolo GEI no solo proporciona un marco metodológico sólido, sino que también ha dado origen a numerosas guías y estándares específicos, entre los que destaca el Protocolo GEI para proyectos. Este documento establece las directrices para cuantificar y reportar las reducciones de emisiones derivadas de proyectos de mitigación específicos, como aquellos que involucran tecnologías limpias, eficiencia energética, transición a fuentes de energía renovables, gestión sostenible de residuos y captura de carbono. La metodología garantiza que los proyectos se evalúen con criterios uniformes y transparentes, facilitando así la generación y verificación de créditos de carbono que pueden comercializarse en mercados voluntarios o regulados [12].

#### **Proyectos y aplicaciones relevantes:**

- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL): Antes del desarrollo formal del GHG Protocol para proyectos, el MDL bajo el Protocolo de Kioto fue un marco pionero que permitió a países desarrollados invertir en proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo. Muchos proyectos MDL han seguido estándares que posteriormente influyeron en la metodología GHGP para proyectos, centrándose particularmente en la verificación y trazabilidad de las reducciones de emisiones [12]. Science Based Targets initiative (SBTi): Para apoyar sus objetivos de reducción establecidos de una manera que esté alineada con los objetivos científicos internacionales, esta iniciativa se apoya en el Protocolo de GEI para la transparencia y la ambición en las estrategias de mitigación corporativas [13].

- Medición y reducción en Alcance 3: Reconociendo que el Alcance 3 puede representar hasta el 70-80% de las emisiones totales en algunos sectores, el GHG Protocol ha incentivado el desarrollo de metodologías para mapear la cadena de suministro completa. Esto ha motivado proyectos de colaboración multisectorial donde empresas trabajan junto con proveedores y clientes para medir, reportar y reducir las emisiones indirectas a través de innovaciones como la economía circular, transporte sostenible y digitalización para optimizar procesos [13].
- Herramientas digitales y plataformas: Varias herramientas basadas en el GHG Protocol han sido desarrolladas para facilitar la recolección y análisis de datos en proyectos específicos. Plataformas como CDP (Carbon Disclosure Project) y plataformas de reporte ESG incorporan los estándares del GHG Protocol para que las empresas puedan integrar la gestión de emisiones en sus reportes corporativos [15].

Clasificación de emisiones en tres alcances:

- Alcance 1: Emisiones directas provenientes de fuentes propias o controladas, como la combustión en calderas, vehículos y procesos industriales. 4
- Alcance 2: Emisiones indirectas derivadas de la generación de electricidad, calefacción o refrigeración adquirida y consumida por la organización.
- Alcance 3: Emisiones indirectas no cubiertas en el Alcance 2, que ocurren a lo largo de toda la cadena de valor, incluyendo proveedores, transporte, ventas de productos, uso, tratamiento de residuos y viajes de negocios.

La complejidad del Alcance 3 radica en la gran cantidad de actores, actividades y fuentes de emisiones involucradas, así como en la dificultad de obtener datos precisos y coherentes. Este desafío ha impulsado innovaciones en metodologías y sistemas de información, tales como:

- Cadena de bloques (blockchain) para trazabilidad de emisiones: Permitirá verificar datos de emisiones a lo largo de la cadena de suministro con mayor transparencia [14].
- Digital Twins y simulaciones: Modelos digitales para evaluar el impacto ambiental de procesos y productos en tiempo real.
- Colaboración interempresarial: Proyectos conjuntos para reducción de emisiones en sectores específicos (como la industria automotriz o alimentaria), compartiendo datos y mejores prácticas .

Avances en herramientas de cálculo de la huella de carbono

En los últimos años, la disponibilidad de herramientas y plataformas digitales ha facilitado la medición de la huella de carbono a nivel individual, corporativo y comunitario. Herramientas como el CoolClimate Calculator (desarrollado por la Universidad de California, Berkeley), el Carbon Footprint Calculator de Carbonfootprint.com, y el MyClimate Calculator (ofrecido por My Climate.org) permiten a los usuarios estimar sus emisiones de GEI a partir de actividades cotidianas como el transporte, la energía, el consumo de alimentos y el uso de productos. Estas herramientas, al ser accesibles y fáciles de usar, permiten la sensibilización del público y la promoción de prácticas más sostenibles. Sin embargo, aún existen desafíos en cuanto a la precisión de las estimaciones,

especialmente cuando se trata de actividades complejas o de sectores que no han sido suficientemente investigados [15].

Por ejemplo, el cálculo de las emisiones derivadas de los hábitos alimenticios y la agricultura es un área en constante evolución. Se han desarrollado nuevas metodologías que consideran factores como el uso del suelo, la deforestación y las emisiones de metano generadas por los sistemas agrícolas. De hecho, el sector agrícola representa una parte significativa de las emisiones globales, y se están promoviendo prácticas como la agricultura regenerativa para reducir su impacto ambiental [16].

La huella de carbono a nivel individual y comunitario

A pesar de los avances en la medición de las emisiones de GEI a nivel corporativo y gubernamental, la medición de la huella de carbono a nivel individual sigue siendo un campo en desarrollo. En particular, son escasos los estudios que examinan la huella de carbono en comunidades específicas e identificables, como la estudiantil universitaria. Investigaciones recientes subsanan esta carencia al analizar el impacto ambiental de la vida estudiantil. La universidad, como institución, representa un microcosmos donde las actividades cotidianas de estudiantes, personal docente y administrativo generan un conjunto único de emisiones. Algunos estudios han demostrado que la concientización y las políticas sostenibles en los campus conducen a una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentan un cambio de comportamiento positivo en los estudiantes hacia un consumo más responsable.

El rol de las energías renovables en la reducción de emisiones

De esta forma, el papel de las energías renovables en la mitigación de los cambios climáticos es uno de los temas más intensamente investigados en la ciencia climática. Energías emergentes como solar, eólica y geotermal surgen como claves en esta transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible. Estudios varios afirman que en países que actualmente generan electricidad principalmente a partir de fuentes fósiles como carbón o gas natural, su generalización provocaría reducciones muy importantes en sus emisiones de inhóspita CO. Además, la tecnología emergente, como el hidrógeno verde o los sistemas de almacenamiento de energía a través de baterías, están permitiendo cada vez más la integración masiva de energías renovables a la red eléctrica: superando los desafíos de la intermitencia y mejor estableciendo la continuidad del suministro energético [18].

### **3 Arquitectura de la Aplicación**

El objetivo principal de esta aplicación es sensibilizar a la comunidad estudiantil sobre su huella de carbono, ayudándoles a comprender y gestionar el impacto de sus actividades diarias en el medio ambiente. Para ello, la aplicación desarrolla un enfoque práctico y accesible que permite a los estudiantes medir las emisiones derivadas de sus hábitos cotidianos en cuanto a consumo de energía, transporte y alimentación. La metodología adoptada en este estudio sigue el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (Protocolo GEI), uno de los estándares más reconocidos y utilizados internacionalmente para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [13].

Resultó fundamental utilizar esta calculadora, ya que proporciona una medición estructurada y

precisa de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI. La calculadora que diseñamos está pensada para los estudiantes y sus actividades diarias, de modo que puedan evaluar el impacto ambiental personal de dichas actividades. El uso de esta metodología garantiza la comparabilidad de los resultados obtenidos con otros estudios y facilita la comprensión de los datos a nivel individual. La aplicación de este protocolo asegura que las emisiones calculadas sean significativas y representativas de las prácticas de la vida estudiantil, lo que facilita la concienciación y la toma de decisiones informadas.

#### Diagrama de flujo del sistema

El diagrama de actividades presentado ilustra el flujo completo del proceso implementado en la calculadora de huella de carbono diseñada para la comunidad estudiantil.

1. El usuario introduce en el formulario web información detallada sobre sus hábitos diarios, incluyendo transporte, consumo de energía, dieta y cualquier otro factor relevante.
2. Los datos se envían al servidor, donde se procesan según las fórmulas establecidas en el Protocolo de GEI para la cuantificación de emisiones. El sistema calcula automáticamente las emisiones de gases de efecto invernadero por categoría y genera un resumen cuantitativo de la huella de carbono individual.
3. Se crean visualizaciones gráficas interactivas para facilitar la comprensión inmediata de los resultados. Si el sistema detecta emisiones significativamente altas, se activará un mecanismo para ofrecer recomendaciones personalizadas.
4. El usuario puede visualizar tanto los resultados como las recomendaciones, cerrando el ciclo de retroalimentación y sensibilización ambiental.



Figura 2. Representación de la visualización de resultados.

Etapas del desarrollo de la calculadora

La calculadora diseñada introduce un cambio significativo porque aborda actividades y hábitos comunes en la comunidad estudiantil. Los pasos principales son:

### 1. Selección de Variables Relevantes

- Uso de electricidad en el hogar: consumo eléctrico según hábitos de estudio, dispositivos y ahorro energético.
- Transporte diario: diferenciando entre vehículo privado y transporte público.
- Hábitos alimenticios: consumo de productos y su impacto ambiental.
- Uso y disposición de productos electrónicos: consumo y gestión final de dispositivos.

### 2. Establecimiento de Fórmulas de Cálculo

- Cálculo del uso de energía: basado en consumo promedio de electricidad por hogar.
- Cálculo del transporte: basado en distancia recorrida y tipo de vehículo, considerando eficiencia de combustible.

Para la estimación de la huella de carbono individual, se utilizaron factores de emisión estándar de fuentes internacionales como la EPA [18], el IPCC [17] y MITERD [19]. Estos factores permiten calcular la huella en kg de CO<sub>2</sub> equivalente por mes.

#### Ejemplos de factores de emisión:

- Transporte en automóvil: gasolina 0.192 kg CO<sub>2</sub>/km, diésel 0.171 kg CO<sub>2</sub>/km, gas LP 0.15 kg CO<sub>2</sub>/km.
- Consumo eléctrico: 0.12 kg CO<sub>2</sub>/kWh estándar, 0.06 kg CO<sub>2</sub>/kWh mixto, 0.012 kg CO<sub>2</sub>/kWh renovable.
- Emisiones indirectas por consumo (ropa, electrónicos, alimentos, empaques) según análisis de ciclo de vida [21,22].

#### Cálculo ejemplo para automóvil:

Si un usuario recorre 400 km/mes en vehículo a gasolina:

$$\text{CO}_2\text{e} = 400 \text{ km} \times 0.192 \text{ kg CO}_2/\text{km} = 76.8 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

### 3. Diseño de la herramienta digital

- Preguntas sobre transporte, consumo energético y alimentación.
- Interfaz amigable y modular, con secciones temáticas: transporte, energía, alimentación.
- Estándares de usabilidad y responsividad, permitiendo ingreso fácil desde cualquier dispositivo.

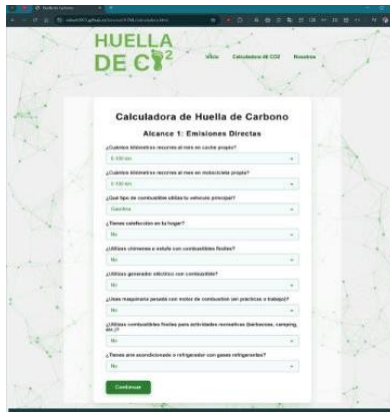


Figura 3. Visualización de la herramienta digital.

### Visualización de Resultados

- Gráficos dinámicos y diagramas interactivos que muestran el impacto individual por categoría.
- Sistema de recomendaciones automáticas basadas en emisiones detectadas.

### Arquitectura técnica de la solución

Se basa en una plataforma web interactiva, accesible desde cualquier dispositivo, diseñada para facilitar la medición de la huella de carbono de los estudiantes. Los componentes clave incluyen la interfaz de usuario (UI), que guía al estudiante para completar el formulario; el procesamiento de datos, encargado de aplicar las fórmulas del GHG Protocol para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); y la generación de gráficos, que proporciona visualizaciones de resultados y recomendaciones para fomentar hábitos sostenibles. La arquitectura está organizada de manera modular, de modo que cada sección del formulario alimenta directamente los gráficos, siguiendo principios similares a los del framework Dash en Python, lo que permite una retroalimentación inmediata sin necesidad de recargar la página.

### Evaluación de cobertura según los tres alcances del GHG protocol

Muestra que las emisiones directas (Alcance 1) están principalmente cubiertas mediante preguntas sobre el uso de vehículos privados, sistemas de calefacción y aparatos que implican combustión. Las emisiones indirectas por electricidad (Alcance 2) se abordan adecuadamente al solicitar el consumo mensual, el tipo de fuente energética y el número de personas que comparten el consumo. Por su parte, las otras emisiones indirectas (Alcance 3) incluyen el consumo de alimentos, empaques, ropa, electrónicos y vuelos comerciales, enfocándose en los hábitos propios de la comunidad estudiantil [13].

## 4 Conclusiones y Trabajo a Futuro

En resumen, algunos indicadores del comportamiento ambientalmente desfavorable que se observa en la sociedad son la prevalencia del transporte privado, el alto consumo de artículos

electrónicos y la escasa separación de residuos.

Mediante la aplicación de la metodología basada en factores de emisión del IPCC y la EPA, obtuvimos estimaciones fiables y comparables con estudios internacionales [19,20]. El método cuantitativo demostró cómo prácticas cotidianas aparentemente inocuas pueden generar, en conjunto, una carga ambiental significativa.

Un hallazgo muy importante fue el bajo nivel de conocimiento sobre la huella de carbono, lo que sugiere la urgente necesidad de impulsar la educación ambiental. En este sentido, las universidades deberían participar activamente en la formación de estudiantes con conciencia ambiental y responsables mediante campañas de sensibilización, talleres y programas interdisciplinarios que integren la sostenibilidad.

También se encontró potencial en la tecnología como aliada para la acción climática. Herramientas digitales como calculadoras de emisiones, aplicaciones móviles para el monitoreo del consumo de energía y sistemas de reciclaje gamificados pueden contribuir a crear un mejor camino hacia una vida sostenible. Estas herramientas también permitirían una retroalimentación personalizada y fomentarían cambios de hábitos mucho más efectivos.

Sin embargo, la responsabilidad no puede recaer únicamente en los individuos. Es imperativo que las instituciones implementen una política integral de sostenibilidad. Para ello, resulta fundamental invertir en energías renovables, desarrollar campus energéticamente eficientes, optimizar los sistemas de transporte interno y promover el consumo responsable en sus comunidades. La creación de zonas verdes, la correcta gestión de residuos y el uso racional del agua son también pilares clave para reducir el impacto ambiental institucional.

La huella de carbono de las universidades no debe considerarse simplemente como la suma de acciones individuales; es, más bien, la expresión de una compleja interacción entre infraestructura, políticas institucionales y cultura organizacional. Por lo tanto, cualquier esfuerzo por reducir las emisiones debe adoptar un enfoque sistémico que involucre a todas las partes interesadas.

Para futuras investigaciones, los resultados de este estudio pueden servir como punto de partida para el diseño de planes de acción climática en el ámbito universitario, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el Objetivo 13: Acción por el Clima [23]. Se propone el desarrollo y la validación de herramientas tecnológicas para la medición y el monitoreo de la huella de carbono, así como estrategias participativas para construir una cultura ambiental sólida y sostenible. Mediante acciones informadas, colaborativas y científicamente rigurosas, las universidades avanzan hacia una educación superior ambientalmente responsable.

## **Agradecimientos**

Los autores de este artículo agradecen al Cuerpo Académico Sistemas Inteligentes y Ciberseguridad de la Facultad de Ciencias de la Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

## Referencias

[1] Carbon Trust. *What is a carbon footprint?* Disponible en: <https://www.carbontrust.com/resources/briefing-what-is-a-carbon-footprint>

[2] ClimateSeed. *Why Measure Your Carbon Footprint?* Disponible en: <https://climateseed.com/blog/why-measure-your-carbon-footprint>

[3] Plana Earth. *Benefits of Monitoring Carbon Emissions for Business.* Disponible en: <https://plana.earth/academy/benefits-monitoring-carbon-emissions-for-business>

[4] The Guardian. (2025, 19 marzo). *Unprecedented Climate Disasters.* Disponible en: <https://www.theguardian.com/environment/2025/mar/19/unprecedented-climate-disasters-extreme-weather-un-report>

[5] The Guardian. (2025, 1 abril). *Impact of 4°C Global Warming.* Disponible en: <https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/01/average-person-will-be-40-poorer-if-world-warms-by-4c-new-research-shows>

[6] AP News. *Health Impact of Air Pollution.* Disponible en: <https://apnews.com/article/9fc086f392716c1b7d2b32ab7db6cc7d>

[7] The Guardian. (2025, 25 enero). *Biodiversity and Climate Change.* Disponible en: <https://www.theguardian.com/environment/2025/jan/25/the-kyoto-climate-treaty-is-hailed-on-stage-but-reality-tells-a-different-story>

[8] Climate Fact Checks. (2024). *More Than 150 Climate Disasters Hit in 2024: UN Warns of Growing Crisis.* Disponible en: <https://climatefactchecks.org/more-than-150-climate-disasters-hit-in-2024-un-warns-of-growing-crisis/>

[9] Organización Meteorológica Mundial (WMO). (2024). *State of the Global Climate 2024.* Disponible en: <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>

[10] Axios. (2025, 2 abril). *Rainstorms are getting more intense in San Antonio.* Disponible en: <https://www.axios.com/local/san-antonio/2025/04/02/san-antonio-rain-storms-intense-climate-change>

[11] NASA. (2024). *NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024.* Disponible en: <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024/>

[12] Protocolo de Kioto y Acuerdo de París. *Mecanismos Internacionales para la Reducción de Emisiones de GEI.* Disponible en: <https://unfccc.int>

[13] World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2004). *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard.* Disponible en: <https://ghgprotocol.org>

[14] Organización Mundial de la Salud (OMS). *La contaminación del aire y la salud*. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-air-pollution>

[15] University of California, Berkeley. *CoolClimate Calculator*. Disponible en: <https://coolclimate.berkeley.edu>

[16] Food and Agriculture Organization (FAO). (2018). *Agricultural Emissions and Carbon Footprint Reduction*. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i8248en/i8248en.pdf>

[17] Journal of Environmental Education. (2019). *Carbon Footprint of Students and Universities*. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/10.1080/00958964.2019.1694101>

[18] International Energy Agency (IEA). *Hydrogen: A Clean Fuel for the Future*. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

[19] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Greenhouse Gas Emissions Factors Hub*. Disponible en: <https://www.epa.gov/climateleadership/center-corporate-climate-leadership-ghg-emission-factors-hub>

[20] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Fifth Assessment Report (AR5)*. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

[21] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2021). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de GEI*. España. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es>

[22] WWF. (2022). *Informe Planeta Vivo*. Disponible en: <https://www.wwf.org>

[23] Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

[24] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *Clean Development Mechanism (CDM)*. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>

[25] World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2004). *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Disponible en: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>

[26] Hertwich, E. G., & Peters, G. P. (2010). *Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis*. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/es903729a>

[27] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). *Renewable Energy and Climate Change*. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-Energy-and-Climate-Change>

# **Clasificación de Gestos mediante Sensores en Smartwatches: un Mapeo Sistemático**

## **Gesture Classification using Smartwatch Sensors: A Systematic Mapping Study**

Miguel Ángel Castillo Sánchez, Antonio Armando Aguilera Güemez\*, Edwin Jesús León Bojorquez, Raúl Antonio Aguilar Vera

Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán, Anillo Periférico Norte, Tablaje Cat. 13615, Colonia Chuburná Hidalgo Inn, Mérida Yucatán.

A18003592@alumnos.uady.mx, aaguilet@correo.uady.mx, eleon@correo.uady.mx, avera@correo.uady.mx.

### **Abstract**

Gesture recognition is a subfield of human activity recognition, a key area of research at the intersection of artificial intelligence and ubiquitous computing. This study presents a systematic mapping of empirical literature related to gesture recognition using sensors in smartwatch devices. The search strategy led to the identification of 118 studies, of which 41 met the inclusion criteria and were analyzed in detail. This mapping enables the identification of trends, research gaps, and opportunities for future work. Furthermore, the findings provide a valuable knowledge base for both researchers and practitioners interested in developing gesture-based interaction systems using smartwatch sensors.

### **Resumen**

El reconocimiento de gestos es una subárea del reconocimiento de la actividad humana, un campo de investigación clave en la intersección entre la inteligencia artificial y la computación ubicua. Este estudio presenta un mapeo sistemático de la literatura empírica relacionada con el reconocimiento de gestos mediante sensores en dispositivos smartwatch. La estrategia de búsqueda permitió identificar un total de 118 estudios, de los cuales 41 cumplieron con los criterios de inclusión y fueron analizados en detalle. Este mapeo permite identificar tendencias, vacíos de investigación y oportunidades para futuras investigaciones. Además, los hallazgos ofrecen una base de conocimiento útil tanto para investigadores como para profesionales interesados en el desarrollo de sistemas de interacción basados en gestos por medio de sensores en smartwatch.

Keywords and phrases: Reconocimiento de Gestos, Clasificación de Gestos, Smartwatch.

## **1 Introducción**

El reconocimiento de la actividad humana (HAR, por sus siglas en inglés) es una disciplina central en la detección inteligente, orientada al análisis de patrones de comportamiento a partir de datos

generados por dispositivos físicos [1]. Una de sus subáreas es el reconocimiento de gestos, enfocado en identificar movimientos corporales significativos, como los realizados con manos, brazos, rostro o torso [2]. A diferencia de las actividades humanas, que suelen ser secuencias complejas, los gestos constituyen unidades básicas de movimiento [3], lo cual los hace especialmente útiles en aplicaciones para entornos inteligentes, como la automatización del hogar [3].

El crecimiento acelerado del uso de smartwatches ha impulsado el desarrollo de sistemas que permiten la interacción humano-computadora mediante gestos reconocidos por estos dispositivos. Esto ha generado la necesidad de analizar sistemáticamente la literatura para identificar tendencias, enfoques, tecnologías y vacíos de investigación.

Existen diversos estudios secundarios relacionados. Ferrari et al. [5] ofrecen una visión general sobre la interacción por gestos con smartwatches. Inácio et al. [6] se centran en los algoritmos y sensores utilizados. Tchantchane et al. [7] abordan una revisión técnica más amplia del reconocimiento de gestos basado en sensores en wearables no invasivos. Por su parte, Aguilera et al. [8] presentan un mapeo sobre fusión de datos multisensor para HAR, técnica que combina información de múltiples sensores para mejorar la precisión [9].

Este estudio aporta una visión integral sobre la clasificación de gestos en smartwatches, lo que lo diferencia de trabajos previos que se han enfocado únicamente en sensores, algoritmos específicos o revisiones técnicas más generales. Esta contribución radica en analizar de manera conjunta la evolución del campo, las técnicas de fusión de datos y los algoritmos de clasificación aplicados [10], proporcionando así un panorama más amplio de las tendencias y vacíos de investigación. Con ello, se busca sentar bases sólidas para el futuro de las aplicaciones de interacción entre smartwatches y entornos inteligentes.

## **2 Metodología de Investigación**

Este estudio adopta un enfoque de mapeo sistemático como método de investigación, con el objetivo de ofrecer una visión general y comprensiva de un área temática específica [11]. El proceso para llevar a cabo este tipo de estudio se estructura en tres actividades principales:

- **Planificación.** En esta fase, se elabora el protocolo del estudio de mapeo, en donde se plantean las preguntas de investigación, se definen los objetivos y se especifican las fuentes que se utilizarán para realizar las búsquedas. También se detallan los criterios de inclusión y exclusión para la selección de los estudios.
- **Ejecución.** En esta fase, se lleva a cabo el protocolo de estudio de mapeo, ejecutando la cadena de búsqueda definida en las fuentes seleccionadas, evaluando los criterios de inclusión y exclusión establecidos previamente.
- **Elaboración de informes.** Esta fase consiste en la presentación de los resultados del estudio de mapeo, que resume las conclusiones y ofrece una visión general de los hallazgos clave.

### **2.1 Preguntas de investigación**

Para abarcar el objetivo del estudio, se definió las siguientes preguntas de investigación:

- P1. ¿Cómo se distribuyen temporalmente los estudios sobre modelos de clasificación de gestos en smartwatches, de acuerdo con su año de publicación?
- PI.2. ¿Cuál es la distribución de los métodos de fusión de datos en modelos de clasificación de gestos en smartwatches, clasificados por el nivel de abstracción de datos?
- PI.3. ¿Cuál es la distribución de los algoritmos de clasificación en modelos de clasificación de gestos en smartwatches, categorizados por el enfoque (tradicional o profundo)?

## 2.2 Identificación y selección de fuentes

Para abordar la recolección de estudios primarios se trabajó con las siguientes cuatro bases de datos electrónicas: IEEE Xplore, ScienceDirect, Taylor & Francis y Google Académico. La cadena de búsqueda fue definida con base en la tarea principal de este estudio: la clasificación de gestos mediante sensores en dispositivos smartwatch. Dado que los gestos implican el movimiento de partes corporales específicas, se puso especial énfasis en estos términos durante la construcción de la cadena. La Tabla 1 presenta la cadena principal utilizada.

Tabla 1. Cadena de búsqueda inicial hecha con base a las preguntas de investigación.

<b>Cadena de búsqueda</b>
("Hand gesture" OR "Finger gesture" OR "Arm gesture") AND ("Smartwatch") AND ("Classification" OR "Recognition")

## 2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios utilizados para seleccionar los estudios más relevantes y alineados con los objetivos de esta investigación constituyen un componente fundamental del proceso metodológico. A continuación, se presenta el conjunto de criterios que guiaron la selección de los estudios incluidos en este estudio:

### Criterios de Inclusión (CI)

- Se incluyen estudios que contengan términos relacionados con los términos definidos en la cadena de búsqueda.
- Se incluyen estudios que estén escritos en inglés.
- Se incluyen estudios elaborados del año 2015 al 2025.

### Criterios de exclusión (CE)

- Se excluyen estudios que no estén relacionados con los criterios de inclusión anteriores.
- Se excluyen estudios de revisión.
- Se excluyen estudios que no usen datos de smartwatch.

- Se excluyen estudios que no clasifiquen gestos de la mano, dedos o brazo.
- Se excluyen estudios que estén elaborados antes del año 2015.

El proceso seguido para la abstracción de la información se define de la siguiente manera:

- Ejecución de la búsqueda: Se utilizó la cadena de búsqueda para realizar la consulta correspondiente en cada base de datos.
- Revisión inicial: Se inspeccionaron el título, resumen y palabras clave de los estudios obtenidos.
- Aplicación de criterios de exclusión: Se descartaron aquellos estudios que cumplieran con al menos uno de los criterios de exclusión previamente establecidos.
- Revisión completa: Se examinó el texto completo de los estudios preseleccionados para confirmar que cumplieran con los criterios de inclusión.
- Descartes finales: Los estudios que no cumplieran con los criterios de inclusión fueron eliminados.
- Registro de datos: Se almacenaron en una hoja de cálculo los datos relevantes de los estudios que respondieron a las preguntas de investigación.

#### 2.4 Ejecución

Los totales de estudios revisados durante el proceso de abstracción de información se observan en la Tabla 2, y en la Tabla 3 se observa un resumen de la ejecución de la búsqueda.

Tabla 2. Resultados de la búsqueda

Fecha de ejecución	02 de febrero de 2025		
Base de Datos	Cadena de Búsqueda	Estudios Obtenidos	Estudios Recuperados
IEEE Xplore	("Hand gesture" OR "Finger gesture" OR "Arm gesture") AND ("Smartwatch") AND ("Classification" OR "Recognition")	45	23
ScienceDirect	("hand gesture" OR "finger gesture" OR "arm gesture") AND "smartwatch" AND ("gesture classification" OR "gesture recognition")	44	9
Taylor & Francis	[[All: "hand gesture"] OR [All: "finger gesture"] OR [All: "arm gesture"]] AND [All: "smartwatch"] AND [[All: "classification"] OR [All: "recognition"]]	12	1

Google Scholar	("hand gesture" OR "finger gesture" OR "arm gesture") AND "smartwatch" AND ("gesture classification" OR "gesture recognition") -review -survey	17	8
----------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----	---

Tabla 3. Recuento de estudios totales revisados

<b>Estudios totales</b>	118
<b>Estudios revisados</b>	118
<b>Estudios excluidos</b>	77
<b>Estudios aceptados</b>	41

### 3 Resultados

En esta sección se presentan los resultados derivados de la abstracción y síntesis de la información obtenida de los estudios de acuerdo con las preguntas de investigación definidas en la sección 2 [12-53].

3.1 ¿Cómo se distribuyen temporalmente los estudios sobre modelos de clasificación de gestos en smartwatches, de acuerdo con su año de publicación?

El propósito de esta pregunta es identificar las tendencias temporales en la realización de estudios primarios relacionados a modelos de clasificación de gestos en smartwatches, con el fin de evaluar la evolución y relevancia creciente del tema, proporcionando un contexto sobre el nivel de madurez del campo. La Figura 1 muestra un incremento notable en las contribuciones sobre este tema a partir de 2021, alcanzando un máximo en 2024 con ocho publicaciones registradas. Aunque en 2023 y 2022 solo se identificaron tres y dos publicaciones, respectivamente, los estudios realizados después de 2021 representan el 63 % del total. Por otro lado, en los años 2016 y 2018 únicamente se identificó un artículo publicado en cada uno.

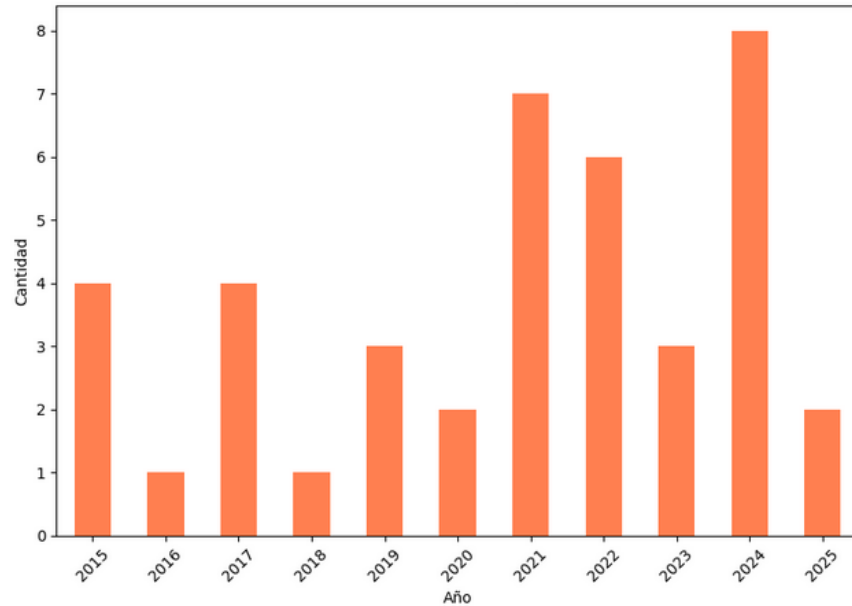


Figura 1. Distribución de estudios primarios por año

3.2 ¿Cuál es la distribución de los métodos de fusión de datos en modelos de clasificación de gestos en smartwatches, clasificados por el nivel de abstracción de datos?

El propósito de esta pregunta es investigar cómo se combinan los datos de múltiples sensores o fuentes en los modelos de clasificación de gestos para smartwatches, categorizando las técnicas según el nivel de abstracción de los datos. Se distinguen tres niveles principales: fusión a nivel crudo, fusión a nivel de características y fusión a nivel de decisión [9], los cuales se definen en la Tabla 4. La Figura 2 muestra la frecuencia de uso de las distintas técnicas de fusión.

Tabla 4. Niveles de fusión de datos usados para la clasificación de los estudios

Nivel de fusión	Definición
<b>Crudo (RawData)</b>	Los datos sin procesar de diferentes sensores son combinados para formar un nuevo conjunto de datos, de los cuales se obtendrán las características para entrenar al clasificador.
<b>Características (Features)</b>	Las características de cada modalidad se fusionan en un nuevo conjunto de características. Es importante que estas características sean independientes entre sí, y que además se encuentren en la misma escala de medición.
<b>Decisión (Decision)</b>	Múltiples clasificadores comparan el vector de características con los templates de la base de datos. Las salidas de cada uno son posteriormente fusionadas para llegar a una decisión final empleando técnicas como mayoría por votación.

Se observa que la fusión a nivel de características es el método predominante, presente en el 41 % de los estudios analizados. Le sigue la fusión a nivel de datos crudos, utilizada en el 29 % de los

casos. Por su parte, la fusión a nivel de decisión es la menos empleada, con solo un 2 % de los estudios. Cabe mencionar que el 24 % de los trabajos no aplicaron ningún tipo de fusión de datos.

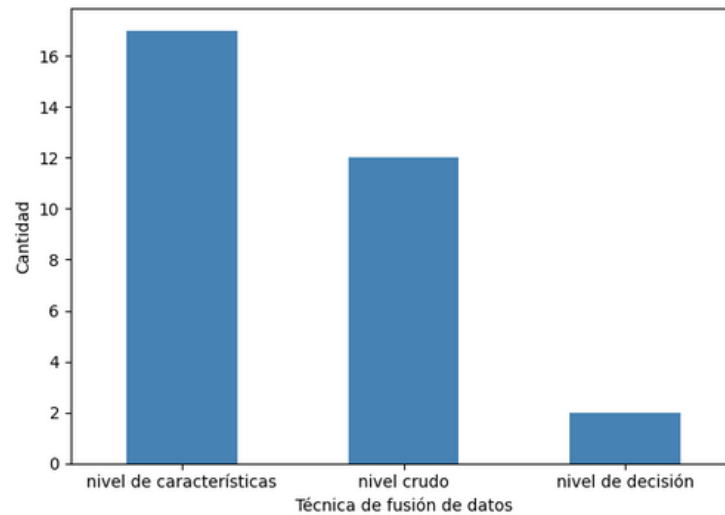


Figura 2. Distribución de Técnicas de Fusión de Datos

3.3 ¿Cuál es la distribución de los algoritmos de clasificación en modelos de clasificación de gestos en smartwatches, categorizados por el enfoque (tradicional o profundo)?

El propósito de esta pregunta es identificar y analizar los enfoques algorítmicos más utilizados en los estudios sobre clasificación de gestos mediante smartwatches, diferenciando entre técnicas de aprendizaje automático tradicional —como Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés), Vecinos más cercanos (KNN, por sus siglas en inglés) y Bosques Aleatorios (RF, por sus siglas en inglés) [9]— y métodos de aprendizaje profundo, como las Redes Neuronales Recurrentes (RNN, por sus siglas en inglés) y las Memoria a Largo Corto Plazo (LSTM, por sus siglas en inglés) [9]. El objetivo es comprender las tendencias actuales en el uso de estos enfoques.

En la Figura 3 se observa que las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, por sus siglas en inglés) y los Bosques Aleatorios (RF, por sus siglas en inglés) son los clasificadores tradicionales más populares, cada uno utilizado en aproximadamente el 9.8 % de los estudios. Les sigue de cerca el Clasificador Lineal (Linear Classifier) [12], con un 7.3 %. Otros algoritmos como Bayes Ingenuo (NB, por sus siglas en inglés) [9], el Árbol de Decisión J48 (J48 Decision Tree) [9], Coincidencia de Plantillas (Template Matching) [13], Potenciación de Gradiente Binaria (Binary Gradient Boosting) [14] y XGBoost [9] presentan una menor frecuencia, cada uno apareciendo en un único estudio, lo que equivale al 2.4 % del total. Por otro lado, la Figura 4 revela una mayor diversidad de arquitecturas de aprendizaje profundo empleadas, aunque con un claro predominio de las Redes Neuronales Convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) [9], presentes en el 12.2 % de los estudios. Les siguen en popularidad las arquitecturas recurrentes, como la Red Neuronal con LSTM Bidireccional (bi-LSTM-NN, por sus siglas en inglés) [9] y la GRU Bidireccional (BiGRU, por sus siglas en inglés) [15], cada una con una frecuencia del 7.3 %. Las CNN Profundas (DCNN, por sus siglas en inglés) [16] y la Red Neuronal con LSTM (LSTM-NN, por sus siglas en inglés) [17] fueron utilizadas en el 4.9 % de los estudios.

Finalmente, se identifica una amplia gama de otras arquitecturas de aprendizaje profundo, cada

una utilizada en un único estudio (2.4 % del total), entre las que se encuentran: MC-CNN [18], CNN-AF [19], CNN-ResBiGRU-CBAM [20], CNN-MLP [21], DeepConv-LSTM [22], Red Neuronal Artificial (ANN, por sus siglas en inglés) [9], BNN-Transformer [23], LSTM-CNN [24], F-BiGRU [25] y MM-Autoencoder [26].

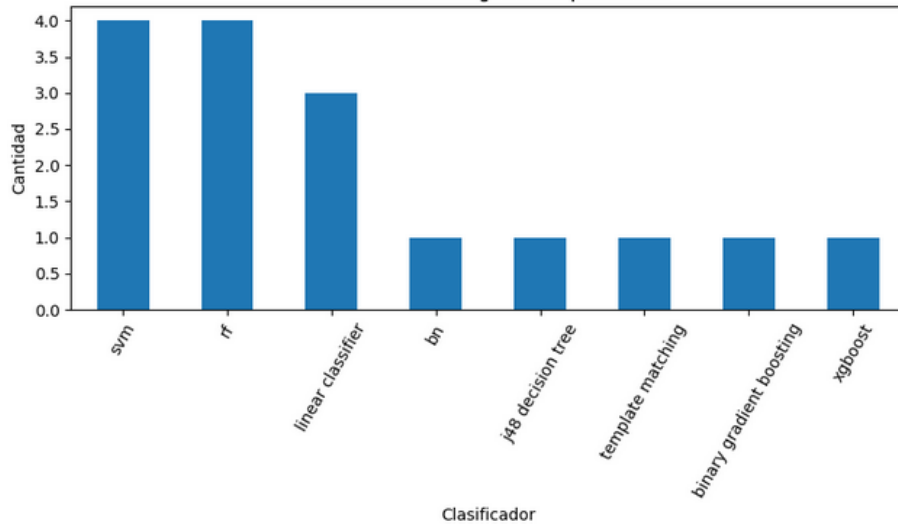


Figura 3. Distribución de Algoritmos Tradicionales

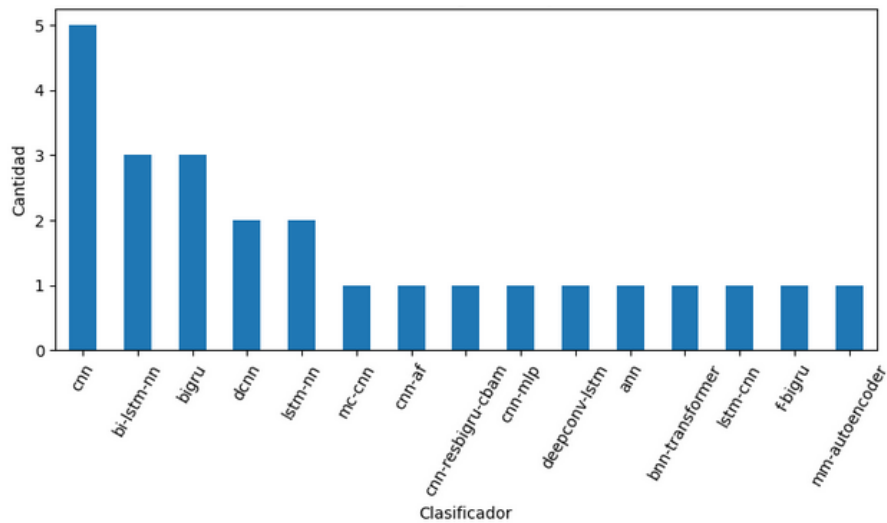


Figura 4. Distribución de Algoritmos Profundos

#### 4 Discusiones

Este mapeo sistemático ha identificado y analizado una cantidad significativa de literatura empírica sobre la clasificación de gestos mediante sensores en smartwatches, superando en alcance específico a revisiones previas que, aunque relacionadas, tenían enfoques más generales o se centraban en aspectos distintos. A continuación, se discuten los hallazgos en relación con las preguntas de investigación planteadas, para posteriormente mencionar las limitaciones de este

estudio.

#### 4.1 Hallazgos clave en relación a las preguntas de investigación

PI.1 (Distribución de las contribuciones): El análisis temporal de las publicaciones revela una tendencia creciente en el interés académico por los modelos de clasificación de gestos en smartwatches. Aunque se observaron contribuciones antes de 2021, el número de publicaciones se incrementa significativamente a partir de ese año, alcanzando su punto más alto en 2024 (Figura 1). Esto sugiere un fortalecimiento reciente del campo, posiblemente impulsado por la disponibilidad de dispositivos Smartwatch y el progreso en las técnicas de aprendizaje máquina [54].

PI.2 (Métodos de Fusión de Datos): La fusión a nivel de características es la técnica más empleada (Figura 2), seguida por la fusión a nivel de datos crudos. Por otra parte, la fusión a nivel de decisión es poco utilizada. Esta baja adopción podría deberse a la complejidad adicional que implica coordinar múltiples modelos y aplicar técnicas de agregación como la votación mayoritaria. Otro punto notable es que un número considerable de estudios no reportaron el uso de ninguna técnica de fusión, lo que podría implicar una oportunidad perdida para mejorar el rendimiento mediante la combinación de múltiples fuentes de datos.

PI.3 (Algoritmos de Clasificación): Existe una convivencia de enfoques tradicionales y de aprendizaje profundo. Entre los tradicionales (Figura 3), SVM y Random Forest son los más populares, seguidos por el Clasificador Lineal, reflejando su robustez y eficacia probada en tareas de clasificación. En el ámbito del aprendizaje profundo (Figura 4), las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) son predominantes, con arquitecturas recurrentes como Bi-LSTM-NN y BiGRU también mostrando una presencia significativa. La amplia variedad de arquitecturas de aprendizaje profundo, muchas de ellas aplicadas en un solo estudio, sugiere un campo en activa exploración y experimentación, buscando modelos más precisos o eficientes para datos secuenciales de sensores.

#### 4.2 Limitaciones del estudio

Este estudio, al basarse en un enfoque de mapeo sistemático, presenta ciertas limitaciones metodológicas. Una de ellas es la elección de los términos de búsqueda, que, a pesar del uso de múltiples bases de datos, pudo haber excluido estudios relevantes con enfoques o terminología distintos. Además, se limitaron los estudios a publicaciones en inglés, lo que puede haber restringido la diversidad lingüística y geográfica. Finalmente, se estableció como criterio de exclusión considerar únicamente trabajos publicados a partir de 2015, con el fin de centrarse en investigaciones recientes y alineadas con los avances tecnológicos, aunque esto pudo dejar fuera aportes teóricos valiosos previos a esa fecha. No obstante, se considera que los documentos analizados representan un panorama suficientemente robusto y representativo del estado actual del campo.

## 5 Conclusiones

Este mapeo sistemático ha sintetizado la investigación empírica sobre la clasificación de gestos mediante sensores en smartwatches, identificando 41 estudios primarios relevantes. Uno de los hallazgos más importantes fue el uso de técnicas de fusión de datos, siendo la fusión a nivel de características la más común, seguida por la fusión de datos crudos. En contraste, la fusión a nivel de decisión sigue siendo poco explorada, y un número considerable de estudios no utiliza ninguna

técnica explícita de fusión, lo que representa una oportunidad desaprovechada para mejorar el rendimiento de los modelos. En cuanto a los algoritmos de clasificación, se observó una amplia diversidad de enfoques, tanto tradicionales como de aprendizaje profundo. Técnicas como SVM, Random Forest y redes neuronales convolucionales (CNN) fueron las más utilizadas. Sin embargo, también se identificaron diversas arquitecturas menos frecuentes, lo que refleja un campo en desarrollo, sin una estandarización clara y con múltiples propuestas experimentales.

En definitiva, la clasificación de gestos en smartwatches es un campo de investigación en expansión, con gran potencial para transformar la interacción con dispositivos vestibles y habilitar aplicaciones innovadoras en diferentes áreas. Se espera que este mapeo sistemático sirva como base de conocimiento y punto de partida para futuras investigaciones que impulsen el desarrollo de soluciones más eficientes, robustas y adaptadas a escenarios reales.

Como trabajo futuro se propone elaborar una versión extendida de este estudio que incluya un análisis comparativo de los resultados obtenidos, en el que se contrasten cualitativamente los enfoques identificados en los distintos estudios primarios obtenidos. Asimismo, resulta pertinente avanzar hacia experimentos prácticos orientados a la creación de modelos de clasificación de gestos mediante sensores en smartwatches, tomando como base este estudio, que recopila y sintetiza el estado del arte en el área, con el fin de obtener resultados más sólidos.

## Referencias

- [1] Wei, X., Wang, Z. TCN-attention-HAR: human activity recognition based on attention mechanism time convolutional network. *Sci Rep* 14, 7414 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57912-3>
- [2] Ferrari, A., Puccinelli, D., & Giordano, S. (2015). Gesture-based soft authentication. 2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). doi:10.1109/wimob.2015.7348040
- [3] Bargellesi, N., Carletti, M., Cenedese, A., Susto, G. A., & Terzi, M. (2019). A Random Forest-based Approach for Hand Gesture Recognition with Wireless Wearable Motion Capture Sensors. *IFAC-PapersOnLine*, 52(11), 128–133. doi:10.1016/j.ifacol.2019.09.129
- [4] Hongliang Bi, Jian Zhang, Yanjiao Chen, Chaoyang Zhou, Zhibo Wang, Magic-hand: Turn a smartwatch into a mouse, *Pervasive and Mobile Computing*, Volume 78, 2021, 101487, ISSN 1574-1192, <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101487>.
- [5] T. Horbylon Nascimento, C. B. R. Ferreira, W. G. Rodrigues and F. Soares, "Interaction with Smartwatches Using Gesture Recognition: A Systematic Literature Review," 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), Madrid, Spain, 2020, pp. 1661-1666, doi: 10.1109/COMPSAC48688.2020.00-17.
- [6] Pedro Raphael Inácio Gomes, Murillo Santos de Castro, and Thamer Horbylon Nascimento. 2024. Gesture Recognition Methods Using Sensors Integrated into Smartwatches: Results of a Systematic Literature Review. In *Proceedings of the XXII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems (IHC '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 55, 1–11. <https://doi.org/10.1145/3638067.3638082>.

[7] Tchantchane, R., Zhou, H., Zhang, S. and Alici, G. (2023), A Review of Hand Gesture Recognition Systems Based on Noninvasive Wearable Sensors. *Adv. Intell. Syst.*, 5: 2300207. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300207>

[8] Aguilera, A. A., Brena, R. F., Mayora, O., Molino-Minero-Re, E., & Trejo, L. A. (2019). Multi-sensor fusion for activity recognition—A survey. *Sensors*, 19(17), 3808.

[9] Aguilera Güemez, A. A. Predicting the best sensor fusion method for recognizing human activity using a machine learning approach based on a statistical signature meta-data set and its generalization to other domains.

[10] Sheth, V., Tripathi, U., & Sharma, A. (2022). A comparative analysis of machine learning algorithms for classification purpose. *Procedia Computer Science*, 215, 422-431.

[11] Kitchenham, B., Charters, S.: Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (2007)

[12] Mladenić, D., Brank, J., Grobelnik, M., & Milic-Frayling, N. (2004, July). Feature selection using linear classifier weights: interaction with classification models. In *Proceedings of the 27th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval* (pp. 234-241).

[13] Villani, V., Sabattini, L., Battilani, N., & Fantuzzi, C. (2016). Smartwatch-enhanced interaction with an advanced troubleshooting system for industrial machines. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.547>

[14] Guo, X., Wang, Y., Cheng, J., Chen, Y.(. (2024). Fine-grained Gesture Recognition and Sign Language Interpretation via Photoplethysmography (PPG) on Smartwatches. In: *Mobile Technologies for Smart Healthcare System Design. Wireless Networks*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-57345-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-57345-3_7)

[15] H. Kim, H. Lee, J. Park, L. Paillat and S. -C. Kim, "Vehicle Control on an Uninstrumented Surface With an Off-the-Shelf Smartwatch," in *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 8, no. 5, pp. 3366-3374, May 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3236458.

[16] H. Bi, J. Zhang and Y. Chen, "SmartGe: Identifying Pen-Holding Gesture With Smartwatch," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 28820-28830, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967770.

[17] Wang, Y., Ke, S., An, C., Lu, Z., & Xia, J. (2024). A hybrid framework combining LSTM NN and BNN for short-term traffic flow prediction and uncertainty quantification. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(1), 363-374.

[18] Z. Wang et al., "Hear Sign Language: A Real-Time End-to-End Sign Language Recognition System," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 7, pp. 2398-2410, 1 July 2022, doi: 10.1109/TMC.2020.3038303.

[19] H. Wang, P. Kang, Q. Gao, S. Jiang and P. B. Shull, "A Novel PPG-FMG-ACC Wristband for Hand Gesture Recognition," in *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 26, no. 10, pp. 5097-5108, Oct. 2022, doi: 10.1109/JBHI.2022.3194017.

[20] S. Mekruksavanich, W. Phaphan and A. Jitpattanakul, "Detecting Face-Touching Gestures with Smartwatches and Deep Learning Networks," 2024 47th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic, 2024, pp. 249-252, doi: 10.1109/TSP63128.2024.10605968.

[21] J. Kim, J. Lee and W. Kim, "Transferable Convolutional Neural Networks for IMU-based Motion Gesture Recognition in Human-Machine Interaction," 2024 24th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of, 2024, pp. 61-66, doi: 10.23919/ICCAS63016.2024.10773204.

[22] S. Taniguchi, G. Hangli, T. Hamada, T. Michikata and N. Koshizuka, "Detecting Door Operations Using Wearable Devices," 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Osaka, Japan, 2022, pp. 172-176, doi: 10.1109/GCCE56475.2022.10014368.

[23] Wang, S., Li, K., Zhang, T., & Zhang, Z. (2024). Uncertainty-aware hand gesture recognition for safety-critical and emergency human-robot interaction. *Sensors and Actuators A: Physical*, 364, 116178. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116178>

[24] Casilari, E., Lora-Rivera, R., & García-Lagos, F. (2022). Automated classification of hand gestures using a wristband and machine learning for possible application in pill intake monitoring. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 219, 106753. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106753>

[25] Li, C., Xie, C., Zhang, B., Chen, C., & Han, J. (2018). Deep Fisher discriminant learning for mobile hand gesture recognition. *Pattern Recognition*, 77, 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.12.023>

[26] Singh, S. K., & Chaturvedi, A. (2024). An efficient multi-modal sensors feature fusion approach for handwritten characters recognition using Shapley values and deep autoencoder. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125, 109225. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109225>

[27] J. Wang, L. Qian, Y. Xie and Q. Long, "Subtle finger motion recognition based on the cots smartwatch," 2017 14th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), Chengdu, China, 2017, pp. 134-139, doi: 10.1109/ICCWAMTIP.2017.8301465.

[28] P. Zhu, H. Zhou, S. Cao, P. Yang and S. Xue, "Control with Gestures: A Hand Gesture Recognition System Using Off-the-Shelf Smartwatch," 2018 4th International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM), Chicago, IL, USA, 2018, pp. 72-77, doi: 10.1109/BIGCOM.2018.00018.

[29] S. Agarwal, S. Ghosh and G. Gupta, "Evaluation of Microgesture Recognition Using a Smartwatch," 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Cancun, Mexico, 2017, pp. 986-991, doi: 10.1109/ICMLA.2017.00-24.

[30] T. -C. Chang, Y. -C. Wu, C. -C. Han and C. -S. Chang, "Real-time Arm Motion Tracking and Hand Gesture Recognition Based on a Single Inertial Measurement Unit," 2024 11th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), Malmö, Sweden, 2024, pp. 44-49, doi: 10.1109/IOTSMS62296.2024.10710280.

- [31] X. Yu, Z. Zhou, L. Zhang and X. -Y. Li, "ThumbUp: Secure Smartwatch Controller for Smart Homes Using Simple Hand Gestures," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 23, no. 1, pp. 865-878, Jan. 2024, doi: 10.1109/TMC.2022.3216927.
- [32] Y. Gao, S. Zeng, J. Zhao, W. Liu and W. Dong, "AirText: One-Handed Text Entry in the Air for COTS Smartwatches," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 5, pp. 2506-2519, 1 May 2023, doi: 10.1109/TMC.2021.3130036.
- [33] S. Mekruksavanich, P. Jantawong, N. Hnoohom and A. Jitpattanakul, "Bidirectional Gate Recurrent Unit Neural Network for Recognizing Face Touching Activities using Smartwatch Sensors," 2021 25th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Chiang Rai, Thailand, 2021, pp. 454-458, doi: 10.1109/ICSEC53205.2021.9684642.
- [34] A. T. P. R, P. G, V. Harshitha, K. Subramani and J. S. L, "Smartwatch-Powered Vehicle Navigation On Unmapped Terrain," 2024 Third International Conference on Smart Technologies and Systems for Next Generation Computing (ICSTSN), Villupuram, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSTSN61422.2024.10670946.
- [35] J. Zhang, H. Bi, Y. Chen, M. Wang, L. Han and L. Cai, "SmartHandwriting: Handwritten Chinese Character Recognition With Smartwatch," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 960-970, Feb. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2947448.
- [36] Kalantarian H, Alshurafa N, Sarrafzadeh M. Detection of Gestures Associated With Medication Adherence Using Smartwatch-Based Inertial Sensors. *IEEE Sens J.* 2016 Feb;16(4):1054-1061. doi: 10.1109/jsen.2015.2497279. Epub 2015 Nov 2. PMID: 36452935; PMCID: PMC9708062.
- [37] S. Sen, V. Subbaraju, A. Misra, R. K. Balan and Y. Lee, "The case for smartwatch-based diet monitoring," 2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), St. Louis, MO, USA, 2015, pp. 585-590, doi: 10.1109/PERCOMW.2015.7134103.
- [38] H. Kalantarian, N. Alshurafa, E. Nemati, T. Le and M. Sarrafzadeh, "A smartwatch-based medication adherence system," 2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), Cambridge, MA, USA, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/BSN.2015.7299348.
- [39] S. Sen, K. Grover, V. Subbaraju and A. Misra, "Inferring smartphone keypress via smartwatch inertial sensing," 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kona, HI, USA, 2017, pp. 685-690, doi: 10.1109/PERCOMW.2017.7917646.
- [40] J. M. Santos-Gago, M. Ramos-Merino and L. M. Álvarez-Sabucedo, "Identification of Free and WHO-Compliant Handwashing Moments Using Low Cost Wrist-Worn Wearables," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 133574-133593, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115434.
- [41] C. O. Odhiambo, C. A. Cole, A. Torkjazi and H. Valafar, "State Transition Modeling of the Smoking Behavior Using LSTM Recurrent Neural Networks," 2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 898-904, doi: 10.1109/CSCI49370.2019.00171.

[42] P. Kasnesis, C. Chatzigeorgiou, L. Toumanidis and C. Z. Patrikakis, "Gesture-based incident reporting through smart watches," 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kyoto, Japan, 2019, pp. 249-254, doi: 10.1109/PERCOMW.2019.8730586.

[43] Odhiambo CO, Ablonczy L, Wright PJ, Corbett CF, Reichardt S, Valafar H. Detecting Medication-Taking Gestures Using Machine Learning and Accelerometer Data Collected via Smartwatch Technology: Instrument Validation Study. *JMIR Hum Factors*. 2023 May 4;10:e42714. doi: 10.2196/42714. PMID: 37140971; PMCID: PMC10196892.

[44] Negreiros Rylo, M., de Medeiros, R. L. P., & de Lucena Jr, V. F. (2022). Gesture recognition of wrist motion based on wearables sensors. *Procedia Computer Science*, 210, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.10.135>

[45] Youn, E., Lee, S., Kim, S., Shim, Y. A., Chan, L., & Lee, G. (2021). WristDial: An Eyes-Free Integer-Value Input Method by Quantizing the Wrist Rotation. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(17), 1607–1624. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898848>

[46] Chen, J., Saito, H., & Nakamura, H. (s. f.). Recognizing On-Surface Gesture Using Smartwatch. Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

[47] Tsunoda, R., Choi, M., & Shizuki, B. (2024). Thumb-to-finger gesture recognition using COTS smartwatch accelerometers. In *Proceedings of the International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM '24)* (pp. 184–195). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3701571.3701600>

[48] Kunwar, U., Borar, S., Berghofer, M., Kylmälä, J., Aslan, I., Leiva, L. A., & Oulasvirta, A. (2022). Robust and deployable gesture recognition for smartwatches. In *Proceedings of the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '22)* (pp. 277–291). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3490099.3511125>

[49] Kurz, M., Gstoettner, R., & Sonnleitner, E. (2021). Smart rings vs. smartwatches: Utilizing motion sensors for gesture recognition. *Applied Sciences*, 11(5), 2015. <https://doi.org/10.3390/app11052015>

[50] Ameliasari, M., Putrada, A. G., & Pahlevi, R. (2021). An evaluation of SVM in hand gesture detection using IMU-based smartwatches for smart lighting control. *Jurnal Infotel*, 13(2), 47–53. <https://doi.org/10.20895/infotel.v13i2.656>

[51] G. Li and H. Sato, "Sensing In-Air Signature Motions Using Smartwatch: A High-Precision Approach of Behavioral Authentication," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 57865-57879, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3177905.

[52] H. -Y. Yang, Y. -S. Han and C. -S. Nam, "Study on Finger Gesture Interface Using One-Channel EMG," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 9606-9614, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3527684.

[53] P. Kasnesis, C. Chatzigeorgiou, L. Toumanidis and C. Z. Patrikakis, "Gesture-based incident reporting through smart watches," 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kyoto, Japan, 2019, pp. 249-254, doi:

10.1109/PERCOMW.2019.8730586.

[54] Huyen, C. (2022). Designing machine learning systems. O'Reilly Media.

# **Desarrollo de un Robot Autónomo de Exploración Terrestre**

## **Development of an Autonomous Terrestrial Exploration Robot**

Dulce Paulina Olvera Alvarado, Daniel Isay López del Castillo, William Ortega Marín,  
María del Carmen Santiago Díaz, Ana Claudia Zenteno Vázquez, Gustavo Trinidad Rubín  
Linares

Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,  
México.

dulce.olveraal@alumno.buap.mx, daniel.lopezdelcastillo@alumno.buap.mx,  
william.ortega@alumno.buap.mx, marycarmen.santiago@correo.buap.mx,  
ana.zenteno@correo.buap.mx, gustavo.rubin@correo.buap.mx

### **Abstract**

This paper outlines the methodological design and technical basis for an unmanned ground vehicle (UGV) capable of autonomously exploring unknown terrestrial environments. The system integrates multi-sensor perception (LiDAR, camera, IMU), visual- or LiDAR-inertial SLAM, hierarchical planning using Navigation2 (ROS 2), and validation via physics-based simulation (Gazebo) and public benchmarks (KITTI, Oxford RobotCar). We define quantitative metrics (ATE, navigation success rate, energy consumption, and traversability) and a phase-based roadmap to build, integrate, and evaluate the system.

### **Resumen**

Se presenta el diseño metodológico y la base tecnológica para un UGV (Unmanned Ground Vehicle) capaz de explorar entornos terrestres desconocidos de forma autónoma. El sistema integra percepción multi-sensor (LIDAR, cámara e IMU), SLAM visual-inercial o LIDAR-inercial, planeación jerárquica con Navigation2 (ROS 2) y validación en simulación física (Gazebo) y benchmarks públicos (KITTI, Oxford RobotCar). Se definen métricas cuantitativas (ATE, éxito de navegación, consumo energético y traversabilidad) y un plan por fases para construir, integrar y evaluar el sistema.

Keywords and phrases: UGV, SLAM, ROS 2, Navigation2, Frontier-Based Exploration, LiDAR, ORB-SLAM3, Gazebo.

## **1 Introducción**

Los vehículos terrestres no tripulados (UGV, por sus siglas en inglés) diseñados para tareas de exploración se enfrentan a desafíos significativos. Para operar de manera efectiva en entornos complejos, estos sistemas deben ser capaces de percibir, mapear, localizarse y planear sus trayectorias con un alto grado de robustez. Esta robustez es crucial para superar obstáculos como oclusiones visuales, variaciones drásticas en la iluminación ambiental, la complejidad del terreno irregular y el ruido inherente a los datos de los sensores.

Una estrategia de diseño eficaz para gestionar esta complejidad es la implementación de una arquitectura modular, preferiblemente dentro de un *middleware* flexible como ROS 2 (Robot Operating System 2). Esta modularización permite el desacoplamiento de funciones clave: percepción, localización, mapeo, planeación y control, lo que a su vez facilita enormemente la reproducibilidad del sistema, las pruebas individuales de componentes y el mantenimiento [1].

Específicamente, este documento o artículo documenta y detalla exhaustivamente los siguientes aspectos clave del proyecto:

- (i) El estado del arte: Una revisión detallada de las investigaciones y tecnologías existentes relevantes para la navegación autónoma de UGVs de exploración [2].
- (ii) La metodología: El enfoque sistemático adoptado para el diseño e implementación del sistema robótico.
- (iii) Los módulos hardware y software: Una descripción pormenorizada de los componentes físicos y las pilas de software utilizadas en la construcción del UGV.
- (iv) Simulación y mediciones: Los resultados obtenidos tanto en entornos simulados como en pruebas de campo reales, demostrando la eficacia del sistema propuesto.
- (v) Fases de construcción con entregables: Un cronograma claro del desarrollo, incluyendo los entregables específicos para cada etapa del proyecto [3].

## 2 Marco Teórico y Estado del Arte

Tomando como punto de partida las tecnologías clave que habilitan la autonomía en robots terrestres, cubriendo la percepción, la representación del entorno y la toma de decisiones (navegación y exploración) [4][5]. Se debe considerar una precisión global, ya que es más importante que la construcción detallada de un mapa local para la aplicación en diferentes áreas, por lo que se decidió contemplar información registrada por otros autores para estos puntos importantes [6][7][8].

### Localización de alta precisión

La base para la navegación de estos robots en exteriores es la precisión métrica que ofrece la tecnología de satélites [9] corregida para esto se hace uso de la tecnología GNSS en tiempo real cinemático (RTK) que se usa como estándar en el tema de la localización en robótica de campo, logrando una precisión horizontal de hasta 1 cm [10]. Esto reportado gracias a la implementación en vehículos autónomos en agricultura para la navegación por puntos de ruta y cobertura de patrones predefinidos aplicados con éxito desde el principio de los 2000 [11].

Éste es otro aspecto relevante para el desarrollo del robot. Centrado en la detección de obstáculos inmediatos durante el camino de la misión asignada ha dicho robot aplicado para la seguridad y acción evasiva rápida.

Para este aspecto, se implementan sensores activos como lo son LIAR o ultrasonido. De esta forma, los robots emplean sensores que les ayuda a generar una vista local y temporal del entorno permitiéndoles calcular la mejor dirección de movimiento, dependiendo de la información de los

sensores de rango, evitando obstáculos mientras se dirige a su objetivo sin hacer uso del mapeo tal como se ha hecho con algoritmos de vector Field histogram (VFH) para navegación reactiva [12].

#### Sensores de visión

Siendo parte fundamental que nos proporciona información para poner en Match, el robot si llega a ser uso de cámaras RGB-D para la profundidad que han sido reportadas en la exploración para identificar vacíos, escalones y terrenos abruptos qué otros sensores podrían además de impulsar el aprendizaje profundo para la detección de objetos críticos, como lo pueden ser rocas, bordes, personas, animales, etc., permitiéndonos tomar decisiones reactivas de detenerse o girar dependiendo la percepción del terreno [13].

#### Controlar arquitectura basadas en comportamientos

Actualmente, la lógica de control de este tipo de robots se basa en arquitectura de subsunción o autómatas de estados finitos (F.S.M.). Estos sistemas reactivos hacen que el robot alterne entre estados discretos como:

- Patrón de cobertura
- Evitar obstáculo
- Recuperación del bloqueo
- Mover a WayPoint

Mantenimiento el objetivo de alto nivel en espera, es decir, al GPS y dándole prioridad inmediata al bajo nivel que se encarga de elevación VFH [14].

#### Estrategias de exploración

Usualmente en la aplicación de ese tipo de robots, sin un mapa interno, se usa una localización RT K, para ejecutar patrones, predefinidos, utilizando algoritmos de cobertura de área o trayectorias paralelas, aquí el único problema es generar un patrón óptimo que minimice el tiempo y la superposición mientras se manejan las irregularidades o cualquier evento que altere la trayectoria del robot, respetando los límites del terreno, teniendo como base la planificación de caminos para la cobertura, ya que como se ha mostrado un estudios [15] especialmente en maquinaria agrícola, lo más relevante es la optimización de las trayectorias.

### 3 Metodología

#### 3.1 Objetivo técnico

El objetivo es diseñar, construir y validar un Vehículo Terrestre No Tripulado (UGV) con capacidades avanzadas de autonomía. El sistema debe ser capaz de operar en entornos desconocidos y dinámicos, cumpliendo criterios cuantitativos rigurosos de precisión, seguridad y eficiencia.

Los criterios de éxito incluyen:

1. **Exploración Autónoma:** El UGV debe navegar y explorar un área desconocida, con una cobertura espacial mínima del 95%, sin intervención manual.
2. **Evasión de Obstáculos y Seguridad:** El sistema debe identificar y evadir obstáculos dinámicos y estáticos en tiempo real, manteniendo una distancia de seguridad mínima de 15 cm y registrando cero colisiones durante las pruebas de validación.

3. **Mapeo Navegable:** El UGV debe construir un mapa del entorno (por ejemplo, un mapa de ocupación u octomap) con una precisión de localización posicional inferior a 10 cm, que luego pueda ser utilizado para la navegación autónoma.
4. **Navegación hacia Metas y Eficiencia:** El vehículo debe alcanzar objetivos especificados dentro del mapa con una precisión de punto final de 5 cm, completando la misión en un tiempo 20% menor que el tiempo estimado para una operación manual.

Estas especificaciones servirán como base para la validación rigurosa del sistema, asegurando un rendimiento fiable en escenarios operativos del mundo real.

### 3.2 Arquitectura por módulos

Hardware:

La configuración del hardware es la base física del sistema, integrando componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos esenciales para la operación autónoma y segura del vehículo.

- Chasis Diferencial/4x4: La plataforma mecánica principal, que determina la movilidad y la capacidad de carga.
- Un chasis diferencial es ideal para entornos interiores o superficies lisas, ofreciendo una alta maniobrabilidad.
- Una configuración 4x4 proporciona tracción superior y robustez para terrenos irregulares, exteriores o condiciones desafiantes.
- Baterías con Sistema de Gestión de Baterías (BMS): La fuente de energía del sistema.
- Las baterías (comúnmente de iones de litio o LiPo) deben seleccionarse según los requisitos de voltaje, capacidad (Ah) y tasa de descarga (C).
- El BMS (Battery Management System) es crucial para monitorear el estado de carga (SoC), la salud de la batería (SoH), balancear las celdas, y proteger contra sobrecargas, descargas profundas y cortocircuitos, garantizando la seguridad y longevidad de la fuente de alimentación.
- Sensores (LiDAR, Cámara, IMU, Encoders, GNSS/RTK opcional): El conjunto de sensores (percepción) permite al sistema comprender su entorno y su propia posición.
- LiDAR (Light Detection and Ranging): Proporciona un mapeo 3D preciso del entorno, esencial para la detección de obstáculos y la localización (SLAM).
- Cámara: Ofrece datos visuales ricos en contexto (color, textura), utilizados para la identificación de objetos, segmentación semántica y navegación visual.
- IMU (Inertial Measurement Unit): Mide la aceleración lineal y la velocidad angular (orientación y movimiento relativo) del vehículo.
- Encoders: Sensores de retroalimentación en las ruedas/motores que miden la velocidad y la distancia recorrida (odometría).
- GNSS/RTK (opcional): El Sistema Global de Navegación por Satélite (con tecnología Real-Time Kinematic para mayor precisión) es vital para la localización absoluta en exteriores con precisión centimétrica, cuando sea necesario.
- Cómputo a Bordo (On-board computer): El cerebro del sistema, responsable de procesar los datos de los sensores, ejecutar algoritmos de navegación, control y toma de decisiones. Típicamente se usan microcontroladores (MCU) para control en tiempo real y ordenadores de placa única (SBC) o PCs industriales de alto rendimiento para el procesamiento intensivo de datos (ej. NVIDIA Jetson, Intel NUC).

## Software:

- Entorno de Desarrollo: Ubuntu y ROS 2  
La base del sistema es una distribución de Ubuntu (típicamente 20.04 Focal Fossa o 22.04 Jammy Jellyfish).
- Localización y Mapeo (SLAM)  
El sistema emplea algoritmos de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Se proponen dos enfoques modulares:
  - SLAM Visual-Inercial (V-INS): Utilizando ORB-SLAM3, un *framework* versátil compatible con sistemas monoculares, estéreo y RGB-D. Este enfoque aprovecha la fusión de datos de cámaras e IMU (Unidad de Medición Inercial) para una localización precisa y robusta en entornos con texturas ricas.
  - SLAM LiDAR-Inercial: Empleando Google Cartographer, que se enfoca en datos de sensores LiDAR 2D o 3D. Este método es ideal para entornos donde la percepción visual es limitada (poca luz o texturas repetitivas) y ofrece mapas de ocupación 2D altamente precisos.
- Los algoritmos de SLAM generan mapas de ocupación (*occupancy grids*). Estos mapas discretizan el entorno en celdas que representan la probabilidad de estar ocupadas, libres o ser desconocidas.
  - Mapas Estáticos: Generados inicialmente por el SLAM.
  - Costmaps Dinámicos: Utilizados por el sistema de navegación para la planificación de rutas. Estos *costmaps* añaden una capa de "coste" alrededor de los obstáculos (zona de inflado) para permitir que el robot mantenga una distancia segura, integrando datos de sensores en tiempo real para evitar colisiones dinámicas.
- Planificación de Navegación: Navigation2 (Nav2)  
La navegación autónoma se gestiona mediante Navigation2 (Nav2), el *stack* de navegación estándar de ROS 2. Nav2 utiliza Behavior Trees (Árboles de Comportamiento) para orquestar tareas complejas como la planificación global, la recuperación de fallos y la ejecución del movimiento.
  - Planeador Global (*Global Planner*): Calcula una ruta óptima desde el punto de inicio hasta el objetivo, utilizando el mapa estático y algoritmos como A\* o Dijkstra.
  - Planeador Local (*Local Planner*): Se encarga de la evitación de obstáculos en tiempo real y del seguimiento suave de la ruta global, ajustando la velocidad y dirección del robot (ej. DWA - *Dynamic Window Approach*).
  - Comportamientos de Recuperación (*Recovery Behaviors*): Módulos diseñados para manejar situaciones de fallo, como limpiar *costmaps* para salir de un bloqueo u orbitar en su sitio para re-localizarse.
- Exploración Autónoma (*Frontier-Based Exploration*)  
El sistema incluye un módulo de exploración autónoma que permite al robot mapear entornos desconocidos sin supervisión humana. Este módulo implementa la estrategia Frontier-Based Exploration (Exploración basada en fronteras).
  - Detección de Fronteras: Identifica los límites entre áreas conocidas/libres y áreas desconocidas en el mapa.
  - Selección de Objetivos: El robot elige el punto de frontera más prometedor (a menudo el más cercano o el que ofrece mayor ganancia de información) como su próximo objetivo de navegación, utilizando Nav2 para moverse a esa ubicación y expandir el mapa de forma iterativa hasta completar la cobertura del área.

### 3.3 Simulación y validación

- **Entorno de Simulación Avanzado y Detallado:**
  - Utilizar el simulador Gazebo (Ignition), que ofrece capacidades mejoradas para física realista y renderizado, para crear réplicas virtuales precisas.
  - Diseñar y poblar estos mundos virtuales con escenarios que incluyan elementos de navegación desafiantes como pasillos estrechos, rampas con inclinaciones específicas (que varían entre 5 y 15 grados) para probar el rendimiento del tren de aterrizaje y escenarios semiestructurados que integren vegetación densa y oclusiones visuales para evaluar la robustez de los algoritmos de percepción y planificación de rutas.
- **Integración y Validación de la Arquitectura de Software:**
  - Replicar fielmente dentro del entorno de simulación la topología de tópicos (ROS/DDS) y la implementación de Behavior Trees (BTs) que se emplearán en el robot físico.
  - Este paso es crucial para asegurar que la lógica de control, la comunicación entre módulos (sensores, actuación, planificación) y la toma de decisiones complejas se validen virtualmente antes de la implementación en hardware real, minimizando riesgos y acelerando el desarrollo.
- **Evaluación Rigurosa de SLAM y Odometría con Datos del Mundo Real:**
  - Implementar y ejecutar algoritmos de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) y odometría visual/inercial sobre datasets públicos de referencia, como los de KITTI Vision Benchmark Suite y el Oxford RobotCar Dataset, reconocidos por sus diversas y desafiantes condiciones de iluminación, clima y entorno.
  - El objetivo es estimar métricas de rendimiento clave, como el Error Absoluto de Trayectoria (ATE) y la deriva acumulativa, para cuantificar la precisión y robustez de los algoritmos bajo una amplia gama de condiciones operativas antes de la transición al despliegue en campo.

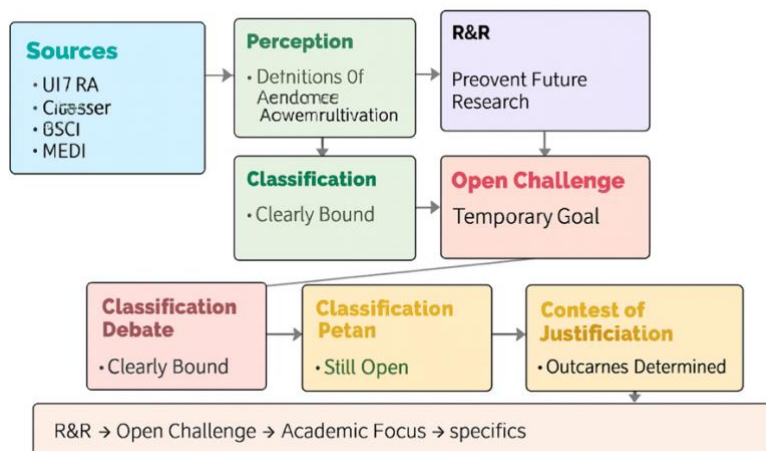


Figura 1. Arquitectura propuesta del UGV en ROS 2 (módulos y flujo de datos).

## 4 Tablas de Métricas

### 4.1 Localización/Odometría

Llenar esta tabla con valores específicos es difícil ya que el rendimiento de los algoritmos SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) varía ampliamente dependiendo del método exacto utilizado, el sensor, y la secuencia específica del Dataset, sin embargo, se han conjuntado la siguiente información de la Tabla 1.

Tabla 1. Localización y odometría.

Escenario/Dataset	Distancia (m)	ATE (RMSE, m)	Deriva (m/m)	Observaciones
<b>KITTI seq ##</b>	100 - 4000+	0.01 - 0.1 m (típico para los mejores métodos)	0.1% - 1%	Entorno exterior urbano con datos de coche real (LIDAR, cámara, GPS/IMU). Variaciones por iluminación, oclusión y velocidad.
<b>RobotCar route ##</b>	1000+ (secuencias largas)	0.05 - 0.2 m (variable)	0.5% - 2%	Entorno exterior urbano, conocido por las variaciones a largo plazo (clima, iluminación, estaciones). Datos de menor precisión de <i>ground truth</i> en comparación con KITTI.
<b>Interior sim (pasillos)</b>	10 - 100 m	0.005 - 0.02 m	< 0.1% - 0.5%	Entornos controlados y estructurados. El rendimiento suele ser muy alto debido a la claridad de las características y la ausencia de cambios dinámicos complejos.
<b>Exterior sim (rampas)</b>	10 - 100 m	0.01 - 0.05 m	< 0.1% - 0.5%	Similar al interior simulado pero puede incluir desafíos de terreno vertical. El rendimiento es generalmente alto en entornos simulados.

La tabla 1, se tiene que interpretar de la siguiente forma:

- **ATE (Absolute Trajectory Error):** Mide la consistencia global de la trayectoria estimada comparada con la trayectoria real (*ground truth*).
- **Deriva (m/m):** A menudo se expresa como un porcentaje del error de traslación relativo sobre la longitud total del camino.

- "###": Se refiere a secuencias específicas (ej. KITTI 00, 01, etc.) ya que los resultados varían para cada una. La secuencia KITTI 01, por ejemplo, es conocida por tener una precisión menor debido a la conducción a alta velocidad en autopista.
- **Observaciones:** Los valores son aproximaciones y dependen en gran medida del algoritmo SLAM específico (visual, LiDAR, fusión de sensores).

## 4.2 Mapeo

Los valores en la tabla son cualitativos o rangos esperados, ya que el rendimiento real depende del hardware específico, el software y la complejidad del entorno.

Tabla 2. Mapeo.

Escenario	Cierres de lazo (#)	Error ICP (m)	Consistencia (%)	Notas
Interiores	Muchos/Altos	Bajo (mm a cm)	Alta (>95%)	Ricos en características estáticas, oclusiones manejables, entornos controlados.
Exteriores	Pocos/Bajos	Moderado (cm a dm)	Moderada (80-95%)	Entornos dinámicos, menos características estáticas, iluminación variable, mayor escala.

Es importante comprender los siguientes aspectos en estas métricas:

- **Cierres de lazo (#):** Se refiere a la capacidad del algoritmo de SLAM para reconocer un lugar ya visitado.
  - En **interiores**, los entornos suelen tener muchas características distintivas y estáticas (paredes, esquinas, muebles) y son repetitivos (se pasa por el mismo pasillo varias veces), lo que facilita muchos cierres de lazo y mejora la precisión global del mapa.
  - En **exteriores**, los entornos son a menudo más grandes, menos repetitivos a distancias cortas y pueden tener elementos dinámicos (vehículos, personas), lo que resulta en menos detecciones de cierre de lazo efectivas.
- **Error ICP (m):** El error de Iterative Closest Point (ICP) mide la precisión del alineamiento entre dos nubes de puntos o escaneos consecutivos.
  - En **interiores**, debido a la proximidad de las superficies y la riqueza geométrica, el ICP suele lograr errores muy bajos, en el rango de milímetros a centímetros.
  - En **exteriores**, la mayor escala, la menor densidad de puntos a distancia y las perturbaciones atmosféricas pueden llevar a errores de alineamiento mayores.
- **Consistencia (%):** Mide la fiabilidad general del mapa construido o del proceso de registro.

- En **interiores**, los sistemas de lazo cerrado (con retroalimentación) son inherente menos sensibles a las perturbaciones y variaciones internas, logrando una alta consistencia y precisión a largo plazo.
- En **exteriores**, las mayores fuentes de error y menos restricciones pueden resultar en una consistencia más moderada.

## 5 Fases de Construcción y Cronograma Estimado

- Fase 0 — Alcance y requisitos (Día 0–1): documento de requisitos y tabla de métricas.
- Fase 1 — Simulación + pila base (Sem 1–2): ROS 2 + Nav2 + SLAM en Gazebo; evidencia (rosbags/video).
- Fase 2 — Integración de sensores (Sem 3–4): calibraciones y validación con bags; mapas en sim/real.
- Fase 3 — Navegación y exploración (Sem 5–6): ajuste de costmaps/planificadores y frontier-based.
- Fase 4 — Pruebas interiores (Sem 7): ATE y éxito; colisiones = 0.
- Fase 5 — Exteriores + benchmark (Sem 8+): pendientes, consumo energético; comparación con referencias.

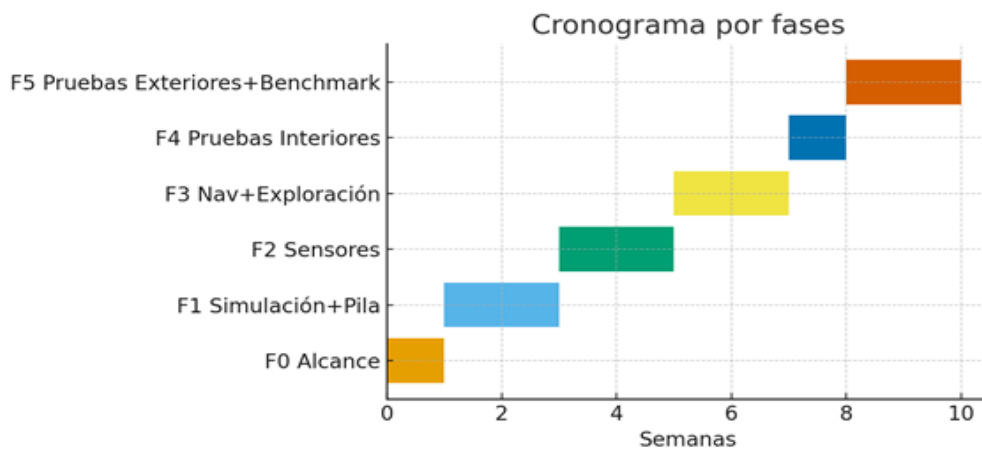


Figura 2. Cronograma de trabajo por fases (referencial).

## 6 Riesgos y Mitigaciones

- Deriva de SLAM en baja textura/vegetación: fusionar IMU/LiDAR, cierre de lazos, límites de velocidad.
- Falsos libres en occupancy grid por ruido: ajustar modelos de sensor e inflación de costes.
- Oscilaciones del controlador local: comparar DWB vs. MPPI y configurar estrategias de recovery.
- Limitaciones energéticas: estimar presupuesto de potencia por sensor/cómputo y política de retorno a base.
- Traversabilidad: limitar pendiente y velocidad; detección de suelo no transitable basada en coste/semántica.
-

## 7 Conclusiones

Se ha culminado con éxito la fase inicial de planificación y establecimiento de fundamentos para el desarrollo de un vehículo terrestre no tripulado (UGV) de exploración autónoma. Este proyecto ha sentado las bases técnicas y ha definido un plan de acción reproducible, centrado en la integración de tecnologías de vanguardia como ROS 2 (Robot Operating System 2) para la orquestación general del sistema y Nav2 para las capacidades avanzadas de navegación autónoma.

El núcleo de la funcionalidad del UGV se basará en algoritmos avanzados de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), específicamente variantes visual-inerciales o LiDAR-inerciales, que permitirán al robot percibir su entorno, localizarse dentro de él y generar mapas precisos.

El siguiente hito crucial en la hoja de ruta del proyecto es cerrar las Fases 1 y 2. Esto implica la obtención de resultados concluyentes a nivel de simulación, evaluando métricas clave como el Error de Trayectoria Absoluto (ATE) y la tasa de éxito de las misiones. Una vez validados estos resultados preliminares, el equipo estará preparado para iniciar las pruebas físicas controladas, marcando el paso de la simulación al despliegue en el mundo real.

## Referencias

- [1] C. Cadena et al., "Past, Present, and Future of SLAM," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 32, no. 6, 2016.
- [2] C. Campos et al., "ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multi-Map SLAM," *arXiv:2007.11898*, 2020.
- [3] A. Nüchter et al., "Improving Google's Cartographer 3D Mapping by Continuous-Time SLAM," *ISPRS Archives*, 2017.
- [4] A. Elfes, "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation," *CMU*, 1989.
- [5] Nav2 (ROS 2) Documentation: Behavior Trees and Navigation2 Stack.
- [6] Gazebo (Ignition) Documentation: Physics and Sensors.
- [7] B. Yamauchi, "A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration," *Proc. CIRA'97*.
- [8] KITTI Odometry Benchmark.
- [9] Oxford RobotCar Dataset.
- [10] Clearpath Husky UGV Datasheet.
- [11] L. R. Derr and L. A. Yoder, "Precise positioning for robotic vehicles using RTK-GPS and inertial sensing," *J. Field Robot.*, vol. 30, no. 5, pp. 770–785, 2013.
- [12] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 3, pp. 278–288, Jun. 1991.
- [13] R. Hadsell et al., "Learning long-range vision for autonomous off-road driving," *J. Field Robot.*, vol. 26, no. 2, pp. 120–141, Feb. 2009.
- [14] R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14–23, Mar. 1986.
- [15] H. Hwang and S. Park, "Path planning for coverage of agricultural fields using a cellular decomposition method," *Sensors*, vol. 13, no. 2, pp. 1819–1831, Feb. 2013.

# **Revisión Preliminar del Estado del Arte de Procesamiento de Lenguaje Natural y Aprendizaje Automático Aplicados a Sistemas de Recomendación en el Dominio de Reclutamiento en Puestos Laborales de Alta Demanda.**

## **Preliminary Review of the State of the Art in Natural Language Processing and Machine Learning Applied to Recommendation Systems in the Field of Recruitment for High-Demand Jobs.**

Omar Atriano Venta<sup>1,2</sup>, Perfecto Malaquías Quintero Flores<sup>1</sup>, Rodolfo Eleazar Perez Loiza<sup>1</sup>, Oscar Atriano Ponce<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av Instituto Tecnológico s/n Conurbado Tzompantepec, 90300 Ciudad de Apizaco, Tlax.

<sup>2</sup>SmartSoft America Business Applications S.A. de C.V. C. Adolfo López Mateos 131A, Texcacoac, 90806 Santa Ana Chiautempan, Tlax.

omar.atriano@outlook.com, data.sci.phd@gmail.com, rodolfo.pl@apizaco.tecnm.mx, oatriano@smartsoftamerica.com.mx

### **Abstract**

In recent decades, job recommendation platforms have been widely used by both recruiters and job seekers. The increasing unemployment phenomenon has led to an information overload in recruitment processes due to the exponential demand for highly sought-after positions, resulting in long response times for applicants and lengthy decision-making times for the best candidate. Therefore, the adoption of recommendation systems based on natural language processing and machine learning has been encouraged to improve response time, accuracy, and relevance of professional profiles for recruiters and job positions for applicants. This led to a preliminary study of the state-of-the-art of job and professional profile recommendation systems based on natural language processing and machine learning models and platforms. The review highlights four methodological lines in recommendation systems applied to recruitment. Classical models with supervised classifiers and structured attributes show acceptable accuracy, lacking semantic capacity. Content-based approaches with TF-IDF and Word2Vec maintain relevance, but are limited by their superficial representation of text. Hybrid models with transformers improve accuracy by incorporating richer contextual and semantic dependencies. Finally, approaches using large language models (LLMs) stand out for their contextual analysis capabilities and screening speed, although they present practical limitations related to computational costs and the risk of generating hallucinations.

### **Resumen**

En las últimas décadas las plataformas de recomendación de puestos de empleo han sido ampliamente utilizadas tanto por reclutadores como por solicitantes de empleo, donde al

presentarse un fenómeno cada vez creciente de desempleo provocando en los procesos de reclutamiento una sobrecarga de información resultante de la demanda exponencial de puestos de trabajo altamente solicitados, dando lugar a tiempos de respuesta largos para los solicitantes y altos tiempos para la toma de decisiones del mejor candidato. Por lo que la adopción de sistemas de recomendación basados en procesamiento de lenguaje natural y aprendizaje automático para mejorar el tiempo de respuesta, la precisión y relevancia de los perfiles profesionales para el reclutador y puestos de trabajo para el solicitante. Lo que llevó a realizar un estudio preliminar del estado del arte de sistemas de recomendación de puestos laborales y perfiles profesionales basados en modelos y plataformas de procesamiento de lenguaje natural y aprendizaje automático. La revisión evidencia cuatro líneas metodológicas en sistemas de recomendación aplicados al reclutamiento. Los modelos clásicos con clasificadores supervisados y atributos estructurados presentan exactitud aceptable, sin capacidad semántica. Los enfoques basados en contenido con *TF-IDF* y *Word2Vec* mantienen relevancia, pero limitados por su representación superficial del texto. Los modelos híbridos con transformadores mejoran la precisión al incorporar dependencias contextuales y semánticas más ricas. Finalmente, los enfoques con grandes modelos de lenguaje (*LLMs*) destacan por su capacidad de análisis contextual y velocidad en el screening, aunque presentan limitaciones prácticas relacionadas con costos computacionales y riesgo de generar alucinaciones.

Keywords and phrases: Recruitment Systems; Information Overload; Artificial Intelligence; Recommendation Systems; Transformers; TF-IDF; Word2Vec; Large Language Models (LLMs); Semantic Matching; Hybrid Approaches

## 1 Introducción

La llegada de las tecnologías de la información marcó un parteaguas en la globalización, al permitir que personas de diferentes partes del mundo pudieran interactuar sin necesidad de encontrarse en la misma ubicación. Este avance también transformó el acceso al mercado laboral, lo que permitió que personas de todo el mundo se postularan a los puestos de trabajo más deseados. Como consecuencia, la demanda de los puestos de trabajo más atractivos tuvo un crecimiento exponencial sin precedentes [1]. Mostrando que el alcance que en algún momento fue presentado como una ventaja, hoy en día sobrepasa la capacidad de asimilación de cualquier persona, convirtiéndose en un obstáculo que amenaza con diluir la relevancia de la información realmente útil. Además, este afecta por igual a ambos actores del mercado laboral. Para los reclutadores, significa enfrentarse a bases de datos inmanejables y a procesos de selección cada vez más costosos y lentos. Y para los buscadores de empleo, implica perderse en un mar de vacantes poco relevantes, repeticiones y descripciones ambiguas que dificultan la identificación de oportunidades acordes a su perfil. En este sentido, el reto actual ya no radica en la ausencia de opciones, sino en la capacidad de filtrar, priorizar y seleccionar con tiempos de respuesta limitados a los mejores perfiles dentro de un universo de información en constante expansión[1–2].

Esto ha provocado que se presenten distintas soluciones abordadas desde diversas perspectivas, ya sea desde el lado de los buscadores de empleo que intentan identificar la mejor oferta disponible o desde la perspectiva de los reclutadores que buscan al candidato más adecuado. Cada propuesta integra diferentes tecnologías con el objetivo de optimizar el proceso de filtrado en función de la necesidad específica que se pretende resolver.

Esto ha provocado que se presenten distintas soluciones abordadas desde diversas perspectivas. En el eje de modelos clásicos basados en clasificadores y atributos estructurados, se incluyen propuestas que integran clasificadores supervisados como regresión logística, *SVM* y Bosques aleatorios, los cuales utilizan atributos numéricos o contextuales para predecir la idoneidad de un candidato, como en sistemas que incorporan información de geolocalización o características extraídas de redes profesionales. Estos enfoques constituyen una aproximación inicial efectiva, aunque limitados por depender exclusivamente de atributos estructurados y carecer de un modelado semántico profundo. [2,3].

Por otro lado, se han planteado sistemas de recomendación tradicionales que emplean técnicas clásicas de vectorización (TF-IDF, similitud coseno) para vincular tanto vacantes con buscadores de empleo como reclutadores con candidatos; aunque aportan una conexión en dos direcciones, su eficacia se ve restringida por la pérdida de contexto semántico [4,5,6].

Un paso más allá lo constituyen los enfoques híbridos, que combinan filtrado basado en contenido y filtrado colaborativo con arquitecturas de lenguaje en base a transformadores. Estos sistemas permiten aprovechar un mayor contexto semántico y la similitud entre perfiles, aunque enfrentan la limitación del déficit de información en descripciones cortas de vacantes y de la brecha heterogénea entre perfiles resumidos de usuarios y descripciones de vacantes completas. [1,7,8].

Finalmente, se han comenzado a explorar soluciones basadas en inteligencia artificial generativa mediante enfoques que incorporan agentes basados en *LLMs*, capaces de evaluar y rankear candidatos de forma automática y hasta 11 veces más rápido que la revisión manual; sin embargo, presentan limitaciones importantes relacionadas con los altos costos económicos y computacionales de su entrenamiento e implementación a gran escala [9,10].

En este panorama, se observa que cada línea metodológica ha contribuido a enfrentar el problema de la sobreinformación en reclutamiento desde diferentes ángulos, de los cuales resaltan las soluciones que permiten una mayor adaptabilidad a contextos heterogéneos.

Por lo que los enfoques híbridos de sistemas de recomendación que integran transformadores semánticos como *BERT* o arquitecturas especializadas ofrecen un balance más robusto, ya que combinan contexto semántico profundo con la posibilidad de generalizar a múltiples áreas profesionales. Además de que las aproximaciones emergentes con agentes basados en *LLMs* destacan por su capacidad de análisis contextual avanzado, pero aún enfrentan desafíos de rapidez, escalabilidad y costo, posicionándola como una línea muy prometedora a futuro.

La contribución de esta investigación radica en presentar una revisión preliminar del estado del arte sobre sistemas inteligentes aplicados al reclutamiento, la cual no solo busca resaltar los avances más relevantes, sino que también identifica sus limitaciones y áreas de oportunidad, ofreciendo un panorama comparativo que orienta futuras investigaciones. En particular, se enfatiza la necesidad de enfoques híbridos que quilibren precisión semántica, escalabilidad y costo, lo que abre camino al diseño de soluciones más robustas y aplicables en escenarios reales de reclutamiento.

## **2 Metodología**

Para identificar, clasificar y analizar las propuestas más relevantes en torno a los sistemas

inteligentes que permitan mejorar la toma de decisiones en los procesos de reclutamiento. Para ello, se consideraron factores como la versatilidad en contextos heterogéneos (aplicación en vacantes de distintas áreas de estudio), la precisión alcanzada y los requerimientos necesarios para implementar cada solución.

### 2.1 Estrategia de búsqueda bibliográfica

Se realizó una búsqueda en bases de datos científicas, incluyendo IEEE Xplore, MDPI, Science Direct y arXiv. Se emplearon combinaciones de palabras clave como: *AI in recruitment*, *Recruitment recommendation systems*, *LLMs in recruitment*. El rango temporal considerado fue 2005–2025, abarcando publicaciones en inglés.

### 2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión: estudios relevantes que abordaran la aplicación de sistemas inteligentes aplicados al reclutamiento, como lo son sistemas de recomendación, soluciones con procesamiento de lenguaje natural o uso de grandes modelos de lenguaje.

Exclusión: documentos de carácter divulgativo, literatura sin validación académica, reportes técnicos sin evaluación científica y trabajos no relacionados directamente con procesos de selección de talento.

### 2.3 Categorización y análisis comparativo

Los trabajos seleccionados se organizaron en cuatro categorías principales: (i) modelos clásicos con clasificadores y atributos estructurados, (ii) sistemas bidireccionales con técnicas de vectorización, (iii) enfoques híbridos con transformadores, y (iv) aproximaciones emergentes basadas en agentes de lenguaje.

Cada propuesta se analizó en función de su metodología empleada, los datos utilizados, métricas de evaluación reportadas, ventajas observadas y limitaciones identificadas. Posteriormente, se sintetizaron los hallazgos en un marco comparativo que permitió reconocer patrones, brechas de investigación y oportunidades de mejora en la aplicación de sistemas inteligentes al reclutamiento. Apreciable en Tabla 5.1.

## 3 Estado del Arte

En esta sección se revisan los principales trabajos relacionados con la recomendación en reclutamiento, organizados en cuatro ejes: (i) soluciones clásicas basadas en aprendizaje automático y atributos estructurados, (ii) sistemas de recomendación tradicionales, (iii) modelos híbridos que integran sistemas de filtrado o recomendación y contexto semántico con transformadores, y (iv) aproximaciones emergentes basadas en agentes de inteligencia artificial (uso de grandes modelos de lenguaje) aplicados a la calificación y ranqueo de candidatos. Esta revisión permitirá identificar tanto los aportes como las limitaciones de las propuestas existentes, y establecer el punto de partida para la contribución presentada en este trabajo.

3.1 Prediction of recommendations for employment utilizing machine learning procedures and geo-area based recommender framework. (2022). Sustainable operations and computers [2]

Este trabajo propone un sistema de recomendación para empleo que integra procedimientos de aprendizaje máquina con un módulo geo-espacial como filtro contextual. La metodología consistió en recolectar datos de portales de empleo, extraer atributos numéricos de candidatos (edad, duración promedio en un puesto, conexiones, etc.), normalizarlos y posteriormente entrenar distintos clasificadores supervisados —incluyendo regresión logística, SVM y Bosques Aleatorios—, evaluados bajo validación cruzada estratificada. Los Bosques Aleatorios se consolidaron como el mejor predictor en exactitud, mientras que el componente de geolocalización permitió ajustar las recomendaciones al entorno físico de la organización, ofreciendo un enfoque práctico pero limitado al uso de atributos estructurados y sin modelado semántico profundo

### 3.2 Application of machine learning algorithms to an online recruitment system [6]

Esta propuesta realiza un prototipo de una evaluación de candidatos para un equipo de recursos humanos. La metodología de esta propuesta consiste en la extracción de características relevantes de los perfiles de LinkedIn de los candidatos (educación, experiencia laboral, lealtad, etc.) a través de la herramienta LIWC (*Linguistic Inquiry and Word Count*) y procesamiento de texto con lematización y etiquetado léxico. Lo que posteriormente sería utilizado para la generación de vectores que serían utilizados en los modelos de árboles de regresión (M5' model treem y REPTree), regresión lineal y SVR(Support Vector Regression) (con kernels no lineales, kernel polinómico, y kernel PUK o universal). Para posteriormente ser evaluados por medio de 10-fold-cross-validation estimando la correlación entre los resultados de los modelos y los datos etiquetados que marcan los evaluadores. Mostrando al árbol de regresión y al SVR como los mejor calificados. Si bien esto permite automatizar la preselección de candidatos y reducir la carga de los reclutadores, también presenta limitaciones relacionadas con la incertidumbre de los rasgos subjetivos, la dependencia de datos de entrenamiento potencialmente sesgados y la validez de la personalidad inferida a partir de textos disponibles.

### 3.3 NLP-Based Bi-Directional recommendation system (2022) [3]

La propuesta se centra en un sistema bidireccional que recomienda vacantes a candidatos y perfiles a reclutadores mediante un pipeline de procesamiento de lenguaje natural. La metodología inicia con web scraping de ofertas en Indeed y recolección de currículos, seguida de un preprocesamiento exhaustivo (limpieza, tokenización, lematización y eliminación de stopwords). Posteriormente se entrenó un modelo de reconocimiento de entidades con spaCy para extraer habilidades y se generaron representaciones vectoriales usando TF-IDF y Word2Vec. El emparejamiento se realizó mediante medidas de similitud coseno y Jaccard, y los resultados se validaron con métricas clásicas de decisión como precisión, recall, F1-score y exactitud, logrando mejoras notables en la predicción de correspondencias aunque con la limitación de depender de vectorización superficial que pierde contexto semántico.

### 3.4 Résumatcher: a personalized résumé-job matching system

Este artículo muestra un sistema que busca emparejar candidatos con puestos laborales. Su metodología consta de la extracción de información de los currículums de los candidatos (resumes) y de las descripciones de trabajos por medio de un transductor de estados finitos. El cual toma en cuenta elementos como educación, experiencia técnica, habilidades y otros para los candidatos y las aptitudes necesarias de la descripción de puesto. Posteriormente estos se pasan a modelos estructurados, lo que por medio de una representación vectorial permite calcular similitud entre entidades y a su vez rankearlas en base a una mayor similitud. Este sistema se

evaluó por medio de las métricas Precision@k y NDCG (Normalized Discounted Cumulative Gain). Reportando una mejora entre el 34% y 37% en comparación métodos de recuperación de información como TF-IDF, BM25, etc. Esto permite a los usuarios realizar un emparejamiento efectivo con puestos de trabajo, sin embargo también menciona un alto costo computacional lo que a la larga puede generar alta latencia.

### 3.5 Combining content-based and collaborative filtering for job recommendation system: A cost-sensitive Statistical Relational Learning approach [7]

Este trabajo propone una solución híbrida centrada en sistemas de recomendación que incluye el uso conjunto de filtrado basado en contenido y filtrado colaborativo. Su metodología consta de utilizar la información obtenida del filtrado basado en contenido y filtrado colaborativo como predictores para los modelos RDN (Relational Dependency Network) y RFGB (Relational Functional Gradient Boosting) los cuales permiten el aprendizaje entre las dependencias probabilísticas entre entidades y relaciones. Además de que se incorporó sensibilidad a los costos (cost-sensitive) con el objetivo de reducir los falsos positivos. La propuesta se evaluó por medio de medidas de precisión (F1-score, área bajo la curva ROC, FPR (*False Positive Rate*), FNR (*False Negative Rate*), *Precision@k*, *Recall@k*). Se utilizó un dataset con datos reales extraído de CareerBuilder y se comparó directamente con sus componentes individuales (filtrado colaborativo y filtrado basado en contenido). No obstante, este trabajo presenta limitaciones en escalabilidad, dependencia de la calidad de los atributos, además de cierta complejidad de interpretación y ajuste, lo que puede dificultar su uso en escenarios muy grandes o con datos ruidosos.

### 3.6 HybridBERT4REC: A hybrid (Content-Based Filtering and Collaborative Filtering) recommender system based on BERT [4]

Este modelo extiende BERT4Rec incorporando un esquema híbrido que combina filtrado basado en contenido y filtrado colaborativo. La metodología consistió en construir dos flujos paralelos: uno para representar usuarios mediante secuencias de interacciones previas modeladas con BERT, y otro para representar ítems considerando patrones de consumo de usuarios similares, también enriquecidos con BERT. Ambos perfiles se fusionan en una capa de predicción para estimar la preferencia del usuario sobre un ítem. El modelo se evaluó en múltiples datasets públicos bajo métricas estándar como Hit Ratio y NDCG, mostrando mejoras consistentes frente a enfoques puramente secuenciales. Sin embargo, su dependencia en grandes históricos de interacción para el componente colaborativo lo vuelve menos aplicable a dominios con datos escasos o altamente heterogéneos, como ocurre en el reclutamiento.

### 3.7 JobFormer: Skill-Aware job recommendation with semantic-enhanced transformer [1]

Introduce un modelo de recomendación skill-aware que enfrenta el déficit de información en descripciones de vacantes y la brecha heterogénea entre estas y los perfiles de usuario, resumidos usualmente como distribuciones de habilidades. La metodología se basa en un enfoque de dos etapas: primero, un *item-level encoder (TextCNN)* extrae representaciones de deberes y requisitos en cada descripción de empleo, que luego son procesadas por un Transformer con atención local-global para capturar dependencias intra- y entre-vacantes, generando un conjunto candidato mediante similitud coseno. En la segunda etapa, un módulo de predicción de *click-through rate (CTR)* con atención cruzada combina estas representaciones con el perfil del usuario para reordenar las vacantes. El modelo se validó en datasets reales con métricas de Recall@K, NDCG@K, AUC y MRR, alcanzando resultados state-of-the-art en precisión e interpretabilidad.

### 3.8 AI4HR Recruiter: a job recommender system for internal recruitment in consulting companies [9].

Presenta una solución en conjunto con la consultora ALTEN, en la se realiza la comparativa de dos algoritmos de recomendación. El primero, implementa un enfoque clásico de bolsa de palabras a través de tokenización de las aptitudes extraídas tanto del perfil del candidato como de la descripción del puesto, la puntuación de cada candidato es derivada por la suma ponderada de ocurrencias. Y el segundo enfoque implementa un sistema que utiliza una perspectiva de embeddings generados por transformadores de oraciones pre-entrenados (*pre-trained sentence-transformers*) para poder generar representaciones vectoriales más ricas en contexto semántico y posteriormente calcular medidas de similaridad con la descripción del puesto correspondiente. Para la evaluación de esta propuesta se utilizaron las métricas *precisión*, *recall*, *accuracy* y *F1-score*. De las cuales se pudo concluir que la implementación de bolsa de palabras es más precisa, pero la de los embeddings generados por transformadores de oraciones pre-entrenados un mayor *recall*. Además se reconoce que este sistema operó con un conjunto de datos muy limitado y sesgado, lo que indica un claro sobreajuste en la bolsa de palabras.

### 3.9 Application of LLM agents in recruitment: a novel framework for resume screening [5]

Plantea un marco metodológico basado en agentes multi-LLM para automatizar el resume screening. La propuesta divide el flujo de trabajo en agentes especializados: uno clasifica oraciones de CVs mediante fine-tuning supervisado, otro genera resúmenes y calificaciones de perfiles, y un agente decisor emula el rol de un gerente de recursos humanos para emitir recomendaciones finales. El dataset utilizado incluyó ~1,000 CVs del sector TI (78,668 oraciones), con los que se entrenaron modelos como LLaMA2-13B y GPT-3.5, evaluados en precisión, recall y F1-score para clasificación, así como tiempo de procesamiento total frente a revisión humana. El sistema logró un F1 de 87.73 en clasificación y ejecutó todo el proceso en menos de 3 horas, frente a más de 31 horas manuales, evidenciando una aceleración  $\times 11$ ; sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con escalabilidad, costos computacionales y desafíos de privacidad de datos.

### 3.10 Integrating large language models with near real-time web crawling for enhanced job recommendation systems [10]

Presenta un sistema híbrido de recomendación laboral el cual combina web scrapping (recopilación de puestos de trabajo) con múltiples agentes basados en LLM (extracción de características relevantes y ranqueo de diferentes candidatos en puestos de trabajo). El desarrollo de esta propuesta se realizó con la metodología DSR (*Design Science Research*) la cual establece ciclos iterativos utilizando tecnologías como Gemini 1.5 y LangChain remarcando el carácter productivo de la solución al incorporar interacción entre múltiples servicios de *backend* y *frontend*. Este sistema fue evaluado por medio de la métrica de precisión aplicada de manera empírica, siendo evaluada por un grupo de 13 personas las cuales calificaban en una escala del 1 al 10. Lo que resultó en una evaluación favorable (cercana al 8) para mencionada etapa de prototipo. Sin embargo, es muy notoria la falta de métricas cuantificables, además de que el tiempo de respuesta del *web scrapper* y de los agentes basados en LLM es muy alto, lo que hace el escalamiento complicado y afecta negativamente la percepción del usuario.

## 4 Resultados

A partir de la revisión de artículos reportada en el estado del arte, se sintetizaron los hallazgos en

un marco comparativo que organiza dichas contribuciones en cuatro categorías metodológicas: (i) técnicas de aprendizaje automático basadas en atributos estructurados, (ii) sistemas de recomendación tradicionales fundamentados en representaciones vectoriales, (iii) sistemas de recomendación híbridos que integran uno o varios tipos de filtrado con transformadores, y (iv) aproximaciones emergentes con agentes basados en *LLMs*. Este cuadro resume de manera sistemática las ventajas, limitaciones y áreas de oportunidad de cada enfoque, lo que permite reconocer patrones de desempeño, brechas recurrentes y oportunidades de mejora en el diseño de futuros sistemas de recomendación orientados al reclutamiento.

Esto permite observar que, en conjunto, los sistemas híbridos con transformadores ofrecen actualmente el mejor balance entre precisión y capacidad de generalización, mientras que los agentes basados en *LLMs* representan la línea más prometedora a futuro, siempre que se logren superar sus limitaciones de costo, privacidad y confiabilidad. Asimismo, la combinación de ambos enfoques se perfila con un alto potencial, al integrar la solidez semántica de los transformadores con la capacidad evaluativa y explicativa de los *LLMs*.

## 5 Discusión

Los resultados de esta revisión muestran que las cuatro líneas metodológicas identificadas — técnicas de aprendizaje automático, sistemas de recomendación tradicionales, sistemas de recomendación híbridos con transformadores y agentes basados en *LLMs*— ofrecen respuestas complementarias al problema de la selección de candidatos en puestos altamente competidos.

En particular, los sistemas de recomendación híbridos con transformadores se consolidan como la alternativa más robusta en la actualidad, ya que combinan capacidad semántica profunda con mayor potencial de generalización. A su vez, los agentes basados en *LLMs* representan la línea emergente con mayor proyección a futuro, al integrar velocidad, flexibilidad y generación de explicaciones útiles en la toma de decisiones.

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos como HybridBERT4Rec[7] y JobFormer [1], que demuestran mejoras significativas frente a técnicas clásicas como TF-IDF y Word2Vec. Sin embargo, en contraste con propuestas recientes que destacan a los *LLMs* como solución inmediata, en esta revisión se enfatiza que su adopción aislada aún enfrenta obstáculos críticos vinculados a costos, privacidad y confiabilidad, lo cual limita su implementación práctica en escenarios de gran escala.

Asimismo, se identificaron limitaciones transversales que persisten en las distintas metodologías. Entre ellas destacan: la falta de conjuntos de datos estandarizados y representativos en reclutamiento; la dependencia de grandes históricos de interacción para alcanzar un rendimiento óptimo; la escasa atención a métricas centradas en la experiencia del usuario final; y los riesgos de sesgo y discriminación derivados de datos de entrenamiento históricos. Estas brechas de investigación constituyen un espacio fértil para la evolución de futuros sistemas, especialmente si se busca aumentar su transparencia, equidad y aplicabilidad en múltiples dominios profesionales

Tabla 1. Marco comparativo del estado del arte

Categoría	Ventajas	Limitaciones	Áreas de oportunidad
Técnicas de aprendizaje automático	Implementación sencilla y bajo costo computacional. Interpretables y fáciles de validar con métricas	No capturan contexto semántico ni relaciones complejas. Dependencia de atributos	Explorar enfoques híbridos ligeros que combinen atributos estructurados con representaciones

	<p>tradicionales. Útiles cuando se dispone de datos numéricos estructurados (ej. experiencia, historial laboral).</p>	<p>manuales, difíciles de generalizar a textos libres. Poco adaptables a sectores con información no estructurada.</p>	<p>semánticas. Integración de señales contextuales adicionales (ubicación, redes, trayectoria).</p>
<p>Sistemas de recomendación tradicionales (TF-IDF, Word2Vec)</p>	<p>Mejoran relevancia frente a métodos puramente numéricos. Aprovechan representaciones textuales conocidas y reproducibles. Bidireccionalidad: permiten vincular candidatos con vacantes y viceversa. Bien soportados en la literatura con métricas estandarizadas (Precisión, Recall, F1, NDCG).</p>	<p>Pierden contexto semántico profundo; trabajan a nivel superficial de tokens. Sensibles a sinónimos, polisemia y redacción heterogénea. Escalabilidad limitada: alto costo computacional en corpus grandes. Menor pertinencia en dominios con terminología ambigua o cambiante.</p>	<p>Incorporar embeddings semánticos que reduzcan la pérdida de contexto. Incorporar un agente basado en LLMs para mitigar errores semánticos causados por sinónimos o similares.</p>
<p>Sistemas de recomendación híbridos con transformadores</p>	<p>Capturan dependencias semánticas locales y globales. Alcanzan mejores resultados en métricas como Recall@K, NDCG, AUC y MRR. Capacidad de generalización hacia distintos dominios profesionales. Permiten interpretabilidad mayor al resaltar relaciones entre habilidades y requisitos.</p>	<p>Elevada complejidad computacional y necesidad de grandes volúmenes de datos. Requieren costosos procesos de entrenamiento y ajuste fino (<i>fine-tuning</i>). Dependencia de históricos de interacción para obtener el máximo rendimiento. Vulnerables a déficit de información en descripciones cortas de vacantes.</p>	<p>Incorporar un proceso de sumarización de perfiles y vacantes para tener representaciones semánticas más concisas. Optimizar eficiencia mediante más modelos ligeros. Mejorar la precisión al mezclar con técnicas como lo podrían ser agentes basados en LLMs para poder tomar un mejor criterio final.</p>
<p>Agentes basados en LLMs</p>	<p>Capaces de generar resúmenes y explicaciones útiles para la toma de decisiones. Flexibles: pueden adaptarse a distintos criterios organizacionales y dominios profesionales. Analizan simultáneamente hard skills, soft skills y coherencia narrativa de CVs.</p>	<p>Altos costos económicos y computacionales, especialmente en inferencia a gran escala. Riesgos de privacidad y confidencialidad al manejar datos sensibles. Posibilidad de "alucinaciones" o errores no detectables fácilmente.  Resultados aún poco estandarizados y difíciles de reproducir científicamente.</p>	<p>Contemplar la alternativa de agentes con pequeños modelos de lenguaje (<i>Small Language Models</i>) para aumentar su velocidad y reducir costos. Combinar con otros sistemas de filtrado previo para reducir la carga de los agentes</p>

## 6 Conclusión

En síntesis, esta revisión permitió sistematizar el estado del arte de los sistemas inteligentes aplicados al reclutamiento, identificando fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora. Los resultados muestran que los modelos híbridos con transformadores ofrecen actualmente el mejor balance entre precisión, interpretabilidad y generalización, mientras que los agentes basados en LLMs se perfilan como la vía más prometedora para el futuro, siempre que se superen las barreras de costo, escalabilidad y confiabilidad. La combinación de ambos enfoques destaca como una estrategia de alto potencial, al integrar la solidez semántica de los transformadores con la capacidad

evaluativa y explicativa de los LLMs.

Las implicaciones de este trabajo apuntan a que la evolución de los sistemas de recomendación en reclutamiento no dependerá de un único paradigma, sino de la integración estratégica de múltiples enfoques. Esto puede traducirse en procesos de selección más ágiles, transparentes y ajustados a las necesidades tanto de reclutadores como de candidatos.

Finalmente, como líneas de trabajo futuro se propone: (i) avanzar hacia pipelines híbridos más ligeros y energéticamente eficientes, (ii) desarrollar mecanismos de explicabilidad que aumenten la confianza de los usuarios, (iii) incorporar métricas centradas en impacto organizacional y satisfacción de los candidatos, y (iv) explorar el uso de Small Language Models (SLMs) que permitan mantener las capacidades de análisis contextual reduciendo costos y tiempos de inferencia. Estas acciones representan un camino claro hacia soluciones más justas, sostenibles y aplicables en escenarios reales de reclutamiento.

## Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a los revisores del CONACIC 2025 por sus muy valiosas observaciones, a todo el equipo del TecNM – IT Apizaco que indirectamente fue participe de la creación de este capítulo de libro y finalmente al equipo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por permitir que se sigan apoyando a los equipos de investigación en este país.

## Referencias

[1] Guan, Z., Yang, J., Yang, Y., Zhu, H., Li, W., & Xiong, H. (2024, April 5). JobFormer: Skill-Aware Job Recommendation with Semantic-Enhanced Transformer. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2404.04313>

[2] Prediction of recommendations for employment utilizing machine learning procedures and geo-area based recommender framework. (2022). Sustainable Operations and Computers, <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.11.001>

[3] Faliagka, E., Ramantas, K., Tsakalidis, A., & Tzimas, G. (2012, May). Application of machine learning algorithms to an online recruitment system. In Proc. International Conference on Internet and Web Applications and Services (pp. 215-220).

[4] Alsaif, S. A., Hidri, M. S., Ferjani, I., Eleraky, H. A., & Hidri, A. (2022). NLP-Based Bi-Directional Recommendation System: towards recommending jobs to job seekers and resumes to recruiters. Big Data and Cognitive Computing, 6(4), 147. <https://doi.org/10.3390/bdcc6040147>

[5] Guo, S., Alamudun, F., & Hammond, T. (2016). RésumMatcher: A personalized résumé-job matching system. Expert Systems with Applications, 60, 169-182.

[6] Yang, S., Korayem, M., AlJadda, K., Grainger, T., & Natarajan, S. (2017). Combining content-based and collaborative filtering for job recommendation system: A cost-sensitive Statistical Relational Learning approach. Knowledge-Based Systems, 136, 37-45.

[7] HybridBERT4REC: A hybrid (Content-Based Filtering and Collaborative Filtering) recommender

system based on BERT. (2022). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9780356>

[8] AI4HR Recruiter: a job recommender system for internal recruitment in consulting companies. (2023). 27th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2023) Systems (KES 2023), 27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050923012693>

[9] Gan, C., Zhang, Q., & Mori, T. (2024, January 16). Application of LLM Agents in Recruitment: A novel framework for resume screening. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2401.08315>

[10] Gauhl, D., Kakkanattu, K., Mukkattu, M., & Hanne, T. (2025). Integrating Large Language Models with near Real-Time Web Crawling for Enhanced Job Recommendation Systems. Computers, 14(9), 387. <https://doi.org/10.3390/computers14090387>

***Dimensiones de la Computación, una Exploración en Inteligencia Artificial,  
Datos Masivos y Protección Digital***

se terminó de editar en Diciembre de 2025 en la  
Facultad de Ciencias de la Computación  
Av. San Claudio y 14 Sur Jardines de San Manuel  
Ciudad Universitaria  
C.P. 72570

*Dimensiones de la Computación, una Exploración en Inteligencia Artificial,  
Datos Masivos y Protección Digital*

Coordinado por Gustavo Trinidad Rubín Linares

