

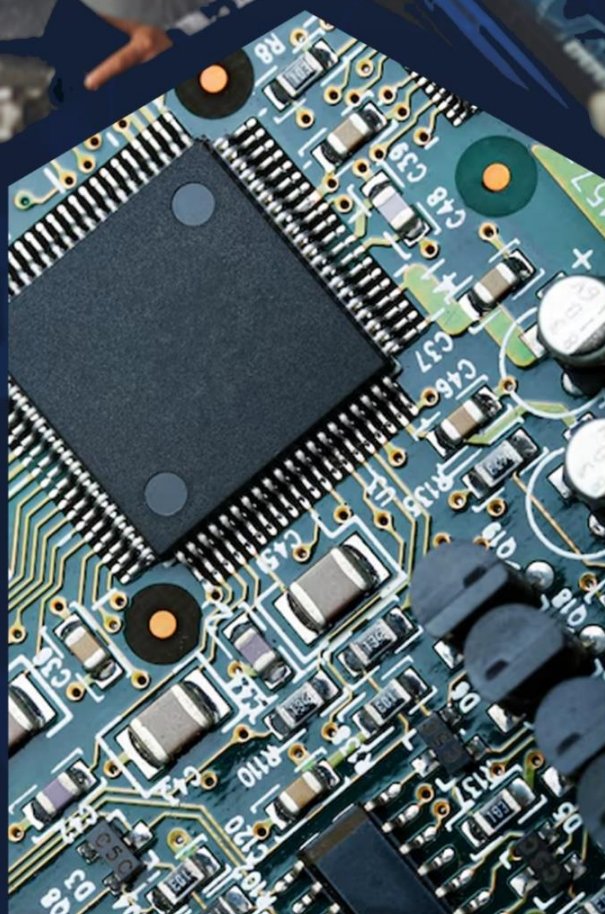


REVISTA

Ingenium



ENERO - JUNIO / 2026 / VOLUMEN 4 - NÚMERO 1



Comité Editorial

Director

Dr. Luis Eduardo Mathison Bonaguro. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0001-8563-9799>

Editora

MSc. María Gabriela Jiménez. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0001-0099-3503>

Comité Científico Nacional

MSc. Germán Vargas. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0001-9554-6000>

Ing. Ana Salas. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0001-2367-2825>

Ing. Jazmín Durán. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0001-1577-7045>

Ing. Rafael Flores. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0000-7672-5487>

Lic. Alexander Pérez. Universidad Yacambú
<https://orcid.org/0009-0002-2611-2118>

Comité Científico Internacional

Ing. Rosangel Rojas. Universidad Federal de Rio Grande, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0003-0776-599X>

Ing. Rafael Yépez. Universidad Federal de Rio Grande, Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-2557-8779>

Equipo de Apoyo

Ing. Andrei Núñez. Apoyo técnico
<https://orcid.org/0009-0008-3488-8534>

TSU Mercis Molero. Corrector de estilo / Diagramación / Maquetación
<https://orcid.org/0009-0003-4441-4408>

ISSN: en proceso

Depósito Legal: LA2024000023

Facultad de Ingeniería de la Universidad Yacambú



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Editorial

La ingeniería contemporánea enfrenta uno de los mayores desafíos de su historia: impulsar el desarrollo tecnológico sin comprometer la sostenibilidad ambiental, la eficiencia de los recursos y el bienestar de las generaciones futuras. En este contexto, la investigación científica adquiere una responsabilidad trascendental, no solo como mecanismo para generar conocimiento, sino también como una vía para diseñar soluciones capaces de responder a las exigencias de un mundo que demanda innovación, resiliencia y compromiso con el desarrollo sostenible.

Los trabajos que conforman esta edición de la Revista INGENIUM son una expresión tangible de ese compromiso. Desde diferentes perspectivas y áreas de aplicación, las investigaciones convergen en un objetivo común: aprovechar el potencial de las nuevas tecnologías para construir soluciones inteligentes, eficientes y alineadas con los principios de sostenibilidad que orientan los procesos de transformación global.

Uno de los aspectos más destacados de esta edición es la presencia de propuestas que evidencian la creciente integración de la inteligencia artificial en la resolución de problemas complejos. El uso de sistemas inteligentes para apoyar procesos de análisis, clasificación e interpretación de datos demuestra cómo estas tecnologías pueden contribuir significativamente a incrementar la precisión, reducir tiempos de respuesta y optimizar recursos, generando beneficios tanto económicos como sociales. Estas aplicaciones representan un claro ejemplo de cómo la transformación digital puede convertirse en un aliado estratégico para fortalecer sectores esenciales y ampliar las capacidades humanas mediante herramientas tecnológicas accesibles.

Igualmente, relevante es la reflexión que surge en torno a la transición hacia modelos energéticos más sostenibles. La búsqueda de alternativas que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles constituye una prioridad mundial, y la ingeniería está llamada a desempeñar un papel fundamental en este proceso. En este sentido, la exploración de tecnologías asociadas al hidrógeno como vector energético pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia sistemas de generación más limpios, eficientes y respetuosos con el ambiente. Aunque los desafíos técnicos, económicos y operativos siguen siendo significativos, investigaciones de esta naturaleza contribuyen a abrir espacios para el debate y la construcción de nuevas capacidades orientadas a una economía baja en carbono.

La sostenibilidad, sin embargo, no debe entenderse únicamente como un concepto asociado a la energía. También implica diseñar sistemas capaces de optimizar recursos, minimizar desperdicios, reducir costos operativos y mejorar la eficiencia de los procesos. Desde esta perspectiva, el desarrollo de soluciones tecnológicas basadas en automatización, análisis inteligente de datos y sistemas embebidos

representa una contribución directa a modelos de producción y gestión más sostenibles. Cada mejora en la eficiencia de un servicio, cada reducción en el consumo de recursos y cada optimización de un proceso constituyen aportes concretos a la construcción de organizaciones más responsables y competitivas

Las investigaciones presentadas ponen de relieve otro aspecto fundamental: la posibilidad de desarrollar tecnología de alto impacto mediante plataformas accesibles y de bajo costo. Este enfoque resulta particularmente relevante para América Latina y para Venezuela, donde la innovación debe responder a realidades económicas específicas sin renunciar a la calidad técnica ni al rigor científico. La democratización del acceso a tecnologías emergentes constituye, en sí misma, un factor clave para promover un desarrollo sostenible e inclusivo, capaz de beneficiar a un mayor número de organizaciones y comunidades.

En conjunto, los trabajos publicados reflejan una visión de la ingeniería orientada no solo a resolver problemas inmediatos, sino también a generar impactos positivos de largo plazo. Son investigaciones que promueven la eficiencia energética, la digitalización responsable, la automatización inteligente, la modernización de servicios y el fortalecimiento de las capacidades tecnológicas nacionales. Más allá de sus resultados particulares, todas comparten la convicción de que el conocimiento científico debe convertirse en una herramienta para impulsar el desarrollo sostenible, la competitividad y la mejora de la calidad de vida.

Desde la Facultad de Ingeniería de la Universidad Yacambú, reafirmamos nuestra confianza en la investigación como motor de transformación y como fundamento para construir soluciones innovadoras frente a los desafíos de nuestro tiempo. La transición hacia sistemas más inteligentes, sostenibles y resilientes, demandas profesionales capaces de integrar ciencia, tecnología y responsabilidad social en cada proyecto que emprendan.

Esperamos que esta nueva edición de INGENIUM sirva como un espacio de reflexión e inspiración para investigadores, docentes, estudiantes y profesionales, fortaleciendo el intercambio de conocimientos y promoviendo iniciativas que contribuyan al avance de una ingeniería comprometida con el desarrollo sostenible, la innovación tecnológica y la construcción de un futuro más verde para todos.

"La mejor manera de predecir el futuro es crearlo".

Peter Drucker

Dr. Luis Eduardo Mathison Bonaguro

Director

Tabla de Contenido

Artículos Académicos

Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos para Laboratorios de Microbiología de la UNEFM, *Roland Enrique Jimenez Jardim* 5

Factibilidad de una Empresa para la Elaboración de Plantas Eléctricas a Base de Hidrógeno Verde, *German Daniel Aponte Montiel* 35

Asistente Inteligente de Compras con Inteligencia Artificial Especializada, *María Elisa Rojas* 69

La Transición Hacia la Industria 5.0: Conceptualización, Beneficios Operativos y Desafíos en la Ingeniería Contemporánea, *Alexander José Rondón Suniaga*. 98

SISTEMA AUTOMATIZADO DE IDENTIFICACIÓN DE PATÓGENOS PARA LABORATORIOS DE MICROBIOLOGÍA DE LA UNEFM

AUTOMATED PATHOGEN IDENTIFICATION SYSTEM FOR UNEFM MICROBIOLOGY LABORATORIES

Roland Enrique Jimenez Jardim¹



<https://orcid.org/0009-0001-4102-2041>

Recibido: 28-04-2026

Aceptado: 22-05-2026

Resumen

El presente trabajo investigativo, propone el desarrollo de un sistema automatizado de identificación de patógenos para los laboratorios de microbiología de la UNEFM, integrando visión por computadora con el módulo ESP32-CAM, redes neuronales convolucionales entrenadas con muestras locales y una plataforma web alojada en un ESP32. Su objetivo principal es optimizar el diagnóstico microbiológico, reduciendo el tiempo de respuesta de más de 72 horas a menos de 5 minutos, minimizando errores humanos y garantizando la trazabilidad clínica mediante una base de datos local y generación de reportes PDF. La metodología comprendió un diagnóstico situacional, estudios de factibilidad técnica, operativa y económica, y el prototipado con hardware de bajo costo y software basado en inteligencia artificial. Los resultados obtenidos demuestran una precisión global del 93.8 % en la clasificación de seis clases de patógenos, un tiempo de inferencia promedio de 3.3 segundos, y una interfaz web funcional que permite el registro de pacientes, consulta de historiales y generación de reportes clínicos. Se ejecutaron pruebas de hardware y comunicación, precisión del modelo CNN, funcionalidades de la interfaz web y gestión de datos, comprobando la factibilidad técnica y operativa del sistema. Se concluye que el prototipo constituye una alternativa accesible, precisa y trazable para la identificación de patógenos en laboratorios públicos venezolanos.

Palabras clave: Automatización; microbiología; ESP32-CAM; diagnóstico rápido; patógenos.

Abstract

This undergraduate thesis proposes the development of an automated pathogen identification system for the microbiology laboratories of UNEFM, integrating computer vision with the ESP32-CAM module, convolutional neural networks trained with local samples, and a web platform hosted on an ESP32. Its main objective is to optimize microbiological diagnosis, reducing response time from over 72 hours to less than 5 minutes, minimizing human errors, and ensuring clinical traceability through a local database and PDF report generation. The methodology included a situational diagnosis, technical, operational, and economic feasibility studies, and prototyping with low-cost hardware and AI-based software. The obtained results demonstrate an overall accuracy of 93.8% in classifying six classes of pathogens, an average inference time of 3.3 seconds, and a functional web interface that allows patient registration, history consultation, and clinical report generation. Hardware and communication tests, CNN model accuracy tests, web interface functionalities, and data management tests were executed, confirming the technical and operational feasibility of the system. It is concluded that the prototype constitutes an accessible, accurate, and traceable alternative for pathogen identification in Venezuelan public laboratories.

¹ Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: jimenezroland205@gmail.com

Keywords: Automation; clinic microbiology; ESP32-CAM; rapid diagnosis; pathogen.

Introducción

La transformación digital ha revolucionado múltiples sectores estratégicos, entre ellos la medicina, mediante el despliegue de tecnologías inteligentes que optimizan los procesos clínicos. Sin embargo, el diagnóstico microbiológico en Venezuela continúa siendo un ámbito rezagado, caracterizado por métodos manuales que comprometen la rapidez, precisión y trazabilidad de los resultados. En laboratorios públicos como el de la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM), la identificación de patógenos se realiza mediante técnicas tradicionales que, si bien son fundamentales, presentan un importante margen de error y tiempos de respuesta que superan las 72 horas, afectando directamente la calidad de la atención médica.

Frente a este panorama, y en consonancia con los objetivos establecidos por el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2019–2025, surge la necesidad de desarrollar un sistema automatizado, accesible y contextualizado que permita mejorar los procesos diagnósticos microbiológicos. La presente investigación propone el desarrollo de un sistema de identificación de patógenos basado en visión artificial, redes neuronales convolucionales (RNC) y hardware de bajo costo, específicamente el ESP32-CAM, capaz de operar en entornos con limitaciones económicas y técnicas. Este sistema busca reducir el tiempo de diagnóstico a menos de cinco minutos, aumentar la confiabilidad del resultado y garantizar la trazabilidad de los datos clínicos mediante una plataforma web segura. Además, se alinea con los principios éticos y legales que indica que “el médico debe actuar con respeto a la dignidad del paciente y su integridad”, conforme a lo dispuesto en el artículo 11 del Código de Deontología Médica (Federación Médica Venezolana, 2014), integrando soluciones tecnológicas con criterios de bioseguridad, confidencialidad y pertinencia social.

Esta investigación se enmarca en el área de la tecnología aplicada, bajo un enfoque cuantitativo; en el que se expone el planteamiento del problema, los objetivos, tanto general como específicos, la justificación de la investigación, así como sus alcances y limitaciones. También, se desarrolla el marco teórico, abarcando los antecedentes nacionales e internacionales, los fundamentos de la microbiología clínica, la visión artificial y el marco legal que rige la protección de datos y la deontología médica en Venezuela. Por otro lado, se describe el marco metodológico, detallando las fases de la investigación, desde el diagnóstico situacional hasta los estudios de factibilidad técnica, operativa y económica que sustentan el prototipo.

Así mismo, se aborda el desarrollo del proyecto y la presentación de resultados, detallando la implementación de la arquitectura electrónica, el entrenamiento del modelo CNN y la integración de la

interfaz web de gestión. Finalmente, para presentar las conclusiones derivadas del cumplimiento de los objetivos y formula recomendaciones orientadas a la validación del sistema en entornos clínicos reales y a futuras líneas de desarrollo tecnológico.

Planteamiento del Problema

La transformación digital ha irrumpido con fuerza en sectores estratégicos como la industria y la medicina, redefiniendo procesos mediante el uso de microcontroladores, sensores, algoritmos inteligentes y plataformas de comunicación inalámbrica. Particularmente en el campo de la salud, esta evolución está dando paso a nuevas formas de diagnóstico, tratamiento y gestión clínica. Uno de los ámbitos más rezagados es el diagnóstico microbiológico, donde persisten técnicas manuales que comprometen la rapidez, precisión y trazabilidad de los resultados. Este desfase tecnológico es especialmente crítico en países como Venezuela, donde las limitaciones económicas y estructurales han obstaculizado la modernización de los laboratorios clínicos.

En Venezuela, muchos laboratorios de microbiología, como el de la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM), continúan empleando técnicas clásicas como tinción de Gram, cultivo en placas y análisis bioquímicos. Aunque fundamentales, estos procedimientos presentan limitaciones graves en velocidad, precisión, trazabilidad y estandarización. Por ejemplo, el tiempo promedio desde la recepción de una muestra hasta la emisión de un diagnóstico puede superar las 72 horas, esto debido a la subjetividad de los operadores, lo que genera tasas de error elevadas, lo que impacta negativamente tanto la atención médica como el bienestar del paciente, ya que los errores diagnósticos pueden derivar en tratamientos inadecuados, complicaciones clínicas o incluso riesgo vital.

A ello se suma la gestión ineficiente de los datos clínicos. Actualmente, los resultados de las pruebas se almacenan en libretas físicas o en hojas de cálculo no integradas, sin mecanismos de respaldo digital ni de vinculación directa con los historiales clínicos hospitalarios. Esto dificulta la trazabilidad de las muestras, la generación de estadísticas epidemiológicas y la toma de decisiones clínicas en tiempo real. Asimismo, existe el riesgo de pérdida o exposición de datos sensibles.

Aunque en países desarrollados se han adoptado sistemas automatizados de identificación bacteriana, como aquellos basados en espectrometría MALDI-TOF o inteligencia artificial hospedada en servidores de alto rendimiento, su implementación resulta inviable en el contexto venezolano debido a su elevado costo (más de 10.000 USD por unidad), complejidad técnica y requerimientos de mantenimiento especializado.

Frente a este panorama, diversos estudios han evidenciado avances significativos en la automatización del diagnóstico microbiológico, especialmente en países con mayores recursos tecnológicos. Se han desarrollado sistemas que integran espectrometría de masas (MALDI-TOF), plataformas automatizadas de siembra e incubación, y algoritmos de inteligencia artificial para la identificación microbiana y el análisis de susceptibilidad antimicrobiana. Estas tecnologías han demostrado mejorar la precisión diagnóstica, reducir los tiempos de respuesta y optimizar los flujos de trabajo en laboratorios clínicos. Sin embargo, su implementación en contextos como el venezolano sigue siendo limitada por factores económicos, técnicos y logísticos. En consecuencia, se propone un sistema automatizado, económico y contextualizado, capaz de realizar diagnósticos microbiológicos rápidos, confiables y trazables. Tal solución debe aprovechar tecnologías abiertas como ESP32-CAM, redes neuronales convolucionales (CNN) entrenadas con imágenes locales de patógenos, y plataformas web que permitan la visualización integrada de resultados, historiales clínicos y alertas epidemiológicas.

Este sistema no solo reduciría el margen de error humano y el tiempo de espera en el diagnóstico (<5 minutos), sino que también democratizaría el acceso a herramientas de precisión en laboratorios públicos, mejorando sustancialmente la calidad de atención sanitaria en zonas vulnerables.

En función de lo anterior, surgen las siguientes interrogantes que orientan esta investigación:

1. ¿Cómo automatizar la identificación de patógenos puede reducir el tiempo de diagnóstico microbiológico en laboratorios públicos venezolanos?
2. ¿Qué componentes y diseños electrónicos, basados en tecnología de bajo costo, permiten la captura y transmisión confiable de imágenes microscópicas para su análisis automatizado?
3. ¿Es posible implementar un modelo de red neuronal convolucional (CNN), entrenado con una base de datos de imágenes de patógenos locales, que logre clasificar con alta precisión hongos, parásitos y bacterias prevalentes en Venezuela?
4. ¿Cómo debe ser el diseño de una aplicación web para que, de manera segura, permita visualizar diagnósticos generados por IA, gestionar historiales clínicos y producir reportes médicos con trazabilidad?

Con base a las interrogantes anteriores se presentan el siguiente objetivo: “Desarrollar un sistema automatizado para la identificación de patógenos en laboratorios de microbiología de la UNEFM”, el cual se alcanzará con los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una arquitectura electrónica funcional basada en ESP32-CAM y adaptadores ópticos, capaz de capturar y transmitir imágenes microbiológicas y macrobiológicas.
- Implementar un modelo de redes neuronales convolucionales (CNN) entrenado con muestras locales, que clasifique hongos, parásitos y bacterias de importancia clínica en Venezuela.

- Desarrollar una aplicación web segura para la visualización de diagnósticos, el registro de historiales clínicos y la generación de reportes médicos digitalizados.

Justificación

La presente investigación se justifica desde múltiples dimensiones que evidencian su pertinencia en los ámbitos académico, científico, tecnológico y social. Desde un enfoque práctico, el desarrollo de un sistema automatizado de identificación de patógenos basado en visión por computadora, redes neuronales convolucionales (CNN) y hardware de bajo costo como el ESP32-CAM, busca transformar los procedimientos manuales del laboratorio en procesos estandarizados, precisos y trazables, optimizando el flujo de trabajo, reduciendo el esfuerzo técnico del operador y minimizando el margen de error humano. Esto se traduce en diagnósticos emitidos en minutos con mayor confiabilidad, beneficiando directamente al paciente mediante tratamientos más oportunos, mientras que la trazabilidad digital a través de aplicaciones web integradas con historiales clínicos garantiza una gestión segura y centralizada de los datos. En el plano metodológico, la investigación aporta un enfoque novedoso al integrar técnicas de prototipado rápido con inteligencia artificial y sistemas embebidos, estableciendo un precedente para futuros desarrollos contextualizados a la realidad venezolana, especialmente mediante el entrenamiento del modelo CNN con muestras locales de patógenos y el diseño de un adaptador óptico replicable en laboratorios con recursos limitados.

Desde una perspectiva teórica, este trabajo promueve el cruce interdisciplinar entre la ingeniería electrónica y la microbiología clínica, generando nuevos conocimientos sobre la aplicación de visión artificial y aprendizaje profundo en la identificación de patógenos prevalentes en regiones tropicales. Financieramente, el sistema propuesto se fundamenta en componentes de hardware abierto y bajo costo, con una inversión estimada inferior a los 100 USD, lo que lo hace viable para laboratorios públicos venezolanos con restricciones presupuestarias, ofreciendo una alternativa accesible frente a soluciones comerciales que superan los 10.000 USD. Socialmente, los principales beneficiarios son las poblaciones vulnerables que acuden a centros de salud públicos, al reducirse los tiempos de diagnóstico de más de 72 horas a menos de 5 minutos, incidiendo directamente en la disminución de complicaciones clínicas y en la mejora de los indicadores de salud comunitaria.

El presente trabajo se enmarca en la línea de investigación "Innovación de procesos industriales y productos tecnológicos" de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Yacambú, que promueve el desarrollo de soluciones tecnológicas originales para necesidades del entorno. Asimismo, responde al Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2019–2025, fomentando soluciones tecnológicas soberanas

que aborden problemas prioritarios de la población venezolana y reduciendo la dependencia de importaciones costosas, en concordancia con la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela respecto al derecho a la salud y al acceso a los avances de la ciencia.

Alcances

La presente investigación tiene como propósito desarrollar y caracterizar un sistema automatizado para la identificación de patógenos en laboratorios de microbiología, con especial énfasis en entornos de bajos recursos como el Laboratorio de Microbiología Clínica de la UNEFM. El estudio se centrará en el diseño e implementación de un sistema electrónico funcional, compuesto por componentes de bajo costo como el módulo ESP32-CAM y adaptadores ópticos, capaz de capturar imágenes digitales de muestras microbiológicas, realizar preprocesamiento local y ejecutar la clasificación automatizada mediante un modelo de redes neuronales convolucionales (CNN).

Asimismo, se contempla el desarrollo de una interfaz web destinada a la visualización de los diagnósticos generados, el registro de pacientes asociados a cada muestra y la generación de reportes clínicos básicos que permitan la trazabilidad de la información. El sistema será entrenado y validado con una muestra representativa de patógenos de importancia clínica en la región, limitándose a la identificación de hongos, parásitos y bacterias prevalentes en el contexto venezolano. La investigación abarcará desde la fase de diseño del hardware y software hasta la implementación de un prototipo funcional.

Limitaciones

A pesar del alcance técnico y funcional planteado, esta investigación presenta una serie de restricciones que deben ser consideradas. En primer lugar, el estudio se limita institucionalmente al Laboratorio de Microbiología Clínica de la UNEFM, lo cual impide extrapolar los resultados a otros contextos hospitalarios. Además, el sistema será entrenado inicialmente con una muestra reducida de patógenos, centrada en hongos, parásitos y bacterias comunes, por lo que no contempla la totalidad de variantes microbiológicas.

Otra limitación importante radica en la infraestructura de conectividad: el sistema depende de redes Wi-Fi para transmitir datos, lo que excluye su operación en zonas carentes de acceso inalámbrico. Por razones de accesibilidad económica, se prescindirá de sensores clínicos de grado industrial y cámaras de alta resolución, lo cual puede comprometer la calidad de imagen en ciertas condiciones. Finalmente, las pruebas se realizarán bajo condiciones controladas de laboratorio, sin contemplar la resistencia del sistema frente a factores ambientales extremos como humedad, vibración o variabilidad térmica.

Materiales y Métodos

Naturaleza de la Investigación

La presente investigación se enmarcó en orientó fundamentalmente en el paradigma cuantitativo, ya que su eje central es la medición objetiva y el análisis estadístico de variables clave para evaluar el desempeño del sistema. Se medirán aspectos como el tiempo de procesamiento por muestra, la tasa de aciertos y errores del modelo CNN, y la confiabilidad de los diagnósticos generados. la modalidad de proyecto factible, con diseño de campo descriptiva, según los criterios establecidos por el Manual de Escritos Académicos de la Universidad Yacambú (2024), para diagnosticar la necesidad de automatizar y optimizar el diagnóstico microbiológico en el Laboratorio de la UNEFM. A su vez, posee un carácter descriptivo, no solo se limita a la descripción del sistema, sino que también especifica, analiza las propiedades, características y comportamiento de las variables involucradas en el proceso de diagnóstico automatizado, como lo son el tiempo de procesamiento, la precisión del modelo de inteligencia artificial y la usabilidad de la interfaz web.

Fases de la investigación

Fase 1. Diagnóstico

Esta primera fase tiene como objetivo realizar un levantamiento exhaustivo de la situación actual del diagnóstico microbiológico en el Laboratorio de Microbiología Clínica de la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM), identificando limitaciones operativas, tecnológicos y humanos que afectan la calidad, eficiencia y trazabilidad en la identificación de agentes patógenos

Para ello, se aplicará una combinación de técnicas, como la observación directa estructurada, que permitirá registrar tiempos de análisis por muestra, frecuencia de errores y condiciones de trabajo. A su vez, se realizarán entrevistas semiestructuradas con el personal técnico y médico que opera en el laboratorio, con el fin de conocer sus experiencias, desafíos y percepciones sobre el proceso de identificación microbiológica, por lo que este acercamiento permitirá comprender cómo la subjetividad influye en los resultados.

Para esto, como instrumentos de recolección se utilizarán guías de observación estructuradas, bitácoras, entrevistas semiestructuradas y documentación fotográfica para recabar evidencias. Estos insumos se consolidarán en un informe de diagnóstico que orientará el diseño del prototipo automatizado y probará su potencial impacto en eficiencia clínica y gestión de datos.

Fase 2. Estudio Factibilidad

El estudio de factibilidad "es un proceso que permitió determinar si una idea de proyecto es viable o no" (Kerzner, 2017, p. 94). Este tipo de estudio permite identificar los riesgos potenciales y evaluar si los beneficios esperados superan los costos y desafíos asociados.

En el contexto de esta investigación, el estudio de factibilidad es fundamental para garantizar que el Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos sea viable en las condiciones reales del Laboratorio de Microbiología Clínica de la UNEFM, donde los recursos tecnológicos y económicos son limitados. Dicho esto, en la presente etapa se llevará a cabo el estudio de factibilidad donde se resalten aspectos base como lo son la viabilidad técnica, económica y operativa.

En este estudio se considerarán tres dimensiones clave:

Factibilidad Técnica. Se analizó la capacidad del hardware y el software para cumplir con los requerimientos de diagnóstico rápido y preciso en el entorno del laboratorio.

Factibilidad Económica. Se estimó los costos de desarrollo, implementación y mantenimiento del sistema, contrastándolos con los beneficios esperados, como la reducción de tiempos de diagnóstico y errores humanos.

Factibilidad Operativa. Se evaluó la adaptabilidad del sistema a la infraestructura existente en el laboratorio (conectividad, espacio físico) y la capacitación necesaria para el personal técnico.

Factibilidad Técnica

Para evaluar la factibilidad técnica del sistema automatizado de identificación de patógenos, se analizaron los recursos disponibles en el Laboratorio de Microbiología Clínica de la UNEFM. Se verificó la infraestructura eléctrica, la conectividad Wi-Fi y el espacio físico para instalar el dispositivo, asegurando compatibilidad con los microscopios ópticos existentes. Además, se confirmó la disponibilidad de herramientas como soldadores, multímetros y bancos de prueba para el ensamblaje y mantenimiento del hardware.

En cuanto a los componentes electrónicos, se seleccionó el módulo ESP32-CAM y el módulo ESP32 por su bajo costo, capacidad de procesamiento in situ y compatibilidad con redes neuronales convolucionales (CNN). Se diseñó un adaptador óptico para acoplar la cámara al microscopio, garantizando estabilidad en la captura de imágenes. El equipo de trabajo cuenta con experiencia en programación embebida, visión por computadora y manejo de microcontroladores, lo que garantiza la capacidad técnica para desarrollar e implementar el sistema propuesto.

Tabla 1*Personal involucrado en esta investigación*

Personal Involucrado	Oficio
Roland Jiménez	Realización e implementación del estudio
Ing. Rosa Leal	Revisión y asesorías

Nota. Elaboración propia.**Tabla 2***Periodo de Aplicación*

Periodo	Meses
2026 - 1	Enero – abril 2026

Nota. Elaboración propia.**Factibilidad Operativa**

La factibilidad operativa implica definir en detalle las actividades, procesos y recursos humanos necesarios para la implementación y operación continua del sistema automatizado de identificación de patógenos en el entorno clínico. En esta etapa se describen las tareas secuenciales (instalación, puesta en marcha, capacitación y mantenimiento) y se asignan roles específicos al personal involucrado: ingenieros electrónicos (para integración del hardware y programación del sistema), y médicos (para procesamiento de muestras, verificación de resultados, manejo diario del sistema y generación de reportes clínicos). Asimismo, se establecen protocolos de seguridad y bioseguridad que garanticen tanto la integridad del equipo como la confidencialidad de los datos clínicos de los pacientes.

Para el piloto se seleccionará el Laboratorio de Microbiología Clínica de la UNEFM, en Coro, Estado Falcón, valorando su infraestructura existente (microscopios ópticos, conexión eléctrica y red Wi-Fi institucional). El diseño del sistema automatizado de identificación de patógenos se organiza en tres etapas operativas:

Preparación del Sitio. acondicionamiento del área de microscopía para la fijación del adaptador mecánico sobre el microscopio óptico, así como verificación de la conectividad eléctrica y red institucional.

Integración del Hardware. montaje de la cámara ESP32-CAM en el microscopio mediante el adaptador, calibración de parámetros de captura (contraste, enfoque, exposición) y transmisión de imágenes al servidor local.

Capacitación del Personal. sesiones prácticas para técnicos y pasantes clínicos sobre uso de la interfaz web, interpretación de diagnósticos generados por el sistema, protocolos de validación cruzada y manejo ético de datos clínicos.

Factibilidad Económica

La factibilidad económica evalúa si el desarrollo e implementación del sistema automatizado resulta asequible según los recursos financieros disponibles y los precios de mercado local. En este proyecto, todos los gastos serán cubiertos por el autor, quien ha verificado la disponibilidad de componentes electrónicos y de montaje en proveedores nacionales a precios competitivos. A continuación, se presenta un desglose estimado de los costos de los principales módulos del sistema:

Tabla 3

Presupuesto estimado para el desarrollo del trabajo

Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo total (USD)
ESP32 + Wifi y Bluetooth	1	\$20.00	\$20.00
ESP32-CAM + Modulo OV3660	1	\$30.00	\$30.00
Adaptador para microscopio	1	\$10.00	\$10.00
Cables de alimentación 5 V/2 A	2	\$2.50	\$5.00
Protoboard y conectores	1	\$10.00	\$10.00
Herramientas y accesorios	1	\$15.00	\$15.00
Total aproximado			\$90.00

Nota. Elaboración propia.

En términos económicos, se puede concluir que el desarrollo de este trabajo es viable, ya que los componentes necesarios se pueden adquirir en el territorio nacional.

Fase 3: Diseño del Proyecto

En esta etapa, se observó el diagnóstico previo y el estudio de factibilidad en soluciones técnicas concretas. Se definieron los planos, diagramas y especificaciones detalladas del sistema automatizado de identificación de patógenos, incluyendo su arquitectura hardware, software y de interfaz web, de modo que el prototipo sea reproducible en laboratorios con condiciones similares a las de la UNEFM.

Etapas I. Elección de los Materiales

En esta etapa se define la selección de los insumos mecánicos, electrónicos y de interfaz, basándose en criterios de disponibilidad local, costo, resistencia, durabilidad y adaptación al

entorno. El objetivo es garantizar que cada componente aporte la funcionalidad requerida sin elevar innecesariamente el presupuesto ni complicar el mantenimiento. La estructura y herramientas están compuestas por:

- Adaptador para microscopio: Garantiza el acoplamiento estable entre la cámara y el microscopio óptico del laboratorio.
- Protoboard y conectores: Para interconexión de componentes durante la fase de prototipado y pruebas.
- Herramientas y accesorios: Incluyen soldador, estaño, multímetro y banco de pruebas necesarios para el montaje y mantenimiento.
- ESP32 + Wifi y Bluetooth: Unidad de control, adquisición de datos y comunicación Wifi.
- ESP32-CAM + Modulo OV3660: Captura y procesamiento de imágenes microscópicas.
- Fuente de alimentación 5 V/2 A: Suministro estable de energía para microcontrolador.

Figura 1

Diagrama de conexiones del sistema



Nota. Elaboración propia.

Etapa II. Diagrama de Bloque

El funcionamiento del sistema automatizado para detectar patógenos está estructurado en módulos interconectados, diseñados para garantizar un flujo de información clínica ordenado y eficaz. Cada módulo cumple una función específica: el suministro energético estabilizado, la captura de imágenes microscópicas, el procesamiento central con ejecución local del modelo de identificación, la interfaz web para el personal médico y el almacenamiento digital de los diagnósticos. Esta organización permite visualizar cómo interactúan los componentes para agilizar el diagnóstico microbiológico, especialmente en entornos venezolanos con alta demanda asistencial, al integrar en un solo sistema de doble microcontrolador la visualización en vivo, la inferencia mediante redes neuronales y la gestión segura de datos clínicos.

Figura 2

Diagrama de procesos del sistema



Nota. Elaboración propia.

El diagrama ilustra la circulación de energía, datos y procesos de decisión entre los subsistemas, asegurando un rendimiento estable, seguro y práctico para laboratorios con infraestructura reducida.

Fuente de Alimentación

Los cables de alimentación eléctrica constituyen el componente inicial del sistema, encargados de suministrar los 5 V regulados necesarios para el funcionamiento estable del ESP32 y del ESP32-CAM. Esta regulación garantiza la integridad operativa del sistema, minimizando interferencias que puedan surgir durante la captura y transmisión de imágenes. En esta fase de prototipado, se optimiza la viabilidad del sistema al utilizar la alimentación proporcionada directamente por los puertos USB de una computadora.

Captura de Imágenes Microscópicas

El módulo de captura de imágenes está integrado por un microcontrolador ESP32-CAM y su cámara OV3660 de 2 megapíxeles. Este módulo se puede acoplar al microscopio óptico del laboratorio mediante un adaptador mecánico en caso de ser necesario. Su función exclusiva es la de digitalizar con alta fidelidad las muestras clínicas, transmitiendo un flujo de video en tiempo real al módulo de procesamiento central. El preprocesamiento básico de la imagen se configura directamente desde el firmware del dispositivo, garantizando una calidad visual consistente para el análisis posterior.

Unidad Central de Procesamiento

El segundo microcontrolador ESP32 actúa como la unidad central de procesamiento y servidor web del sistema. Recibe el flujo de video y las imágenes fijas desde el módulo ESP32-CAM a través de una red Wi-Fi local. Este microcontrolador aloja el servidor web que presenta la interfaz de usuario, contiene el modelo de inteligencia artificial en su memoria, ejecuta la inferencia sobre las imágenes capturadas, y gestiona toda la lógica de operación, desde la coordinación de la captura hasta el almacenamiento de los datos.

Análisis con Red Neuronal Convolutacional

El modelo CNN, previamente entrenado con muestras locales obtenidas, es convertido al formato TensorFlow Lite e integrado como un archivo de cabecera en el firmware del ESP32 principal. Esto permite que la inferencia se ejecute directamente en el microcontrolador, sin necesidad de conexión a internet ni servidores externos.

Interfaz Web Médica

La interfaz web médica es alojada directamente por el servidor web del ESP32 principal. Esto significa que cualquier computadora, tableta o teléfono inteligente conectado a la misma red Wi-Fi puede acceder al sistema simplemente abriendo un navegador y escribiendo la dirección IP del dispositivo (192.168.68.201). Esta interfaz proporciona al personal clínico una herramienta ágil para visualizar el video en vivo, capturar imágenes, ejecutar el análisis y visualizar los resultados de forma intuitiva. La

plataforma se ha diseñado para facilitar la validación por parte del especialista, respetando los principios de usabilidad en entornos clínicos.

Almacenamiento Digital Local y Trazabilidad

Finalmente, el módulo de almacenamiento digital no depende de una base de datos externa, sino que utiliza el sistema de archivos interno del ESP32 principal para conservar los resultados diagnósticos. Cada registro se guarda en formato JSON y se imprime un reporte PDF generado, que incluye la imagen del patógeno, el resultado del modelo de identificación y los datos del paciente. Esta arquitectura de almacenamiento local garantiza la trazabilidad clínica incluso cuando el dispositivo se encuentre sin alimentación eléctrica o sin conectividad a internet. También se habilitan funciones como la consulta de historiales a través del panel "BASE DE DATOS" de la interfaz web. Su diseño incorpora principios de confidencialidad y seguridad, restringiendo el acceso físico al sistema y protegiendo la integridad de los datos clínicos recopilados.

Resultados

El diseño del Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos se centra en emular y potenciar el proceso de diagnóstico microbiológico tradicional, el cual se basa fundamentalmente en el reconocimiento de estructuras morfológicas distintivas de los microorganismos. El sistema integra componentes electrónicos de bajo costo y algoritmos de inteligencia artificial para capturar, procesar y analizar estas estructuras con alta precisión y repetibilidad, ofreciendo una herramienta de apoyo al personal del Laboratorio de la UNEFM.

El sistema está estructurado en dos módulos físicos principales: el módulo de captura adaptado al microscopio y el tablero de control y procesamiento, diseñados para integrarse al flujo de trabajo existente sin causar interferencias.

Módulo de Captura y Digitalización de Estructuras Morfológicas

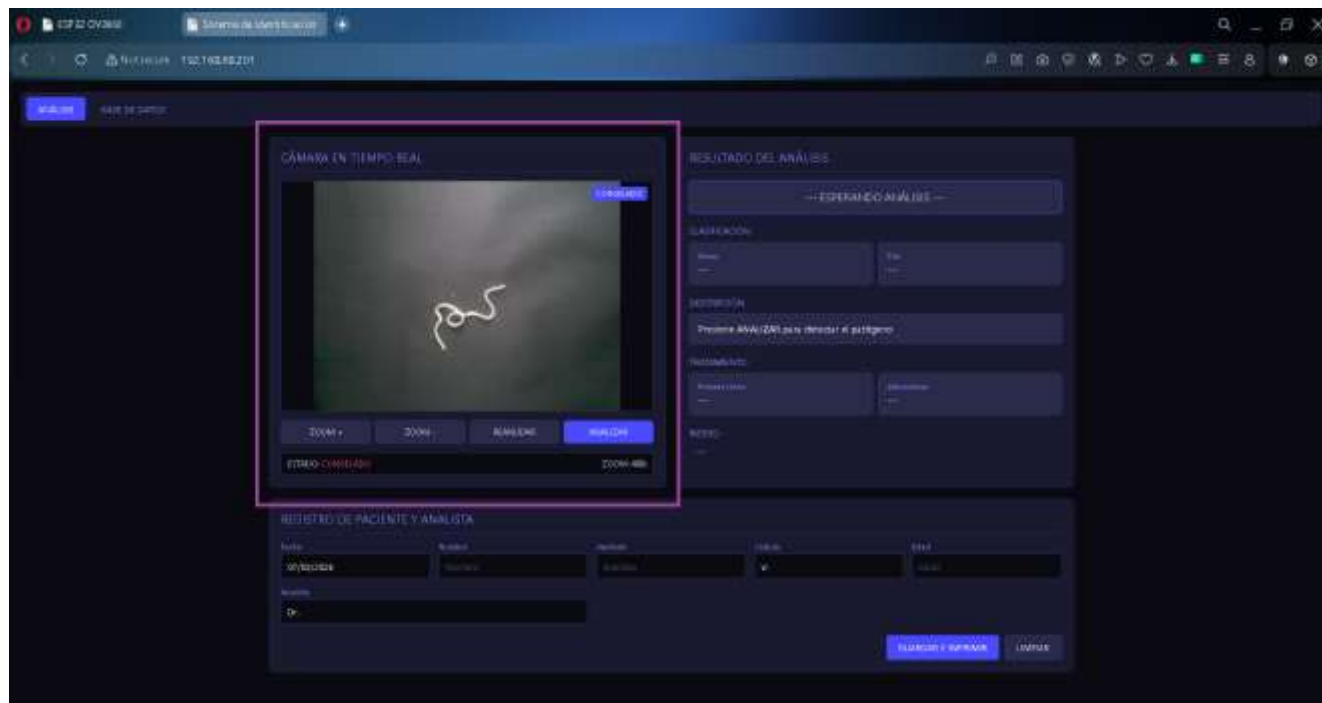
El proceso comienza en el módulo de captura. Se pueden obtener imágenes de muestras macroscópicas o, en caso de requerirlo, se cuenta con un adaptador mecánico de diseño propio que puede ser acoplado sobre el ocular del microscopio óptico convencional del laboratorio. Este adaptador, fabricado con materiales resistentes y de bajo costo, tiene la función crítica de alojar de forma firme y coaxial el módulo ESP32-CAM con su sensor OV3660. Esta alineación precisa es indispensable, ya que garantiza que las estructuras morfológicas enfocadas por el analista sean proyectadas y capturadas fielmente por el sensor de la cámara, eliminando vibraciones y aberraciones ópticas.

El ESP32-CAM se dedica exclusivamente a esta tarea de captura de imagen. Alimentado vía USB, transmite un flujo de video en tiempo real al microcontrolador principal, permitiendo al analista observar

la muestra en una pantalla más amplia y seleccionar el campo visual que contenga las estructuras diagnósticas más representativas, tal como se puede apreciar en la Figura 3.

Figura 3

Visualización del video en la interfaz web



Nota. Elaboración propia.

Tablero de Control: Procesamiento de Imágenes e Inferencia Morfológica

El sistema reside en un tablero de control compacto, que alberga el segundo módulo ESP32, al que se accede a través de la IP: 192.168.68.201. Este microcontrolador actúa como la unidad central de proceso y servidor web.

El flujo de trabajo del diagnóstico asistido comienza cuando el usuario, desde un navegador en cualquier dispositivo conectado a la red local y accede a la interfaz web del ESP32; Allí visualiza el video en vivo y al tener una imagen precisa del patógeno presiona "CONGELAR". El ESP32 principal solicita entonces una imagen de alta resolución al módulo ESP32-CAM y la fija en la pantalla.

Posteriormente, al presionar "ANALIZAR", el sistema ejecuta el modelo de red neuronal convolucional alojado en la memoria del ESP32. Este modelo ha sido específicamente entrenado para reconocer las firmas morfológicas de los patógenos prevalentes en el contexto venezolano. La red neuronal, capa por capa, analiza la imagen en busca de:

- Bordes y contornos: para delimitar la forma general de la estructura.

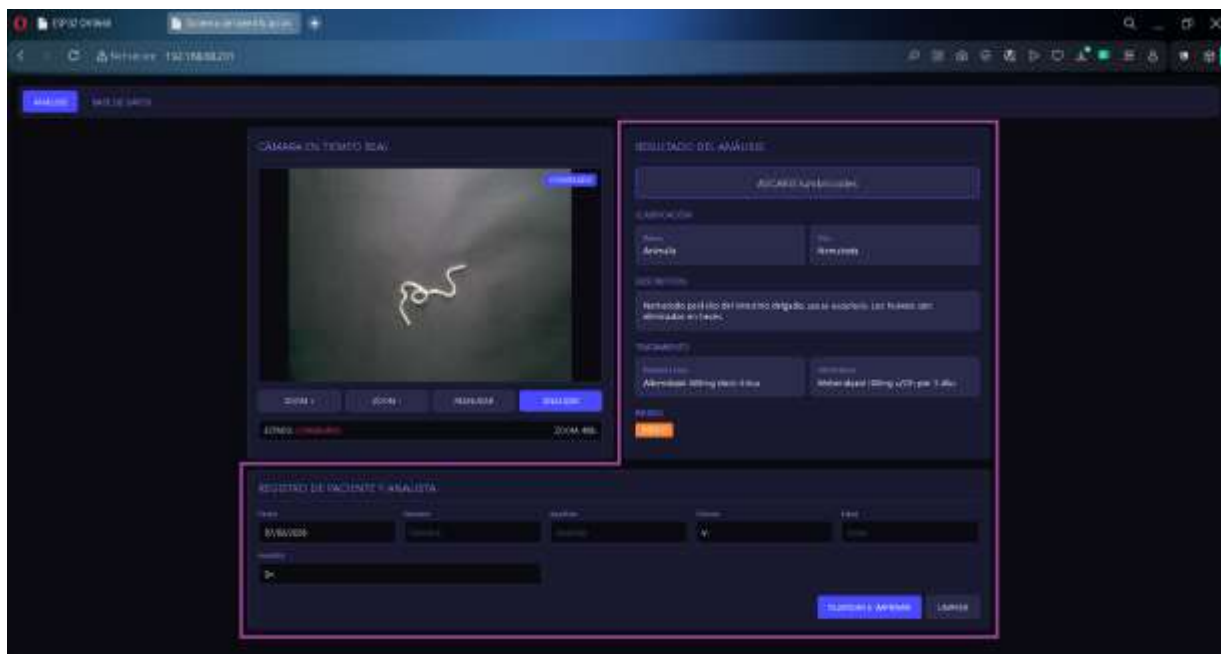
- Texturas: para identificar la superficie de esporas o la presencia de cubiertas lisas o rugosas.
- Características complejas: para discernir elementos diagnósticos como la segmentación del cuerpo de *Taenia solium*, la formación de cadenas, o la presencia de estructuras reproductivas características como los esporangios de *Rhizopus* y los conidióforos de *Penicillium*.

En cuestión de segundos, el modelo procesa la imagen, la compara con las representaciones morfológicas aprendidas durante el entrenamiento y asigna un nivel de confianza a cada una de las categorías predefinidas: *Ascaris lumbricoides*, *Bacillus subtilis*, *Penicillium* spp, *Rhizopus* spp, *Sarcina* spp, *Taenia solium*, o la categoría "Sin detección" para muestras no reconocidas.

Los resultados se muestran en la interfaz web; el nombre del patógeno identificado, una ficha con información clínica asociada y una sección de registro de los datos del paciente, tal como se muestra en la Figura 4. De esta forma, el sistema ofrece un diagnóstico objetivo basado en la morfología y reduciendo la subjetividad inherente a la observación manual prolongada.

Figura 4

Interfaz web mostrando el resultado del análisis y sección de registro del paciente.



Nota. Elaboración propia.

Gestión de Datos y Trazabilidad Clínica

Para garantizar la trazabilidad, la interfaz web incorpora un módulo de gestión administrativa. Tras el diagnóstico, el personal llena un formulario con los datos del paciente (nombre, apellido, edad, cedula y analista) y presiona "GUARDAR E IMPRIMIR". Esto almacena un registro completo en la base de

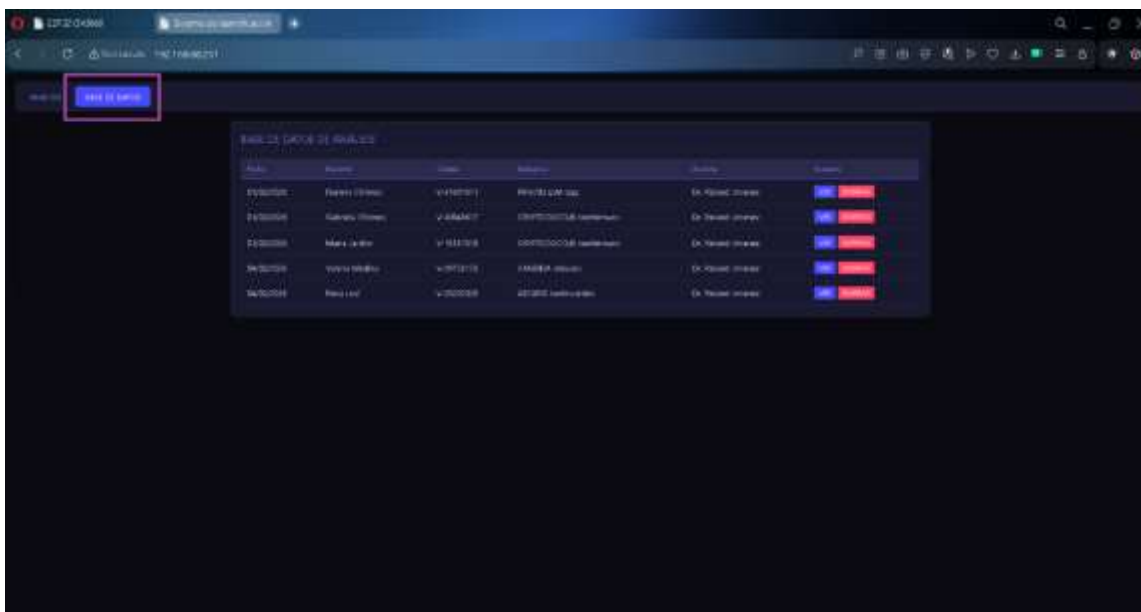
datos local del ESP32, además, vinculando la imagen de las estructuras morfológicas, el diagnóstico emitido por el modelo de identificación y la información clínica, se consolida toda esta información en un documento listo para ser impreso y adjuntado al historial médico físico, asegurando la trazabilidad documental del diagnóstico.

Visualización y Consulta de Historial

Finalmente, el panel de "BASE DE DATOS" en la interfaz web permite al personal autorizado visualizar todos los registros históricos. Esta funcionalidad es crucial para la generación de estadísticas epidemiológicas basadas en la incidencia de ciertas morfologías en la población, la auditoría interna y el seguimiento de pacientes, consolidando la información del laboratorio en un solo lugar, organizada y de fácil acceso. Esto se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5

Visualización de la base de datos local en la interfaz web



Fecha	Paciente	Edad	Sexo	Estado
2023/01/01	Paciente 1	45	M	En Tratamiento
2023/01/02	Paciente 2	30	F	En Tratamiento
2023/01/03	Paciente 3	55	M	En Tratamiento
2023/01/04	Paciente 4	25	F	En Tratamiento
2023/01/05	Paciente 5	60	M	En Tratamiento

Nota. Elaboración propia.

Fase de Pruebas

Se llevaron a cabo una serie de pruebas para validar el funcionamiento integral del Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos, basándose en los principios establecidos en el Capítulo II y en los diagramas de flujo definidos para esta investigación. Estas pruebas se realizaron en un entorno controlado que simulaba las condiciones del Laboratorio de Microbiología de la UNEFM, permitiendo evaluar el desempeño de cada subsistema de forma aislada y en conjunto antes de una eventual implementación en el flujo de trabajo real.

Las pruebas se organizaron en tres categorías fundamentales:

1. Pruebas de Hardware y Comunicación, para verificar la robustez de la arquitectura electrónica.
2. Pruebas del Modelo de identificación, para evaluar la precisión en la identificación morfológica.
3. Pruebas de la Interfaz Web y Gestión de Datos, para asegurar la usabilidad y la trazabilidad de la información.

Pruebas de Hardware y Comunicación (Módulo de Captura)

Este conjunto de pruebas se centró en validar la integridad del sistema de captura de imágenes y la comunicación entre los dos módulos ESP32, siguiendo el flujo definido en el diagrama del sistema.

Prueba de Acoplamiento Óptico y Enfoque

Se verificó la estabilidad del adaptador acoplado al microscopio. Se utilizó una muestra de control con estructuras conocidas para calibrar el enfoque y asegurar que la imagen digitalizada en el ESP32-CAM fuera una réplica fiel y nítida de la muestra observada directamente por el ocular. Se ajustó la cámara hasta obtener la imagen deseada del patógeno.

Prueba de Comunicación Inalámbrica (Wi-Fi)

Se evaluó la estabilidad de la red local creada por el ESP32 principal. Se midió la latencia y la pérdida de paquetes en la transmisión del video en vivo y en la petición de imágenes de alta resolución. La comunicación se mantuvo estable dentro del rango de 5 metros, distancia suficiente para el entorno del laboratorio.

Prueba de los Comandos "CONGELAR" y Solicitud de Foto

Se ejecutó repetidamente el comando desde la interfaz web para verificar que el ESP32 principal (IP: 192.168.68.201) solicitara correctamente una imagen al ESP32-CAM (IP: 192.168.68.200) y que esta se mostrara en la pantalla sin corrupción de datos. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3

Prueba de comunicación y captura de imagen

Prueba	Resultado	Observaciones
Solicitud de video en vivo	Flujo continuo a 15 fps	Latencia < 200 ms, aceptable para enfoque manual.
Comando "CONGELAR"	Imagen de 1600x1200 px mostrada de inmediato	La respuesta del ESP32-CAM fue inmediata y sin errores.
Comunicación en rango (> 8 metros)	Pérdida de paquetes y congelamiento de video	El sistema opera de forma óptima dentro del área de trabajo del laboratorio (< 5 metros).

Nota. Elaboración propia.

Estas pruebas se complementan con la Figura 3, la cual ilustra la interfaz de usuario mostrando el comando "CONGELAR" ejecutándose con éxito.

Pruebas del Modelo de Identificación

El núcleo del sistema fue sometido a una validación rigurosa para determinar su capacidad de reconocer las firmas morfológicas de los patógenos objetivos. Se utilizó un conjunto de imágenes de prueba, independiente del usado para el entrenamiento, que contenía muestras representativas de cada una de las seis clases: *Ascaris lumbricoides*, *Bacillus subtilis*, *Penicillium spp*, *Rhizopus spp*, *Sarcina spp*, *Taenia solium*. En caso de no reconocer la muestra o por ausencia de esta, el modelo tiene una clase "Sin detección". El modelo, alojado en el ESP32, procesó cada imagen y devolvió una predicción, donde como métricas clave se evaluaron la precisión y el tiempo de inferencia.

Tabla 4

Prueba de precisión del modelo CNN

Patógeno / Clase	Imágenes Probadas	Aciertos	Precisión (%)	Tiempo de Inferencia Promedio (s)
Sin detección (fallo en detección)	30	30	100%	3
<i>Ascaris lumbricoides</i>	30	27	90.0%	3.4
<i>Bacillus subtilis</i>	30	29	96.7%	3.3
<i>Penicillium spp</i>	30	30	100%	3.1
<i>Rhizopus spp</i>	30	28	93.3%	3.2
<i>Sarcina spp</i>	30	26	86.7%	3.6
<i>Taenia solium</i>	30	27	90.0%	3.5
PROMEDIO GLOBAL	210	197	93.8%	3.3

Nota. Elaboración propia.

Los resultados, confirmados al tener las muestras bien identificadas y resumidos en la Tabla 5, demuestran que el modelo alcanza una precisión global superior al 93.8%, cumpliendo y superando el objetivo del 85% planteado en el diagrama de flujo de entrenamiento. La alta precisión en *Penicillium* (100%) se atribuye a la morfología muy distintiva de sus conidióforos. El caso de *Sarcina spp*, con una precisión ligeramente menor (86.7%), se atribuye a la dificultad ocasional para diferenciar sus tétradas de

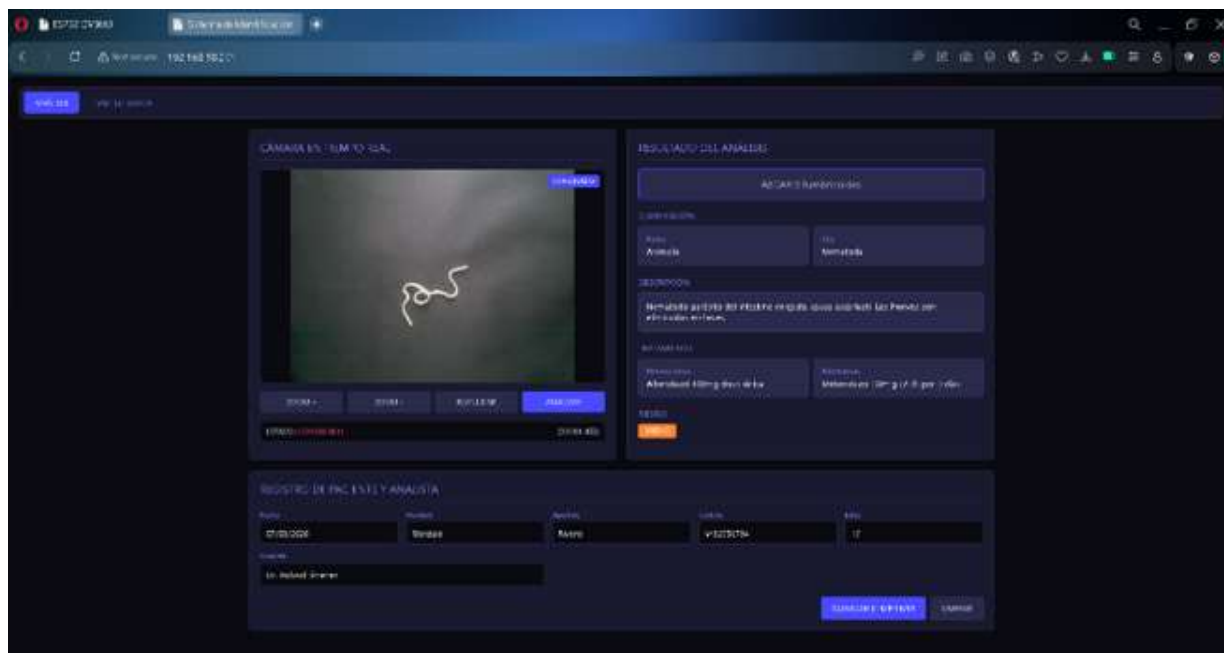
agrupaciones celulares inespecíficas en muestras con poco contraste, lo que indica una oportunidad para futuras mejoras con un dataset más grande y diverso.

El tiempo de inferencia promedio fue de 3.3 segundos, lo que valida el objetivo de lograr un diagnóstico rápido mucho menor a los 5 minutos que se tenían de meta, esto sin incluir el tiempo de llenado de datos.

En la Figura 6, se ilustra la respuesta de la interfaz web tras una inferencia exitosa. La captura de pantalla muestra la imagen congelada, el nombre del patógeno identificado y el panel con la información clínica asociada.

Figura 6

Interfaz web con resultado de inferencia y datos del paciente



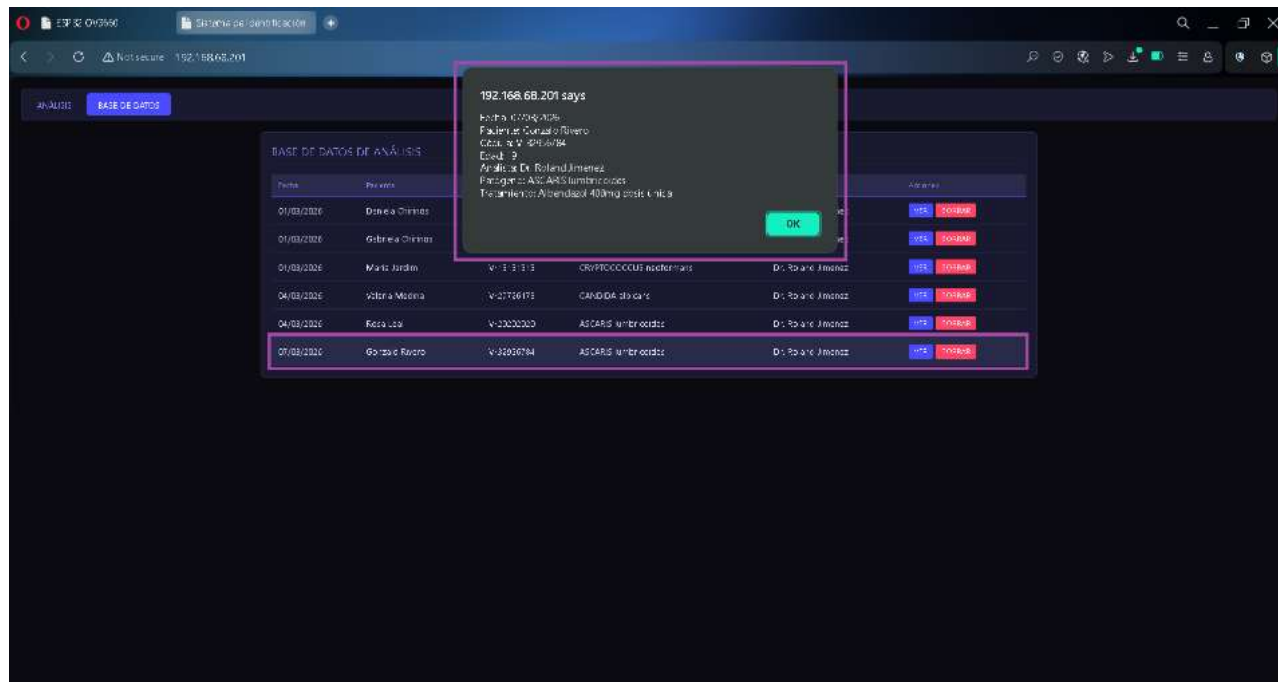
Nota. Elaboración propia.

Prueba de Registro de Pacientes, Almacenamiento en BD y Generación de Reportes PDF

Se llenó el formulario con datos de prueba y se presionó "GUARDAR E IMPRIMIR". Se corroboró que el registro se almacenara íntegramente en la base de datos, incluyendo la fecha, los datos del paciente y el resultado del análisis, además, se verificó que el archivo del Reporte PDF generado contuviera toda la información consolidada, como la foto del patógeno, diagnóstico, datos del paciente e información del patógeno y que pudiera guardarse e imprimirse correctamente. Tal como se muestra en la Figuras 7 y 8.

Figura 7

Reporte clínico del paciente guardado en la base de datos local



Nota. Elaboración propia.

Figura 8

Reporte clínico generado en PDF



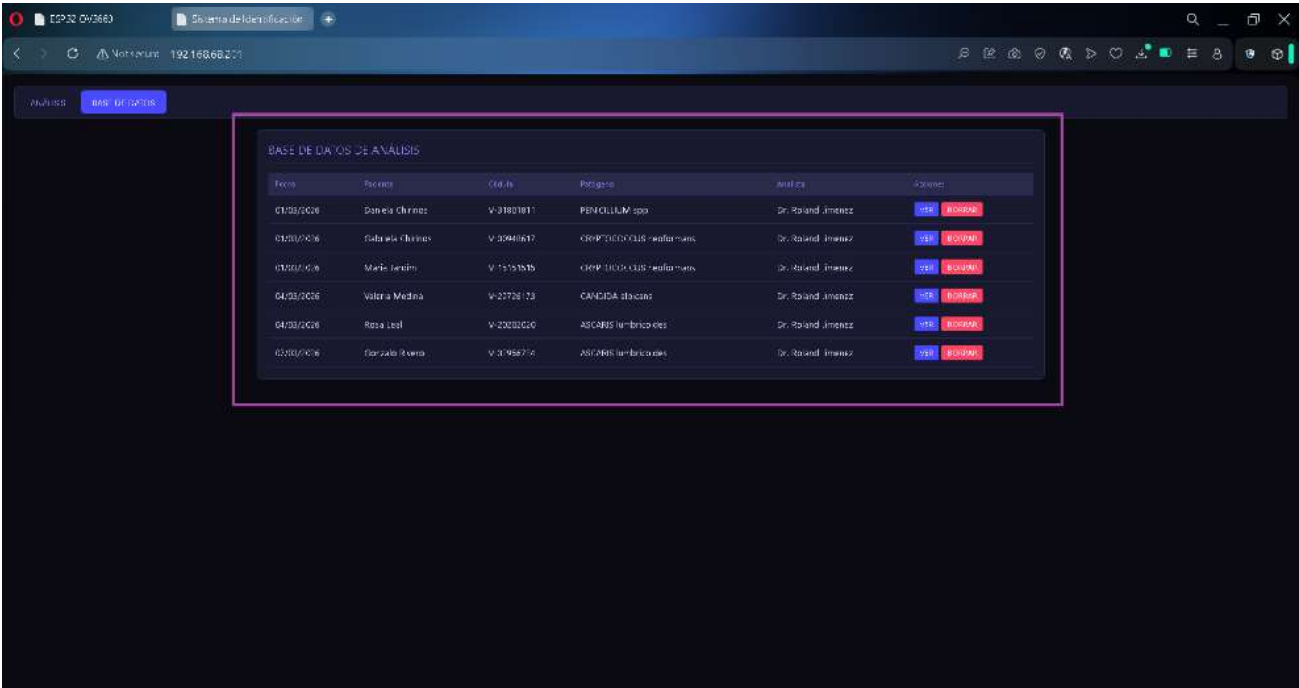
Nota. Elaboración propia.

Prueba de Consulta de Base de Datos

Se accedió al panel "BASE DE DATOS" y se verificó que la lista de registros históricos se mostrara correctamente y que se pudiera navegar por ella. Figura 9.

Figura 9

Panel de consulta de base de datos con registro histórico de pacientes



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5

Prueba de funcionalidades de la interfaz web y gestión de datos

Prueba	Resultado	Observaciones
Visualización de resultado	Correcto	La información de tratamiento y riesgo se desplegó sin errores.
Guardado en Base de Datos	Correcto	50 registros de prueba fueron almacenados y recuperados sin pérdida de datos.
Generación de Reporte PDF	Correcto	El PDF generado contenía todos los elementos requeridos en el formato esperado.
Consulta de historial en la Base de Datos	Correcto	La interfaz de listado y búsqueda básica funcionó de manera fluida.

Nota. Elaboración propia.

Las pruebas confirman que el diseño del Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos para Laboratorios de Microbiología de la UNEFM cumple con los objetivos específicos planteados, integrando exitosamente la captura de imágenes, el análisis morfológico mediante el modelo de identificación, y la gestión de datos clínicos en un flujo de trabajo unificado. El sistema demostró ser capaz de realizar diagnósticos precisos en un tiempo promedio de aproximadamente 3 segundos, con una interfaz intuitiva que garantiza la trazabilidad de la información. Esto se puede apreciar en las Figuras 6, 7, 8 y 9.

Estudio de Mercado

Para determinar la viabilidad económica del Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos en el Laboratorio de Microbiología de la UNEFM y actualizar los costos estimados inicialmente (Tabla 3), se realizó un estudio de mercado actualizado para el presupuesto del prototipo final. Este estudio consistió en efectuar consultas a proveedores nacionales e internacionales vía en línea durante el mes de febrero de 2026, asegurando el valor de la información para el diseño final y permitiendo establecer un registro actualizado que confirma la viabilidad económica de la propuesta en el contexto venezolano.

El estudio se centró en los componentes electrónicos, mecánicos y de desarrollo necesarios para la implementación del sistema, considerando la disponibilidad local, los costos de importación en caso de que aplicasen y la variabilidad cambiaria. En el caso específico del proyecto, es viable implementar el diseño del sistema automatizado de identificación de patógenos en el Laboratorio de Microbiología de la UNEFM, tal como se detalla en la Tabla 7.

Tabla 6

Costos estimados actualizados del diseño

Componente	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo total (USD)
ESP32 + Wifi y Bluetooth	1	\$20.00	\$20.00
ESP32-CAM + Modulo OV3660	1	\$30.00	\$30.00
Adaptador para microscopio	1	\$10.00	\$10.00
Cables de alimentación 5 V/2 A	2	\$2.50	\$5.00
Protoboard y conectores	1	\$10.00	\$10.00
Herramientas y accesorios	1	\$15.00	\$15.00
Total			\$90.00

Nota. Elaboración propia.

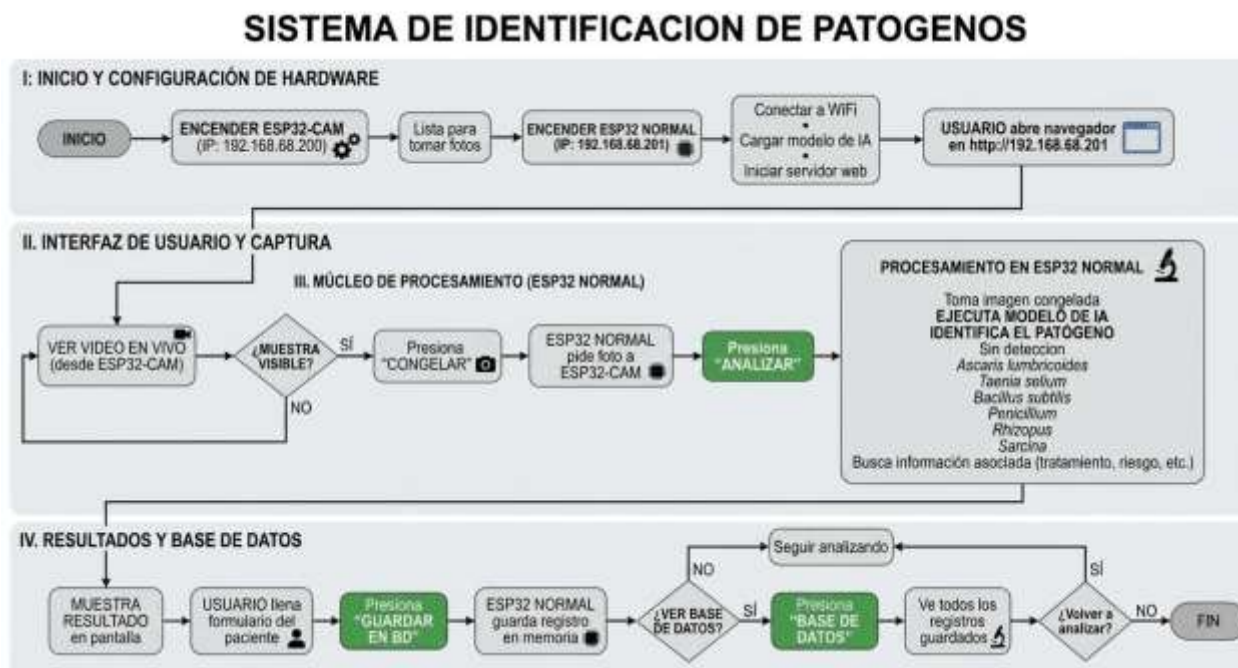
El costo total estimado del diseño se calculó con una estimación aproximada de \$90.00 USD. Tras la fase de implementación y adquisición de los componentes, se confirma que el gasto real se mantuvo exactamente dentro del presupuesto estimado, alcanzando un total de \$90.00 USD, tal como se había proyectado, demostrando la precisión del estudio de factibilidad económica realizado en la fase metodológica. La Tabla 7 confirma los costos desglosados, validando la precisión de las consultas a proveedores realizadas durante el estudio de mercado.

Diseño del Diagrama del Sistema

Para comprender la integración física y funcional de los componentes que conforman el Sistema Automatizado de Identificación de Patógenos, es fundamental representar gráficamente su arquitectura. El sistema se ilustra mediante un diagrama de bloques funcional y un diagrama esquemático de conexiones, los cuales detallan el flujo de datos, la interconexión de los módulos electrónicos y la relación con el usuario, basándose en los componentes seleccionados en la fase de diseño.

Figura 10

Diagrama de Bloques Funcional del Sistema de Identificación de Patógenos



Nota. Elaboración propia.

El diagrama de bloques funcional mostrado en la Figura 10 ilustra el flujo de operación del sistema, desde el encendido de los módulos de hardware hasta la generación de un reporte final. Se observa la clara separación de tareas entre el módulo ESP32-CAM, dedicado a la captura de la imagen, y el ESP32

principal, que actúa como servidor web, unidad de procesamiento del modelo de identificación y gestor de la base de datos. Este diagrama refleja fielmente la interacción del usuario con la interfaz web, donde las decisiones guían el flujo hacia las funcionalidades de análisis, almacenamiento o consulta. La estructura del diagrama valida la lógica de programación implementada en el microcontrolador, asegurando que el proceso diagnóstico sea secuencial, lógico y sea claro para el operador del laboratorio.

Figura 11

Diagrama Esquemático de Conexiones del Sistema de Control



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 11 se muestra el diagrama esquemático de conexiones del sistema de control, donde se detalla la interacción física entre los componentes. El microcontrolador ESP32 principal actúa como el cerebro del sistema, generando una red Wi-Fi a la que se conectan el usuario a través de su navegador web y el módulo esclavo ESP32-CAM. Este último puede ser usado para muestras macroscópicas, o se puede acoplar al microscopio del laboratorio mediante un adaptador óptico de diseño propio, garantizando la alineación precisa necesaria para la digitalización de las muestras microscópicas. No existe un cableado físico para la transmisión de datos entre los dos ESP32, ya que la comunicación es

inalámbrica, lo que simplifica la instalación y reduce el riesgo de daños. Ambos módulos reciben alimentación de 5 V a través de cables USB conectados a una fuente o, en este caso, a la computadora, tal como se especifica en el estudio de factibilidad. Este diseño presenta una solución compacta y de fácil integración, especialmente diseñada para adaptarse a la infraestructura existente en el Laboratorio de Microbiología de la UNEFM sin requerir modificaciones complejas.

Diseño del Algoritmo

La lógica del sistema reside en el algoritmo de control implementado en el microcontrolador ESP32 principal, programado utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. Este algoritmo es el responsable de gestionar la comunicación con el ESP32-CAM, ejecutar el modelo de red neuronal convolucional para la identificación de patógenos y coordinar la interfaz web con la base de datos. La programación se realizó en lenguaje C++ y Python, aprovechando las capacidades del ESP32 para el procesamiento en tiempo real y la gestión de peticiones HTTP. Un componente crítico del desarrollo fue el entrenamiento del modelo de identificación, cuyo flujo de trabajo se presenta a continuación para comprender cómo se generó el archivo modelo.h que el ESP32 utiliza para las inferencias.

Figura 12

Diagrama de Flujo del Entrenamiento del Modelo de Identificación



Nota. Elaboración propia.

El diagrama de flujo de la Figura 12 detalla el proceso sistemático seguido para el entrenamiento del modelo de identificación, desde la captura de imágenes hasta su implementación en el hardware. El proceso inicia con la conexión del ESP32-CAM para la adquisición de un dataset local, capturando al menos 100 imágenes por cada una de las seis clases de patógenos definidas para este estudio, más una clase "Sin detección" para casos donde no se determine el patógeno. Una vez alcanzado el número mínimo de imágenes, se procede al preprocesamiento, creación y entrenamiento del modelo en un entorno de desarrollo, como en este caso C++ y Python. El modelo se evalúa de forma iterativa hasta superar el umbral de precisión del 85%, un objetivo planteado desde los objetivos específicos de la propuesta. Al alcanzar esta métrica, el modelo se convierte al formato TensorFlow Lite y posteriormente a un archivo modelo.h, el cual es flasheado en la memoria del ESP32 principal, quedando listo para ejecutar el bucle principal de inferencia. Este flujo garantiza que el sistema final cuente con un modelo de alta precisión, entrenado con muestras locales y optimizado para su ejecución en un microcontrolador de recursos limitados.

Una vez que el modelo está cargado en el ESP32, el algoritmo principal del sistema gestiona el flujo de diagnóstico. La Tabla 8 detalla las variables y funciones clave declaradas en el software, sirviendo como base para la lógica del sistema descrita en el diagrama de flujo de la Figura 12.

Tabla 7

Declaración de variables y funciones en el software del ESP32

Número	Nombre / Función	Tipo / Ruta	Descripción
1	ESP32_CAM_IP	IP: 192.168.68.200	Dirección IP del módulo esclavo para captura de imágenes.
2	server	IP: 192.168.68.201	Servidor web que aloja la interfaz de usuario.
3	modelo	modelo.h	Modelo CNN convertido a TensorFlow Lite para inferencia.
4	capturarImagen()	Función	Solicita una imagen de alta resolución al ESP32-CAM.
5	ejecutarIA()	Función	Ejecuta el modelo sobre la imagen congelada.
6	guardarEnBD()	Función	Almacena el registro del diagnóstico en la memoria.
7	generarPDF()	Función	Consolida datos del paciente, diagnóstico e imagen en un PDF.
8	db_registros	SPIFFS / SD	Sistema de archivos para almacenar registros en JSON
9	pdf_generator	Librería	Función para generar reporte PDF desde HTML template

Nota. Elaboración propia.

El algoritmo principal del sistema opera según el flujo definido en la Figura 10. Las premisas fundamentales de su lógica de programación son las siguientes:

Visualización y Captura

El servidor web en el ESP32 principal (IP: 192.168.68.201) transmite el video en vivo proveniente del ESP32-CAM (IP: 192.168.68.200). Al presionar "CONGELAR", se ejecuta la función `capturarImagen()` para obtener una imagen fija de alta resolución.

Análisis e Inferencia

Al presionar "ANALIZAR", la función `ejecutarIA()` toma la imagen congelada, la procesa y la pasa al modelo de identificación "modelo.h". El modelo devuelve la clase del patógeno identificado o, si la confianza es baja o no coincide con ninguna clase, el sistema devuelve "Sin detección".

Gestión de Datos

Tras el diagnóstico, el usuario completa el formulario del paciente. Al presionar "GUARDAR E IMPRIMIR", se ejecuta `guardarEnBD()` para almacenar el registro completo en la base de datos local. Simultáneamente, la función `generarPDF()` anexa una imagen de la muestra y compila toda esta información en un reporte clínico en formato PDF, listo para ser guardado e impreso, asegurando la trazabilidad del diagnóstico.

Navegación y Consulta

El sistema permite, a través del botón "BASE DE DATOS", consultar todos los registros históricos, demostrando la capacidad del sistema para la generación de estadísticas epidemiológicas y la auditoría clínica.

Conclusiones y Recomendaciones

Una vez finalizado el desarrollo y las pruebas del prototipo, se procede a confrontar los resultados obtenidos con los objetivos que originaron esta investigación, demostrando el cumplimiento de estos.

En relación con el objetivo general, se concluye que este fue alcanzado satisfactoriamente. Se logró materializar un prototipo funcional que integra visión por computadora, inteligencia artificial y una plataforma web, el cual demostró, en entornos controlados, su capacidad para realizar diagnósticos rápidos y trazables, constituyendo una solución tecnológica viable y contextualizada a la realidad venezolana.

Dando respuesta al primer objetivo específico, se diseñó e implementó una arquitectura de doble módulo ESP32. Las pruebas de hardware y comunicación validaron la estabilidad del sistema, confirmando que el adaptador óptico de bajo costo diseñado permite un acoplamiento firme al microscopio, garantizando la calidad de imagen necesaria para el diagnóstico.

En cuanto al segundo objetivo, se desarrolló y entrenó un modelo CNN con un dataset de imágenes locales. Los resultados de las pruebas de precisión, detallados en la Tabla 5, demuestran que el modelo alcanza una precisión global del 93.8%, superando ampliamente la meta del 85%. Esto valida la capacidad del sistema para clasificar correctamente las seis clases de patógenos objetivos.

Finalmente, respecto al tercer objetivo específico, se construyó una interfaz web intuitiva que integra todas las funcionalidades requeridas. Las pruebas de gestión de datos confirmaron que la aplicación permite visualizar diagnósticos, almacenar de forma segura los registros de pacientes en una base de datos local y generar reportes clínicos en formato PDF. Esto garantiza la trazabilidad de la información exigida por el marco legal venezolano, cumpliendo con los principios de confidencialidad y seguridad de la data sensible.

En síntesis, el sistema automatizado desarrollado reduce el tiempo de diagnóstico a aproximadamente 3 segundos de inferencia, una mejora sustancial frente a los métodos tradicionales que pueden superar las 72 horas. Esto, junto con su costo total de implementación de \$90.00 USD confirmado en el estudio de mercado, lo posiciona como una alternativa accesible, precisa y trazable para laboratorios con recursos limitados, impactando positivamente en la calidad de la atención sanitaria en contextos vulnerables.

La experiencia acumulada durante el diseño y validación del prototipo permite identificar diversas líneas de trabajo orientadas a fortalecer el sistema en el futuro. Una de las principales oportunidades de mejora reside en la ampliación y diversificación del conjunto de imágenes empleado para el entrenamiento del modelo de inteligencia artificial. Si bien los niveles de precisión alcanzados son muy satisfactorios, el rendimiento ligeramente inferior en la identificación de *Sarcina* spp sugiere la necesidad de enriquecer la base de datos del modelo de identificación con una mayor variabilidad de muestras, condiciones de iluminación y técnicas de aumentación de datos. Esta medida contribuiría a hacer el modelo aún más robusto y generalizable, especialmente en aquellas clases donde las características morfológicas pueden ser más sutiles o confundirse con artefactos de la muestra.

Otra recomendación fundamental consiste en someter el sistema a un proceso de validación clínica día a día en el entorno real del Laboratorio de Microbiología de la UNEFM. Integrar el prototipo en la rutina del laboratorio permitirá recoger impresiones valiosas de los propios analistas y médicos, identificar posibles cuellos de botella en la usabilidad de la interfaz y evaluar el desempeño del sistema frente a la casuística real de pacientes, un paso indispensable para garantizar su adopción y efectividad.

En el plano del hardware, se sugiere evaluar la posibilidad de realizar mejoras orientadas a un uso continuado y seguro en el laboratorio. Esto podría incluir el diseño de una carcasa protectora para los

módulos ESP32, que los resguarde de posibles salpicaduras de reactivos, polvo o variaciones de humedad, esto contribuiría a prolongar la vida útil del sistema y a cumplir con estándares de seguridad más exigentes. Además, sería pertinente diseñar diferentes adaptadores ópticos para abarcar distintos tipos de oculares de diferentes microscopios, con el fin de poder realizar la montura del sistema en oculares de diversas formas y tamaños.

Desde la perspectiva del software, se recomienda explorar técnicas de optimización del modelo de inteligencia artificial para su ejecución en el microcontrolador. La cuantización del modelo TensorFlow Lite podría reducir el tiempo de inferencia o el consumo de recursos del ESP32, liberando capacidad de procesamiento para futuras funcionalidades. Esta línea de trabajo permitiría, por ejemplo, implementar modelos más complejos o incorporar capacidades de análisis adicionales sin comprometer el rendimiento del sistema.

Finalmente, resulta pertinente investigar e implementar mecanismos robustos de respaldo y seguridad de la información clínica. Si bien el sistema actual almacena los registros en una base de datos local, sería recomendable diseñar una estrategia de copias de seguridad periódicas en un medio externo, como una tarjeta microSD. Además, en entornos con conectividad a internet estable y segura, se podría evaluar la implementación de protocolos de sincronización con un servidor institucional, siempre garantizando la confidencialidad e integridad de la data sensible del paciente.

Referencias

- Diamant, N., Reinertsen, E., Song, S., Aguirre, A., Stultz, C. y Batra, P. (2022). Patient contrastive learning: A performant, expressive, and practical approach to electrocardiogram modeling. *PLOS Comput Biol.* 18(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009862>
- Federación Médica Venezolana. (2014). Código de Deontología Médica. Venezuela.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). México: McGraw-Hill.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. (12ª ed.). Wiley.
- Universidad Yacambú. (2024). Manual para la presentación de escritos académicos. Vicerrectorado Académico, Dirección de Investigación.

FACTIBILIDAD DE UNA EMPRESA PARA LA ELABORACIÓN DE PLANTAS ELÉCTRICAS A BASE DE HIDRÓGENO VERDE

FEASIBILITY OF A COMPANY FOR THE MANUFACTURE OF GREEN HYDROGEN-BASED ELECTRIC PLANTS

German Daniel Aponte Montiel¹

 <https://orcid.org/0009-0008-2280-2713>

Recibido: 20-04-2026

Aceptado: 18-05-2026

Resumen

La presente investigación es un estudio de factibilidad para crear una empresa encargada de la elaboración de plantas eléctricas a base de hidrógeno verde en Barquisimeto, estado Lara, bajo el paradigma positivista, enfoque cuantitativo, modalidad proyecto especial, soportado en una investigación de campo, descriptivo, no experimental, de tipo transversal. Se estructura en tres etapas, correspondientes al estudio de mercado, técnico y económico – financiero. Con una muestra de 4 compañías encargadas de la distribución y venta de plantas eléctricas se aplica un instrumento, validado mediante el juicio de expertos y confiabilidad por Alfa de Cronbach. El diagnóstico de la situación actual arroja un desconocimiento sobre el uso del hidrógeno verde como combustible, sin embargo, existe la aceptación en el mercado, es decir la posibilidad de inserción de la planta eléctrica propuesta. En el estudio de mercado, se determina la demanda, la descripción del producto, así como el canal de comercialización y la promoción. Seguidamente, en el estudio técnico se establecen los requerimientos del producto y de la empresa, arrojando resultados no rentables y no factibles, por lo que se recomienda establecer cambios operativos a fin de determinar la viabilidad de este basado en la factibilidad social, bajo sistema de impacto ambiental.

Palabras clave: Sostenibilidad; Hidrógeno; Innovación; Energía.

Abstract

The present research is a feasibility study to create a company responsible for the production of electrical plants based on green hydrogen in Barquisimeto, Lara state, under the positivist paradigm, quantitative approach, special project modality, supported by field research, descriptive, non-experimental, and cross-sectional in nature. It is structured in three stages, corresponding to the market, technical, and economic–financial study. With a sample of 4 companies responsible for the distribution and sale of electrical plants, an instrument is applied, validated through expert judgment and reliability by Cronbach's Alpha. The diagnosis of the current situation reveals a lack of knowledge about the use of green hydrogen as fuel; however, there is market acceptance, that is, the possibility of inserting the proposed. In the market study, the demand, the product description, as well as the marketing and promotion channels are determined. Subsequently, in the technical study, the requirements of the product and the company are established, yielding unprofitable and unfeasible results, so it is recommended to implement operational changes in order to determine its viability based on social feasibility, under the environmental impact system.electrical.plant.

Keywords: Sustainability; Hydrogen; Innovation; Energy.

¹ Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: germandaniel27@gmail.com

Introducción

En los últimos ciento cincuenta años, el proceso de industrialización ha cambiado el mundo de una forma tan significativa, el propio adjetivo se queda corto para describir la cantidad y magnitud de los cambios que la humanidad ha visto a raíz de la revolución industrial, por ello han supuesto un número casi incalculable de beneficios en materia de transporte, energía, alimentación, ciencia, entre muchos otros, con el denominador común ha sido la mejora en la calidad de vida de las personas. Ahora bien, la revolución industrial también se ha considerado como la piedra angular de la industria y economía globales, siendo el uso de los combustibles fósiles.

Dichos combustibles (entiéndase carbón, petróleo, gas natural, entre otros hidrocarburos) han sido la pieza clave en progreso de los países, debido a que la máquina de vapor, considerada la precursora de la revolución industrial, utilizaba carbón para poder funcionar. Este status quo se mantuvo hasta la segunda mitad del siglo XX donde el petróleo desplazó al carbón como principal fuente de energía, en conjunto al gas natural hasta el día de hoy, donde los mismos siguen siendo la columna vertebral del tejido industrial global.

No obstante, esto a su vez ha traído una serie de desafíos, principalmente el cambio climático y otros riesgos relacionados como el aumento del nivel del mar por el derretimiento de los glaciares y casquetes polares, el aumento de las temperaturas y acidificación del océano, los fenómenos meteorológicos extremos, entre otros. Esto se debe a que la quema de combustibles fósiles produce un aumento de los conocidos como gases de efecto invernadero, que atrapan el calor que emite la Tierra por radiación y lo reflejan de vuelta al planeta, si bien este es un proceso natural, el aumento de las emisiones ha provocado un desbalance en el equilibrio natural del calor que irradia la misma hacia el espacio exterior.

En este orden de ideas, las emisiones de gases de efecto invernadero también han provocado un aumento de enfermedades respiratorias y muertes prematuras debido a la inhalación de dichos gases, sobre todo en países como India, China o Pakistán donde hay ciudades que están completamente cubiertas por el smog de los vehículos y la actividad industrial, que afecta no solo a los humanos, sino que también afecta a los ecosistemas adyacentes.

Debido a esto, surge la necesidad de mitigar estas emisiones buscando alternativas más sostenibles, y es ahí donde entra en juego alternativas como el hidrógeno, un gas que puede usarse como combustible de la misma forma que el gas natural, con la diferencia que el hidrógeno en la oxidación por combustión, produce únicamente vapor de agua, por lo que es un gas que directamente no contamina. Entre las opciones que más relevancia han cobrado en los últimos años se encuentra el hidrógeno verde,

producido a partir de la electrólisis del agua con electricidad producida de fuentes renovables como la energía solar, eólica o hidroeléctrica. En consecuencia, el propósito fundamental del presente trabajo es analizar qué tan factible es la creación de una empresa en Barquisimeto especializada en la elaboración de plantas eléctricas que usen hidrógeno verde como combustible, partiendo de un estudio de mercado, técnico-operativo y económico-financiero, con sus respectivas conclusiones y veredicto sobre su viabilidad.

Crisis Energética en Venezuela y Cambio Climático

En los últimos años, ha habido consenso en gran parte de la población mundial sobre el cambio climático como uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad, pero a su vez ha desencadenado innumerables interrogantes sobre cómo abordarlo, o si las medidas tomadas en años recientes realmente han sido las más adecuadas. Entre esas medidas se encuentra la adopción de la energía hidroeléctrica, una opción que a priori puede parecer excelente pues en teoría no produce contaminación al no generar dióxido de carbono, pero también tiene su propia serie de problemas y limitaciones.

En este sentido, la disminución del caudal de los ríos por la construcción de centrales hidroeléctricas puede provocar consecuencias humanitarias graves, pero también por contradictorio que suene, esta fuente de energía también puede ocasionar daños devastadores en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres al alterar los ciclos hidrológicos naturales, modificar el patrón de flujo y caudal de los ríos, contribuir con la pérdida de hábitat, la acumulación de materia orgánica dentro de los reservorios generando metano (otro gas de efecto invernadero) al descomponerse. Por último, pero no menos importante, los sedimentos que arrastran los ríos con el tiempo se acumulan en el fondo de los embalses, ocasionando que la represa vaya perdiendo capacidad de generación y eficiencia.

De igual modo, Venezuela tampoco se encuentra exenta de los problemas antes mencionados, país que depende de la Central Hidroeléctrica del Guri para aproximadamente el 80% de la electricidad que consume, y ha habido ocasiones donde fuertes sequías han provocado una disminución del embalse a niveles críticos, sin mencionar que el deterioro de la represa y del sistema eléctrico en general. Dentro del marco de la crisis que atraviesa el país, han resultado en constantes interrupciones del servicio, fallas que se remontan desde el año 2009, hasta el punto de que un colapso total del sistema eléctrico nacional, que dejó a más de la mitad de Venezuela sin energía por varios días en marzo del 2019.

En particular, la ciudad de Barquisimeto, capital del Estado Lara no escapa a esta situación, con interrupciones en el servicio eléctrico casi a diario y con una duración promedio de unas cuatro horas. Las fallas constantes en el suministro de energía han empujado a muchos a tratar de solventar la situación

con plantas eléctricas alimentadas con diésel y gas natural para poder mantener funcionando los equipos más necesarios de sus hogares y sobre todo de sus negocios. Debido a esto, la adopción a gran escala de generadores a diésel y gas natural por parte de varios negocios y hogares en la ciudad de Barquisimeto ha representado un aumento en el uso de estos combustibles.

No obstante, esto a su vez supone un problema, y es que los subproductos de la combustión de diésel han sido señalados como unos de los principales contaminantes de la atmósfera debido a su uso masivo en sectores como la automoción, transporte y energía. Según estudios realizados a nivel mundial se estima que se emiten a la atmósfera cada año grandes toneladas de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero, con áreas donde la contaminación del aire alcanza una alta concentración, muy por encima del límite considerado seguro por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

De ahí, se evidencia la necesidad de abordar el problema que representa la disminución en la calidad del aire producto de la situación antes mencionada. Teóricamente la solución ideal podría ser la adopción de otro tipo de energías renovables como la eólica y la solar, pero su implementación a gran escala supone otra serie de problemas y limitaciones, especialmente en materia de infraestructura e intermitencia, pues una falla del servicio eléctrico podría ocurrir durante períodos donde no haya producción cuando las condiciones meteorológicas no sean favorables, sin mencionar que la existencia de celdas fotovoltaicas en Venezuela es muy reducida y la de turbinas eólicas es prácticamente inexistente.

Por este motivo, a pesar de la apuesta y los grandes esfuerzos por las energías renovables, lo cierto es que la transición energética y la descarbonización han sido mucho más lentas y difíciles en diversos sectores de lo esperado en las proyecciones y objetivos climáticos. Por consiguiente, la búsqueda de alternativas se ha centrado en el uso del hidrógeno, como una potencial opción para paliar el problema de las energías renovables, debido a que la combustión del hidrógeno no produce dióxido de carbono, sino que su principal subproducto es vapor de agua, es decir, directamente no contamina, además de que existe un amplio espectro de métodos para producir hidrógeno.

Ahora bien, a los métodos de producción del hidrógeno se les asigna un color distinto, y es aquí cuando entra en escena el conocido como “hidrógeno verde”, y se le otorga este color al ser producido por medio de un proceso llamado electrólisis, usando la electricidad obtenida de fuentes solares, eólicas e hidroeléctricas para romper la molécula del agua por medio de la corriente separando el hidrógeno del oxígeno. Considerando que pueda ser la forma más efectiva de almacenar energía y ser utilizado en generadores diésel o de gas natural en los períodos de intermitencia de las renovables, así como durante una falla del sistema eléctrico.

Bajo este contexto, recientemente se han realizado con éxito experimentos donde se adaptan turbinas de gas natural y motores diésel para funcionar con hidrógeno puro o con un sistema dual de diésel/hidrógeno o gas natural/hidrógeno, el cual se estima reduce en más de un 80% las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y aumenta la eficiencia del generador dada la densidad energética del hidrógeno, siendo de aproximadamente 120 MJ/kg comparada con el diésel o el gas natural que son de 45.5 MJ/kg y 55.5 MJ/kg respectivamente, lo cual a su vez reduce el consumo de combustible contribuyendo aún más a mitigar las emisiones de gases nocivos.

De igual manera, el sistema de elaboración será una modificación en el sistema de inyección del motor diésel que alimenta la planta, en el que se le añade un segundo inyector para la adición del hidrógeno a la mezcla de aire y de diésel, en una proporción de 90% hidrógeno y 10% gasoil. Adicionalmente, se realizan algunas modificaciones en la unidad electrónica de control (ECU) para el accionamiento del segundo inyector y mantener la proporción ideal de la mezcla de aire, gasoil e hidrógeno.

Materiales y Métodos

Población y Muestra

La muestra a la que se aplicó el cuestionario está conformada por cuatro comercializadoras de plantas eléctricas. Las primeras dos fueron RKN Supply y COPIKON, las otras dos son las reconocidas cadenas de ferreterías EPA y Mango Center. Si bien la muestra a priori puede parecer pequeña, es una muestra bastante representativa debido a que solo RKN Supply domina el mercado de plantas eléctricas en Barquisimeto con una cuota de aproximadamente el 70%.

Técnica de Recolección de Información

La técnica de recolección de información seleccionada fue la encuesta, para ello se elaboró un cuestionario de 13 preguntas dirigido a las principales comercializadoras de plantas eléctricas en Barquisimeto.

Técnica de Análisis de Datos

En este caso se empleó la estadística descriptiva, con la finalidad de elaborar tablas y gráficos de torta que permitan conocer la frecuencia y el porcentaje, empleando para ello el programa Microsoft Excel.

Descripción del Producto

Las plantas eléctricas a base de hidrógeno no distan mucho de las plantas eléctricas convencionales, la diferencia radica en que estos generadores cuentan con un sistema dual diésel-hidrógeno, este consiste en una modificación en la cual se le adapta al motor diésel un segundo inyector. Adicionalmente, se realiza una reprogramación de la Unidad Electrónica de Control (ECU) para que ambos inyectores se accionen de manera simultánea, para inyectar en el cilindro una mezcla de 90% hidrógeno y 10% gasoil reduciendo así las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en más de un 80%.

Características del Producto

El producto que se busca comercializar tiene como base el modelo Saonon S150H6C. Este modelo de generador eléctrico está equipado con un motor Cummins 6BTA5.9-G2 de seis cilindros turbodiésel, con unos 177 HP a 1800 RPM. Las especificaciones generales base del generador son las siguientes:

- Potencia nominal: 135 kVA (potencia continua), 150 kVA (potencia en espera)
- Voltaje: 220V, trifásico
- Frecuencia: 60 Hz
- Velocidad: 1800 RPM
- Motor: Cummins 6BTA5.9-G2
- Alternador: Stamford UCI274D
- Peso: 1337 kg (Abierto) / 1350 kg (Con caja insonorizada)
- Dimensiones: 2200 × 830 × 1325 mm (Abierto) / 2250 × 1000 × 1650 mm (Con caja insonorizada)
- Certificaciones: CE, ISO9001, ISO14001, OHSAS18001
- Garantía: 1 año o 1000 horas de funcionamiento

Este modelo es ideal para aplicaciones industriales, comerciales o como respaldo en instalaciones críticas.

Diseño del Logo

Figura 1

Logo de la Empresa



Nota. Elaboración Propia (2025).

Análisis de la Demanda

El análisis de la demanda se determinó con base en los resultados obtenidos en la investigación de campo, en este caso por medio de la encuesta realizada a las comercializadoras en la ciudad de Barquisimeto que lideran las ventas de plantas eléctricas, por lo que al tener una cuota de mercado bastante importante son una muestra bastante representativa del sector. Una vez aplicada la encuesta, usando los datos obtenidos se procede con el cálculo de la demanda existente. En este caso, la demanda se determinó con base a los datos de la Tabla 1 y la Tabla 2, en la que se observa el rango de ventas mensual y cada cuanto tiempo se realiza la reposición de inventario. Como el 100% de las comercializadoras repone stocks de manera mensual, la demanda proyectada se calculó llevando el rango de ventas trimestral a mensual. Para ello se parte de la siguiente fórmula:

$$\text{Ventas mensuales} = (\text{Ventas trimestrales}) / 3$$

A continuación, se muestran lo referente al análisis de la demanda.

RKN Supply:

(Dado que RKN Supply vende más de 15 generadores trimestralmente se asume un rango de ventas de 16 a 20 generadores en ese lapso).

Se obtiene que el rango de ventas mensual de RKN Supply oscila entre las 5 y 7 unidades.

$$\text{Ventas mensuales} = 16/3 = 5,33 \approx 5$$

$$\text{Ventas mensuales} = 20/3 = 6,67 \approx 7$$

COPIKON:

$$\text{Ventas mensuales} = 5/3 = 1,67 \approx 2$$

$$\text{Ventas mensuales} = 9/3 = 3$$

Se obtiene que el rango de ventas mensual de COPIKON oscila entre las 2 y 3 unidades.

EPA:

$$\text{Ventas mensuales} = 10/3 = 3,33 \approx 3$$

$$\text{Ventas mensuales} = 14/3 = 4,67 \approx 5$$

Se obtiene que el rango de ventas mensual de EPA oscila entre las 3 y 5 unidades.

Mangocenter:

$$\text{Ventas mensuales} = 10/3 = 3,33 \approx 3$$

$$\text{Ventas mensuales} = 14/3 = 4,67 \approx 5$$

Se obtiene que el rango de ventas mensual de Mangocenter oscila entre las 3 y 5 unidades.

Tabla 1

Rango de ventas mensual

Comercializadora	Ventas trimestrales	Rango mensual estimado
COPIKON	5 – 9	1,67 – 3,00
RKN	16 – 20	5,33 – 6,67
EPA	10 – 14	3,33 – 4,67
Mangocenter	10 – 14	3,33 – 4,67

Nota. Elaboración Propia (2025).

Demanda mensual mínima: $1.67 + 5.33 + 3.33 + 3.33 = 13.66$ generadores/mes

Demanda mensual máxima: $3.00 + 6.67 + 4.67 + 4.67 = 19.01$ generadores/mes

Promedio mensual estimado: $(13.66 + 19.01) / 2 = 16,34$ generadores/mes

Tabla 2*Proyección Anual*

Métrica	Cálculo	Resultado aproximado
Demanda mínima anual	13.66×12	164 generadores
Demanda máxima anual	19.01×12	228 generadores
Demanda promedio anual	16.34×12	196 generadores

Nota. Elaboración Propia (2025).**Tabla 3***Proyección Anual (2025-2029)*

Año	Cálculo aplicado	Demanda proyectada (generadores/año)
2025	$(196 \times (1+0.05)^0)$	196
2026	$(196 \times (1+0.05)^1)$	206
2027	$(196 \times (1+0.05)^2)$	216
2028	$(196 \times (1+0.05)^3)$	227
2029	$(196 \times (1+0.05)^4)$	238

Nota. Los valores han sido redondeados al número entero más cercano para facilitar su interpretación.

Elaboración Propia (2025).

Partiendo de los datos obtenidos de la encuesta aplicada a las principales comercializadoras en la ciudad de Barquisimeto, se evidencia en la Tabla 3 que para el año 2025 hay una demanda proyectada de un promedio de unos 196 generadores. Considerando una tasa de crecimiento constante del 5% anual, se prevé que dicha demanda alcanzará aproximadamente 238 unidades para el año 2029 como se puede observar en la tabla 20, reflejando así una tendencia de crecimiento en el mercado de plantas eléctricas en la ciudad de Barquisimeto.

Esto se debe principalmente a la coyuntura de la inestabilidad del sistema eléctrico nacional que ha resultado en cortes de electricidad frecuentes y prolongados, afectando la operatividad de comercios e industrias a pesar de que en los últimos cuatro años la actividad económica de la ciudad de Barquisimeto ha crecido, y de mantenerse la tendencia también lo hará el consumo energético, lo cual a su vez representará un incremento en la necesidad de adquirir plantas eléctricas, impulsando con ello la demanda.

Precio

Al momento de fijar el precio de una planta eléctrica que funciona con hidrógeno verde se deben tomar en cuenta los costos iniciales del generador base, los costos de los insumos, instrumentos, actuadores, entre otros componentes que integran el sistema dual diésel-hidrógeno. Adicionalmente, el costo y tiempo de la modificación del generador para la adaptación de las piezas que integrarán el sistema dual, la programación de la ECU, el costo de producción, almacenamiento y demás infraestructura de hidrógeno también influirá en el costo unitario.

A continuación, se muestran en la Tabla 4, los precios de las plantas eléctricas de 150 KVA de las comercializadoras principales que ofrecen este tipo de producto.

Tabla 4

Comparación de precios

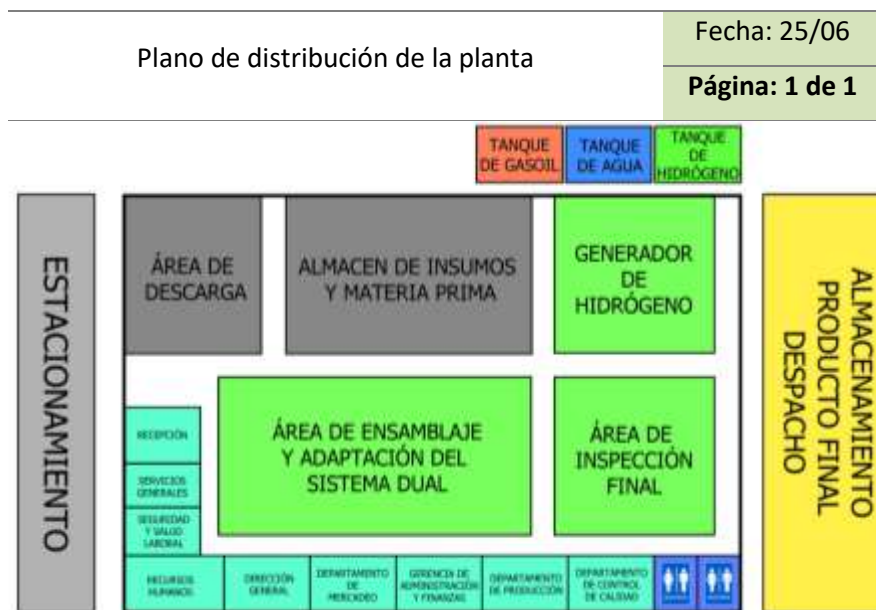
Comercializadora	Producto	Precio
RKN Supply	Planta eléctrica de 150 KVA	USD 23.000
COPIKON	Planta eléctrica de 150 KVA	USD 28.000

Nota. Elaboración Propia (2025).

Estudio Técnico-operativo

Figura 2

Distribución de planta



Nota. Escala 1:780. Elaboración Propia (2025).

Ingeniería del Proyecto

La ingeniería del proyecto se refiere a la realización de las actividades que tengan como objetivo la investigación de los métodos y pasos de la realización correcta del proceso productivo, así como los equipos, maquinaria, infraestructura y demás insumos necesarios para poder llevar a cabo el proceso productivo, además, esto también requiere de una estimación de costos de adquisición, mantenimiento, depreciación, entre otros, determinar la factibilidad o no factibilidad de la propuesta.

Descripción del Proceso de Ensamblaje del Sistema Dual Diésel-Hidrógeno para Plantas Eléctricas

1. Recepción y Control de Calidad

- Ingreso de componentes: Se reciben los sensores, válvulas, inyectores, reguladores, pantallas y periféricos.
- Inspección visual y técnica: Verificación de códigos, compatibilidad eléctrica/mecánica y pruebas básicas de funcionamiento.
- Almacenamiento temporal: Componentes se organizan según tipo y orden de instalación.

2. Preparación del Generador Base

- Desensamblaje parcial del generador para facilitar el acceso a sensores, motor, puntos de inyección y conductos de admisión/escape.
- Evaluación del motor Cummins 6BTA5.9G2 para establecer puntos de integración sin comprometer el rendimiento diésel.

3. Integración del Sistema de Control

- Instalación de sensores:
 - MAP Bosch 0261230043 para monitorear presión en el múltiple de admisión.
 - Lambda Bosch LSU 4.9 para mezcla aire-combustible.
 - EGT Tipo K + MAX31855 para temperatura de gases de escape.
 - Detonación Bosch KS4-P para prevenir combustión fuera de tiempo.
 - CKP VR para posición del cigüeñal.
 - TPS GM 3 pines en el acelerador (o bomba mecánica convertida).
 - Sensor de presión de H₂ Honeywell MLH para regulación precisa de inyección.
 - Sensor de fuga Figaro TGS2611 para seguridad.

4. Sistema de Inyección de Hidrógeno

- Instalación de los inyectores Bosch H2 DI: Ubicados en la parte superior del cilindro junto a los inyectores de gasoil, uno por cada cilindro, 6 en total.

- Montaje de válvulas:
 - Burkert 2871 como corte principal del flujo.
 - *Parker VSO* para control variable de alimentación de H₂.
- Regulación:
 - *Parker HPR-2* como reductor primario de presión.
 - *Bronkhorst EL-PRESS* para regulación digital avanzada y monitoreo en tiempo real.

5. Gestión Electrónica y Visualización

- Controladores, relés y protección:
 - Relé automotriz 12V 40A para protección y maniobra de potencia.
 - Ventilador SPAL para refrigeración activa en zonas críticas.
- Pantallas de control:
 - HMI Nextion 4.3" para visualización básica de datos.
 - TFT táctil avanzada para interfaz principal, mapas de inyección y control interactivo.

6. Calibración, Pruebas y Validación

- Ajustes iniciales con el generador funcionando solo en diésel.
- Activación progresiva del sistema de hidrógeno.
- Registro de lecturas y corrección de parámetros en función del rendimiento y la seguridad.
- Pruebas bajo distintas cargas y condiciones térmicas.

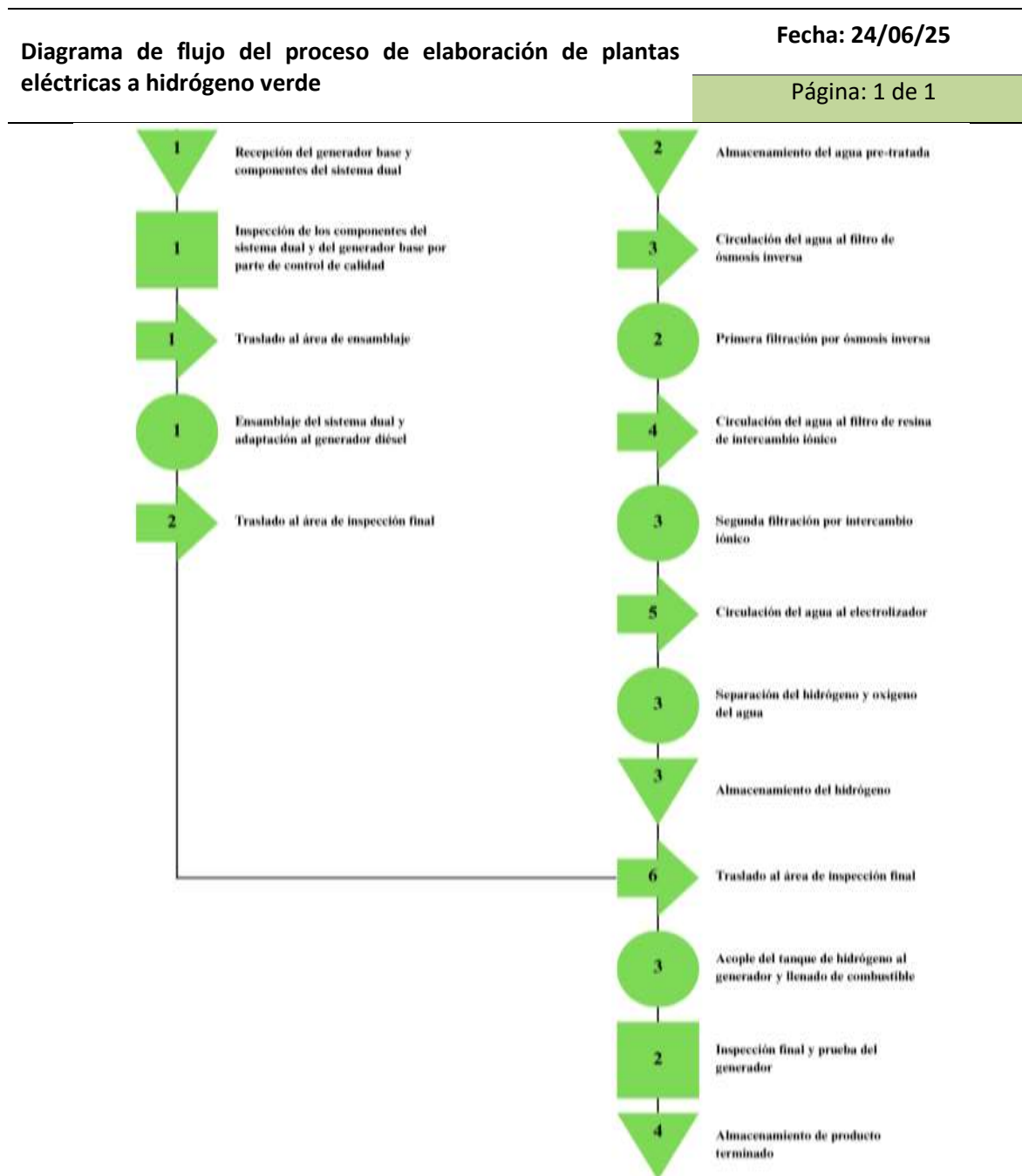
Paralelamente al ensamblaje del sistema dual y su adaptación al motor diésel, se lleva a cabo la producción del hidrógeno. El primer paso consiste en la extracción de agua del tanque de la planta hacia otro que se encuentra dentro del área de producción de hidrógeno. Allí el agua se hace circular por un filtro de ósmosis inversa, eliminar entre un 95% y un 98% de los minerales del agua, seguidamente se circula por un filtro de resina por intercambio iónico para obtener agua de alta pureza.

Una vez filtrada el agua se hace circular por un electrolizador alimentado por paneles solares que se instalan en el techo del galpón, en este caso el electrolizador, es un Cummins HyLYZER 1000-30, que por medio de un proceso llamado electrólisis rompe la molécula del agua separando el hidrógeno del oxígeno. El hidrógeno se produce en las celdas del cátodo mientras que el oxígeno se produce en las celdas del ánodo, de ahí el hidrógeno se recircula a un compresor, que corresponde al modelo Hiperbaric KS50 almacenando hidrógeno puro a una presión de 500 bar en tanques tipo IV, que posteriormente se acoplan al generador para alimentar el sistema dual. Por su parte, el hidrógeno se recircula hacia el exterior del

galpón como subproducto que se libera a la atmósfera. Es importante que la planta cuente con una buena ventilación, debido a que la acumulación de hidrógeno y oxígeno en espacios cerrados representa un riesgo de explosiones. En la Figura 19 se observa el diagrama de flujo del proceso productivo.

Figura 3

Diagrama de flujo de procesos



Nota. Elaboración Propia (2025).

Balance de Recursos

Para elaborar las plantas eléctricas a base de hidrógeno verde se requieren una serie de insumos y componentes para el proceso productivo. A continuación, en las tablas 5 y 6 se detallan todos los insumos, piezas, maquinaria e infraestructura necesaria para la elaboración de una planta eléctrica a base de hidrógeno verde.

Tabla 5

Requerimiento de materia prima

Descripción	Cantidad
Hidrógeno	20 kg

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 6

Requerimiento de insumos

Descripción	Cantidad
Sensor MAP Bosch 0261230043 (Múltiple)	1
Sensor Lambda Bosch LSU 4.9	1
Sensor EGT Tipo K + MAX31855	2
Sensor de detonación Bosch KS4-P	2
Sensor CKP VR	1
Sensor TPS GM 3 pines	1
Sensor presión H2 Honeywell MLH	2
Inyector de hidrógeno Bosch H2 DI	6
Válvula solenoide Burkert 2871	1
Válvula Parker VSO	1
Relé automotriz 12V 40A	4
Ventilador SPAL 12V brushless	2
Pantalla HMI Nextion 4.3"	1
Pantalla TFT táctil (avanzada)	1
Regulador Parker HPR-2	1
Regulador Bronkhorst EL-PRESS	1
Sensor de fuga Figaro TGS2611	2
Tanque tipo IV	1

Nota. Elaboración Propia.

En este orden de ideas, también se toman en cuenta la maquinaria, equipos y herramientas necesarios para realizar el ensamblaje, así como los equipos de protección personal, material de oficinas y demás requerimientos para el personal de la empresa. En la tabla 7 se muestran los medios operativos necesarios y en las tablas 8, 9 y 10 se muestra un listado de los insumos requeridos por el personal.

Tabla 7

Requerimiento de maquinaria y herramientas

Descripción	Cantidad	Características
Paneles solares	150 und	Paneles solares con un área de 1.7m ² y 450 W de potencia
Tuberías de acero inoxidable	12 metros	Tuberías de acero inoxidable 316L para agua purificada
Electrolizador	1 und	Electrolizador Cummins HyLYZER 1000-30
Compresor de hidrógeno	1 und	Compresor de hidrógeno Hiperbaric KS50
Montacargas	2 und	Monta cargas Hyundai 25G-7M con capacidad de 2500 kg
Juego de herramientas	6 und	Juego de herramientas TOTAL de 142 piezas
Tanque de almacenamiento de hidrógeno	1 und	Tanque de almacenamiento de hidrógeno con capacidad de 500 litros a 600 bar
Tanque de almacenamiento de agua	2 und	Tanque de almacenamiento de agua de 10000 lts
Filtro de ósmosis inversa	1 und	Filtro de ósmosis inversa con membrana semipermeable de poliamida
Taladro de pedestal	2 und	Taladro de pedestal de 5 velocidades con sus respectivas brocas

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 8*Equipos de protección personal (EPP)*

Descripción	Cantidad	Características
Botas de seguridad	24 pares	En cuero con punta de acero y suela de poliuretano COVENIN 39:2003
Casco de seguridad	24 und	Elaborados de plástico resistente COVENIN 815:1999
Máscaras antigás	24 und	Máscaras antigás media cara 3M
Lentes de seguridad	24 und	Transparentes de plástico resistente
Guantes de seguridad	20 pares	Elaborados en polietileno y sílice

Nota. Elaboración Propia.**Tabla 9***Requerimientos de equipos de oficina*

Descripción	Cantidad	Características
Computadoras	10	Procesador Intel Core i5 512 GB de memoria y 8 GB de RAM y monitor LED
Escritorios de oficina	15	Elaborados en metal y madera, con tres gavetas y archivador.
Sillas ejecutivas	15	Sillas ejecutivas ergonómicas, con respaldo en un material suave, con ruedas y apoyabrazos
Aire acondicionado	9	Aire acondicionado tipo Split marca Daewoo de 18000 BTU
Lámparas	18	Lámparas LED de 110V
Teléfonos	3	Teléfonos fijos Panasonic
Sillas de sala de espera	3	Sillas metálicas de 3 puestos
Impresoras	6	Impresora EPSON Ecotank L1250

Nota. Elaboración Propia.

Tabla 10*Requerimientos de personal*

Descripción	Cantidad
Jefe de servicios generales	1
Conserje	3
Médico ocupacional	1
Gerente de RR.HH.	1
Gerente de mercadeo	1
Vendedor	2
Administrador	1
Gerente administrativo y financiero	1
Gerente de producción	1
Ingeniero electrónico	1
Ingeniero mecánico	1
Gerente de control de calidad	1
Ingeniero Industrial	1
Contador	1
Operario	12

Nota. Elaboración Propia.

Capacidad de Producción

La planta operará unas 40 horas a la semana, divididas en un total de 5 días con una jornada laboral diaria de 8 horas. La empresa también contará como laborables 11 meses del año, dejando un mes libre por vacaciones colectivas, se toman en cuenta además días feriados. La capacidad de producción se calculará en base a un esquema diario de 6 horas productivas por día (considerando que 1 hora sea destinada a la limpieza y acondicionamiento de las máquinas antes de iniciar la misma y 1 hora destinada al almuerzo). El ensamblaje del sistema dual y su adaptación lleva aproximadamente 6 horas, dando unas 0,67 unidades por hora.

$$0,67 \text{ und/hr} \times 6 \text{ hr/día} = 4,02 \text{ und/día}$$

$$4,02 \text{ und/día} \times 5 \text{ días/semana} = 20,1 \text{ und/semana}$$

$$20,1 \text{ und/semana} \times 4 \text{ semanas/mes} = 80,4 \text{ und/mes}$$

$$\text{CPI} = 80,4 \text{ und/mes} \times 11 \text{ meses/año} \approx 884 \text{ und/año}$$

Una vez calculada la capacidad de producción instalada, se procede a calcular la misma para los próximos 5 años.

Tabla 11

Capacidad de planta utilizada

Año	Demanda proyectada (generadores/año)	Capacidad utilizada (%)
1	196	22,15 %
2	206	23,29 %
3	216	24,42 %
4	227	25,66 %
5	238	26,90 %

Nota. Elaboración Propia.

Costos de Producción

Los costos de producción se refieren a los gastos que son necesarios para la adquisición de materia prima, insumos, maquinaria, herramientas y demás equipos, además del pago de la mano de obra y servicios que hacen falta para llevar a cabo la elaboración de un producto. Esto es importantísimo para determinar la rentabilidad de una empresa, pues los costos de producción en relación con los ingresos de las ventas del producto indican el beneficio bruto. A continuación, en las siguientes tablas se observan los costos variables de materia prima, herramientas e insumos para la producción de una planta eléctrica de hidrógeno verde.

Tabla 12

Costo variable de materia prima

Descripción	Valor unitario	Cantidad	Valor total
Hidrógeno	\$ 4,25	20 kg	\$ 85,00
Total			\$ 85,00

Nota. El precio del hidrógeno se promedió entre los precios publicados por la Agencia Internacional de la Energía. Elaboración Propia (2025).

Tabla 13*Costo variable de insumos*

Componente	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Sensor MAP Bosch 0261230043	1	\$ 35,00	\$ 35,00
Sensor Lambda Bosch LSU 4.9	1	\$ 70,00	\$ 70,00
Sensor EGT Tipo K + MAX31855	2	\$ 25,00	\$ 50,00
Sensor de detonación Bosch KS4-P	2	\$ 45,00	\$ 90,00
Sensor CKP VR	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Sensor TPS GM 3 pines	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Sensor presión H2 Honeywell MLH	2	\$ 120,00	\$ 240,00
Inyector de hidrógeno Bosch H2 DI	6	\$ 180,00	\$ 1.080,00
Válvula solenoide Burkert 2871	1	\$ 160,00	\$ 160,00
Válvula Parker VSO	1	\$ 280,00	\$ 280,00
Relé automotriz 12V 40A	4	\$ 5,00	\$ 20,00
Ventilador SPAL 12V brushless	2	\$ 90,00	\$ 180,00
Pantalla HMI Nextion 4.3"	1	\$ 45,00	\$ 45,00
Pantalla TFT táctil (avanzada)	1	\$ 120,00	\$ 120,00
Regulador Parker HPR-2	1	\$ 350,00	\$ 350,00
Regulador Bronkhorst EL-PRESS	1	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00
Sensor de fuga Figaro TGS2611	2	\$ 35,00	\$ 70,00
Tanque tipo IV	1	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
Generador Saonon S150H6C	1	\$ 17.000,00	\$ 17.000,00
Total		\$ 27.820,00	\$ 29.050,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

A continuación, en la Tabla 14 se muestran los servicios básicos contratados por la empresa, así como sus costos mensuales y anuales, para la elaboración de plantas eléctricas a hidrógeno verde, así como el correcto funcionamiento de la empresa.

Tabla 14*Costos por Servicios Básicos*

Descripción	Proveedor	Costo mensual (USD)		Costo anual (USD)	
Telefonía	Movistar	\$	60,00	\$	720,00
Internet	Thundernet	\$	60,00	\$	720,00
Agua	HIDROLARA	\$	80,00	\$	960,00
Electricidad	CORPOELEC	\$	80,00	\$	960,00
Aseo	FOSPUCA	\$	100,00	\$	1.200,00
Total		\$	380,00	\$	4.560,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

En este orden de ideas también se tomaron en consideración otros costos relacionados con contratación, como es el caso de la vigilancia, mantenimiento de la maquinaria, así como el alquiler del galpón. Toda esta información se muestra en la tabla 15.

Tabla 15*Costos por contratación*

Descripción	Proveedor	Costo mensual (USD)		Costo anual (USD)	
Alquiler	Rent a house	\$	2.500,00	\$	30.000,00
Mantenimiento	Mundo Mecánico C. A.	\$	400,00	\$	4.800,00
Vigilancia	Serenos Lara	\$	400,00	\$	4.800,00
Total		\$	3.300,00	\$	39.600,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Sueldos y Salarios

Anteriormente se mencionó que la empresa trabajaría de lunes a viernes en jornadas laborales de 8 horas diarias, dando un total de 40 horas semanales de acuerdo con lo que dictamina la Ley Orgánica del Trabajo, de Trabajadores y Trabajadoras (LOTTT) Art. 173. Al momento de calcular los salarios totales se tomó en cuenta una serie de datos, siendo estos en primer lugar un bono de alimentación de \$60, para el Régimen Prestaciones para la Vivienda y Hábitat (R.P.V.H.) se tomó el 2% mensual sobre sueldo base, para el Seguro Social Obligatorio Socialista (S.S.O.S.) el nueve por ciento 9% mensual sobre salario base, para el Régimen Prestacional de Empleo (R.P.E.) se utilizó el dos por 2% mensual sobre sueldo base y para el Instituto Nacional de Capacitación y Evaluación Socialista (I.N.C.E.S.) el dos por ciento 2% de sueldo

base acumulado trimestral, así como se estiman utilidades a un equivalente de treinta (30) días de salario base.

Tabla 16

Mano de obra directa

Cargo	Cantidad	Salario Base	Cesta ticket	RPVH (2%)	SSOS (9%)	RPE (2%)	TOTAL (Mes)	Utilidades	INCES 2%	TOTAL (Año)
Gerente de producción	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		350,00	40,00	7,00	31,50	7,00	442,50	350,00	7,00	5.660,00
Operario	12	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		150,00	40,00	3,00	13,50	3,00	2.550,00	150,00	3,00	30.750,00
Ingeniero electrónico	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		320,00	40,00	6,40	28,80	6,40	408,00	320,00	6,40	5.216,00
Gerente control de calidad	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		350,00	40,00	7,00	31,50	7,00	442,50	350,00	7,00	5.660,00
Ingeniero mecánico	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		320,00	40,00	6,40	28,80	6,40	408,00	320,00	6,40	5.216,00
Ingeniero industrial	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		300,00	40,00	6,00	27,00	6,00	385,00	300,00	6,00	4.920,00
Gerente de RR.HH.	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		350,00	40,00	7,00	31,50	7,00	442,50	350,00	7,00	5.660,00
Gerente administrativo y financiero	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		350,00	40,00	7,00	31,50	7,00	442,50	350,00	7,00	5.660,00
Contador	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		280,00	40,00	5,60	25,20	5,60	362,00	280,00	5,60	4.624,00
Administrador	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		180,00	40,00	3,60	16,20	3,60	247,00	180,00	3,60	3.144,00
Gerente de mercadeo	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		300,00	40,00	6,00	27,00	6,00	385,00	300,00	6,00	4.920,00
Vendedor	2	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		150,00	40,00	3,00	13,50	3,00	425,00	150,00	3,00	5.250,00
Médico ocupacional	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		180,00	40,00	3,60	16,20	3,60	247,00	180,00	3,60	3.144,00
Jefe de servicios generales	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		140,00	40,00	2,80	12,60	2,80	201,00	140,00	2,80	2.552,00
Conserje	3	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		120,00	40,00	2,40	10,80	2,40	534,00	120,00	2,40	6.528,00
Total	29						\$			\$
							7.922,00			98.904,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 17

Mano de obra indirecta

Cargo	Cantidad	Salario Base	Cestaticket	RPVH (2%)	S.S.O. (9%)	R.P.E (2%)	TOTAL (Mes)	Utilidades	INCES (2%)	TOTAL (Año)
Community manager	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		130,00	40,00	2,60	11,70	2,60	189,50	350,00	2,60	2.624,00
Consultor jurídico	1	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
		200,00	40,00	4,00	18,00	4,00	270,00	350,00	4,00	3.590,00
Total	2						\$			\$
							459,50			6.214,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Habiendo desglosado y calculado todos los costos fijos de producción, ahora se procede a realizar la totalización de estos en la Tabla 17 para presentarlos de una forma más resumida.

Tabla 18*Costos Fijos Totales de Producción*

Descripción	Costo mensual	Costo anual
Mano de obra directa	\$ 7.922,00	\$ 98.904,00
Mano de obra indirecta	\$ 459,50	\$ 6.214,00
Servicios básicos	\$ 2.890,00	\$ 34.680,00
Contrataciones	\$ 3.300,00	\$ 39.600,00
Total	\$ 14.571,50	\$ 179.398,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Una vez determinada la producción anual de la planta para su primer año, y habiendo calculado los costos fijos de producción se procede con el cálculo del costo fijo unitario (CFU) el cuál se realiza por medio de la siguiente fórmula.

$$CFU = (\text{Costos fijos anuales}) / (\text{Producción anual})$$

$$CFU = (\$ 179.398,00) / (884 \text{ und}) = 202,94\$/\text{und}$$

Similarmente, se procede ahora con la totalización de los costos fijos variables, que corresponden a los costos variables de materia prima y los costos variables de insumos y que da como resultado el coste variable unitario como se observa en la Tabla 19.

Tabla 19*Costo Variable Unitario*

Descripción	Costo total (USD)
Materia prima	\$ 85,00
Insumos	\$ 29.050,00
Total	\$ 29.135,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Costo Total Unitario

Una vez calculados el costo fijo unitario y el costo variable unitario, se suman ambos valores para la obtención del costo total unitario, haciendo uso de la siguiente fórmula y como se puede evidenciar en la tabla 20.

$$CTU = CFU + CVU$$

Tabla 20*Costo total unitario*

Descripción	Costo total (USD)
Costo fijo unitario	\$ 202,94
Costo variable unitario	\$ 29.135,00
Total	\$ 29.337,94

Nota. Elaboración Propia (2025).

Habiendo calculado el costo unitario total de producción, se procede ahora con el cálculo del precio de venta. Para ello se tomará para la empresa un margen de ganancia del 20% más un 10% adicional para cubrir gastos operativos y logísticos. Para realizar el cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Precio de venta} = \text{CTU} \times 0,30$$

$$\text{Precio de venta} = \$29.337,94 \times 1,30$$

$$\text{Precio de venta} = \$38.139,32 \text{ por unidad}$$

Estudio Económico-Financiero**Activos Fijos Intangibles**

Los costos de activos fijos intangibles están constituidos por los costos de Registro de Comercio, Patente y de Marca. Estos trámites serán gestionados por una firma de abogados. Se presenta a continuación en la Tabla 21 la lista de activos intangibles.

Tabla 21*Activos Fijos Intangibles*

Descripción	Costo total
Registro de Marca	\$ 300,00
Registro de comercio	\$ 1.500,00
Pantene de industria y comercio	\$ 600,00
otros gastos	\$ 250,00
Total	\$ 2.650,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Activos Fijos Tangibles

Los costos de activos fijos tangibles están determinados por todos los bienes materiales con los que cuenta la empresa, como lo indica su nombre, estos incluyen todo lo relacionado con la maquinaria,

equipos, insumos, mobiliario, entre otros. Se toma en cuenta además la depreciación de dichos bienes. En las tablas 22 a la tabla 25 se muestran todos los gastos relacionados con los activos fijos tangibles.

Tabla 22*Costo de maquinaria y herramientas*

Descripción	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Paneles solares	150	\$ 180,00	\$ 27.000,00
Tuberías de acero inoxidable	12	\$ 40,00	\$ 480,00
Electrolizador	1	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00
Compresor de hidrógeno	1	\$ 600.000,00	\$ 600.000,00
Montacargas	2	\$ 17.000,00	\$ 34.000,00
Juego de herramientas	6	\$ 350,00	\$ 2.100,00
Tanque de almacenamiento de hidrógeno	1	\$ 18.000,00	\$ 18.000,00
Tanque de almacenamiento de agua	2	\$ 1.250,00	\$ 2.500,00
Filtro de ósmosis inversa	1	\$ 3.500,00	\$ 3.500,00
Taladro de pedestal	2	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00
Total		\$ 2.642.320,00	\$ 2.691.580,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 23*Costo de equipos de protección personal (EPP)*

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Botas de seguridad	24	\$ 40,00	\$ 960,00
Casco de seguridad	24	\$ 4,00	\$ 96,00
Máscaras antigás	24	\$ 25,00	\$ 600,00
Lentes de seguridad	24	\$ 3,00	\$ 72,00
Guantes de seguridad	20	\$ 6,00	\$ 120,00
Total			\$ 1.848,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 24*Costo de equipos de oficina*

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Computadoras	10	\$ 450,00	\$ 4.500,00
Escritorios de oficina	15	\$ 100,00	\$ 1.500,00
Sillas ejecutivas	15	\$ 65,00	\$ 975,00
Aire acondicionado	9	\$ 780,00	\$ 7.020,00
Lámparas	18	\$ 10,00	\$ 180,00
Teléfonos	3	\$ 30,00	\$ 90,00
Sillas de sala de espera	3	\$ 175,00	\$ 525,00
Impresoras	6	\$ 270,00	\$ 1.620,00
Total			\$ 16.410,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Una vez calculados los costos de los activos fijos tangibles se procede con la totalización de estos en la Tabla 25 para presentarlos de una forma más resumida y organizada

Tabla 25*Activos fijos tangibles*

Descripción	Costo total
Insumos de oficina	\$ 16.410,00
Herramientas y maquinaria	\$ 2.691.580,00
equipos de protección personal	\$ 1.848,00
Total	\$ 2.709.838,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Inversiones en Activo Circulante

El activo circulante se refiere a todos los bienes líquidos con los que cuenta una empresa, es decir, el dinero en metálico que tiene a disposición. El cálculo del valor de materia prima e insumos se obtuvo multiplicando la demanda proyectada mensual de generadores por los costos variables de la materia prima e insumos como se muestra en el siguiente cálculo. Para efectos de exactitud de cálculo la demanda mensual de 16,34 generadores por mes se aproximó a 17 unidades mensuales:

$$\text{Valor materia prima e insumos} = \text{Demanda mensual} \times \text{Costo variable}$$

$$\text{Valor materia prima e insumos} = 17 \times \$ 29.135$$

Valor materia prima e insumos = \$ 495.295

A continuación, en la tabla 26 y 27 se muestran los gastos indirectos y activos circulantes.

Tabla 26

Costos indirectos

Descripción	Costo mensual	Costo anual
Insumos de oficina	\$ 200,00	\$ 2.400,00
Publicidad y redes sociales	\$ 300,00	\$ 3.600,00
Artículos de limpieza	\$ 200,00	\$ 2.400,00
Total	\$ 700,00	\$ 8.400,00

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 27

Activos circulantes

Descripción	Costo mensual	Costo anual
Mano de obra	\$ 8.381,50	\$ 105.118,00
Servicios básicos	\$ 2.890,00	\$ 34.680,00
Materia prima e insumos	\$ 498.744,98	\$ 5.750.236,24
Gastos indirectos	\$ 700,00	\$ 8.400,00
Total	\$ 510.716,48	\$ 5.898.434,24

Nota. Elaboración Propia.

A continuación, en la tabla 28 se muestra un resumen de inversiones con la totalización del monto de inversión inicial.

Tabla 28

Resumen de inversiones

Descripción	Total
Activos fijos tangibles	\$ 2.709.838,00
Activos fijos intangibles	\$ 2.650,00
Activos circulantes	\$ 5.898.434,24
Total	\$ 8.610.922,24

Nota. Elaboración Propia (2025).

Depreciación

Para el cálculo de depreciación de equipos se utilizó el método de depreciación lineal, considerando el valor de salvamento en base al 10% del valor inicial, estimando la vida útil bajo las

indicaciones de los proveedores. En la tabla 29 se muestra la depreciación de los equipos usando la siguiente fórmula.

$$\text{Depreciación} = (\text{Valor inicial} - \text{Valor de salvamento}) / \text{Vida útil (años)}$$

Tabla 29

Depreciación de equipos

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Valor salvamento	Vida útil (años)	Depreciación
Paneles solares	150	\$ 180,00	\$ 27.000,00	\$ 2.700,00	15	\$ 1.620,00
Tuberías de acero inoxidable	12	\$ 40,00	\$ 480,00	\$ 48,00	10	\$ 43,20
Electrolizador	1	\$ 2.000.000,00	\$ 2.000.000,00	\$ 200.000,00	15	\$ 120.000,00
Compresor de hidrógeno	1	\$ 600.000,00	\$ 600.000,00	\$ 60.000,00	15	\$ 36.000,00
Montacargas	2	\$ 17.000,00	\$ 34.000,00	\$ 3.400,00	20	\$ 1.530,00
Juego de herramientas	6	\$ 350,00	\$ 2.100,00	\$ 210,00	20	\$ 94,50
Tanque de almacenamiento de hidrógeno	1	\$ 18.000,00	\$ 18.000,00	\$ 1.800,00	15	\$ 1.080,00
Tanque de almacenamiento de agua	2	\$ 1.250,00	\$ 2.500,00	\$ 250,00	20	\$ 112,50
Filtro de ósmosis inversa	1	\$ 3.500,00	\$ 3.500,00	\$ 350,00	15	\$ 210,00
Taladro de pedestal	2	\$ 2.000,00	\$ 4.000,00	\$ 400,00	20	\$ 180,00
Total						\$ 160.870,20

Nota. Elaboración Propia (2025).

Presupuesto de gastos proyectados

Para la elaboración de los gastos proyectados se parte de un crecimiento del 5% interanual de la participación que tendrá la empresa en el mercado durante los próximos 5 años como se pudo observar en la Tabla 20 con la proyección de la demanda. Este crecimiento tendrá un efecto en los costos de materias primas e insumos para la fabricación de las plantas eléctricas.

Se toma en cuenta además para la proyección de gastos un porcentaje de inflación acumulada anual. Estimando que la inflación podría alcanzar el 200% para finales de 2025, reflejando un deterioro en los indicadores económicos y alta incertidumbre en el entorno macroeconómico. Por su parte, el Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales (IIES) de la UCAB proyecta una inflación de aproximadamente 220%. Por lo tanto, promediando estas dos estimaciones se obtiene una inflación acumulada de 210%, la

cual se usará como referente. No obstante, debido a que los costos están calculados en dólares estadounidenses no se espera que la inflación tenga un efecto. Sin embargo, con datos de la Reserva Federal de los Estados Unidos, entidad encargada de la emisión del dólar que es la moneda que se usa como referente en este proyecto, además de datos obtenidos de instituciones financieras internacionales como el Fondo Monetario Internacional y el Banco Mundial se estimará el incremento anual de los gastos en un 10%.

Con respecto a los salarios de la mano de obra, tampoco se tomará en cuenta un incremento de estos debido a que todos los salarios se encuentran por encima del mínimo establecido por el Ejecutivo Nacional, además de que están calculados en dólares estadounidenses a la tasa emitida por el Banco Central de Venezuela (BCV) al momento de realizar los pagos de nómina. En la tabla 49 se presenta la información detallada del presupuesto de gastos proyectados. No obstante, es importante recalcar que corresponden a datos no oficiales dado que algunos indicadores macroeconómicos nacionales y no provienen de fuentes gubernamentales al no haber estadísticas disponibles de parte de estas.

Estado de Resultados Proyectados

El estado de resultados proyectados establece si un proyecto tendrá los suficientes ingresos para llevarlo a cabo, estableciendo además si los márgenes de utilidad son aceptables para el saldo de deudas y el financiamiento de expansiones futuras de la empresa. Esta información está detallada en la Tabla 30.

Tabla 30

Presupuesto de gastos proyectados

Descripción	Incremento anual	Inflación anual	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Materia prima e insumos	10	-	\$ 5.750.236,24	\$ 6.647.977,20	\$ 7.667.764,00	\$ 8.864.077,18	\$ 10.222.975,35
Mano de obra	-	-	\$ 105.118,00	\$ 115.629,80	\$ 127.192,78	\$ 139.912,06	\$ 153.903,26
Servicios básicos	-	10	\$ 4.560,00	\$ 5.016,00	\$ 5.517,60	\$ 6.069,36	\$ 6.676,30
Contrataciones	-	10	\$ 39.600,00	\$ 43.560,00	\$ 47.916,00	\$ 52.707,60	\$ 57.978,36
Gastos indirectos	-	10	\$ 8.400,00	\$ 9.240,00	\$ 10.164,00	\$ 11.180,40	\$ 12.298,44
Total			\$ 5.907.914,24	\$ 6.821.423,00	\$ 7.858.554,38	\$ 9.073.946,60	\$ 10.453.831,71

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 31*Presupuesto de ingresos proyectados*

Descripción	Incremento anual	Inflación anual	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Demanda de unidades	5	-	196	206	216	227	238
Precio de venta	5	-	\$ 38.139,32	\$ 40.046,29	\$ 42.048,60	\$ 44.151,03	\$ 46.358,58
Ingresos			\$ 7.475.306,72	\$ 8.249.534,92	\$ 9.082.497,66	\$ 10.022.283,88	\$ 11.033.342,48

Nota. Elaboración Propia (2025).

Tabla 32**Presupuesto de resultados proyectados**

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos	\$ 7.475.306,72	\$ 8.249.534,92	\$ 9.082.497,66	\$ 10.022.283,88	\$ 11.033.342,48
Gastos	\$ 5.907.914,24	\$ 6.498.705,66	\$ 7.148.576,23	\$ 7.863.433,85	\$ 8.649.777,24
Total	\$ 1.567.392,48	\$ 1.750.829,25	\$ 1.933.921,43	\$ 2.158.850,03	\$ 2.383.565,24

Nota. Elaboración Propia (2025).

Como se puede observar en la tabla 32, el presupuesto de resultados proyectados presenta un balance positivo, por lo que con este dato se puede decir que el proyecto es rentable. Con estos valores se procede a calcular el flujo de caja, expresado en la Tabla 33.

Flujo Neto de Caja

El flujo neto de caja es un indicador financiero que representa la diferencia entre los ingresos y los egresos de efectivo de una empresa o proyecto durante un período determinado. Es decir, muestra cuánto dinero efectivo queda disponible después de cubrir todos los gastos operativos, de inversión y financieros, estos indicadores se muestran en la Tabla 52 a continuación.

Tabla 33*Flujo neto de caja*

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos						
Ventas		\$ 7.475.306,72	\$ 8.249.534,92	\$ 9.082.497,66	\$ 10.022.283,88	\$ 11.033.342,48
Total ingresos		\$ 7.475.306,72	\$ 8.249.534,92	\$ 9.082.497,66	\$ 10.022.283,88	\$ 11.033.342,48
Gastos						
Total gastos		\$ 5.907.914,24	\$ 6.821.423,00	\$ 7.858.554,38	\$ 9.073.946,60	\$ 10.453.831,71
Utilidad bruta		\$ 1.567.392,48	\$ 1.428.111,91	\$ 1.223.943,29	\$ 948.337,29	\$ 579.510,76
ISLR (34%)		\$ 532.913,44	\$ 485.558,05	\$ 416.140,72	\$ 322.434,68	\$ 197.033,66
Utilidad neta		\$ 1.034.479,04	\$ 942.553,86	\$ 807.802,57	\$ 625.902,61	\$ 382.477,10
Inversión	\$ 8.610.922,24					
Flujo de caja	\$ -8.610.922,24	\$ 1.034.479,04	\$ 942.553,86	\$ 807.802,57	\$ 625.902,61	\$ 382.477,10

Nota. Elaboración Propia (2025).

Análisis Financiero

El análisis financiero es un método en el que se evalúan ciertos indicadores de este tipo y de acuerdo con los resultados obtenidos realizar la toma de decisiones con respecto al proyecto. Dentro del análisis financiero se toman en cuenta indicadores como el Valor Actual Neto, la Tasa Mínima de Rendimiento Aceptable, el Período de Retorno de Inversión, la Relación Costo/Beneficio, la Tasa Interna de Retorno y un Análisis de sensibilidad para ver cómo se comportaría la empresa en escenarios desfavorables y su capacidad para resistir circunstancias adversas.

Tasa mínima de rendimiento aceptable (TMAR)

Para el cálculo de la Tasa mínima de rendimiento aceptable (TMAR) se tomó la tasa de interés activa fijada por el Banco Central de Venezuela, estipulada en un 59,22%, además del rango de inflación mensual registrado en junio de 2025 que fue de un 18,4%.

$$TMAR = (0,5922+0,184) + (0,5922+0,184) \times 100$$

$$TMAR \approx 88,5\%$$

Relación Costo-Beneficio

Se determina con el cociente entre los beneficios percibidos por la empresa y los costos incurridos en un periodo de tiempo. Según los siguientes criterios se concluye:

Si el cociente es mayor que 1, entonces se acepta el proyecto.

Si el cociente es menor que 1, entonces se rechaza el proyecto.

A continuación, se establece en la Tabla 34 los costos y beneficios para la empresa en los próximos 5 años.

Tabla 34

Relación costo/beneficio

Año	Beneficios	Costos
0		\$ 8.610.922,24
1	\$ 7.475.306,72	\$ 5.907.914,24
2	\$ 8.249.534,92	\$ 6.821.423,00
3	\$ 9.082.497,66	\$ 7.858.554,38
4	\$ 10.022.283,88	\$ 9.073.946,60
5	\$ 11.033.342,48	\$ 10.453.831,71
Total	\$ 45.862.965,66	\$ 48.726.592,17

Nota. Elaboración Propia (2025).

$$B/C = \sum \text{Beneficios} / \sum \text{Costos} = \$ 45.862.965,66 / \$ 48.726.592,17 = 0,94$$

La relación costo-beneficio es 0,94 lo que significa por cada dólar gastado, se generan aproximadamente \$0,94 de ingresos, es decir, el proyecto no es rentable porque los beneficios no permiten obtener ganancias ni recuperar la inversión al ser menores que los costos, generando pérdidas.

Período de Retorno De Inversión

Este indicador como lo sugiere su nombre es el tiempo en el que toma recuperar la inversión inicial, para calcularlo se toma en cuenta el capital inicial, multiplicado por 12 que corresponden a los meses del año dividido entre el flujo de caja neto del primer año.

$$PRI = \text{Inversión inicial} \times 12 \text{ meses} / \text{Flujo de caja}$$

$$PRI = \$ 8.610.922,24 \times 12 \text{ meses} / \$ 1.034.479,04 = 99,89 \text{ meses}$$

El cálculo anterior demuestra que la inversión inicial debido a la no rentabilidad del proyecto se recuperaría en un período extremadamente largo de tiempo que es inaceptable.

Valor Actual Neto

El valor actual neto, también conocido como VAN, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. En la tabla 35 se muestran estos cálculos

Tabla 35

Valor actual neto

Año	Flujo de Caja (\$)	Factor de Descuento	Valor Actual
1	\$ 1.034.479,04	0,5308	\$ 549.228,01
2	\$ 942.553,86	0,2816	\$ 265.382,73
3	\$ 807.802,57	0,1494	\$ 120.650,28
4	\$ 625.902,61	0,0793	\$ 49.643,15
5	\$ 382.477,10	0,0420	\$ 16.070,03
			Total: \$ 1.000.974,20

Nota. Elaboración Propia (2025).

Inversión inicial: \$ 8.610.922,24

TMAR: 88,5%

$VAN = \$ 1.000.974,20 - \$ 8.610.922,24 = -\$ 7.609.948,04$

El Valor Actual Neto da un total de $-\$ 7.609.948,04$, al ser negativo se concluye que el proyecto no es rentable por lo que se rechaza.

Tasa Interna de Retorno

La TIR es la tasa de rendimiento promedio anual que genera un proyecto. Es el número que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero. Si la TIR es mayor que la tasa mínima de rendimiento (TMAR), el proyecto vale la pena. Para calcularla se realizaron una serie de cálculos en Microsoft Excel que arrojaron una TIR de un -38,6% por lo que al ser menor que la TMAR de 88,5% el proyecto se considera no rentable. En la Tabla 55 se muestra un análisis de la TIR.

Tabla 36

Análisis de la TIR

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Flujo neto	\$	\$	\$	\$	\$	\$
de caja	-8.610.922,24	1.034.479,04	942.553,86	807.802,57	625.902,61	382.477,10
TIR	-38,6%					

Nota. Elaboración Propia (2025).

Resultados o Hallazgos

Entre los resultados y hallazgos que se pueden destacar del presente estudio, es que si bien el hidrógeno verde es una alternativa bastante prometedora, es muchísimo más costosa que las fuentes de energía más tradicionales, esto se debe a que el hidrógeno es una tecnología que todavía sigue siendo muy prematura y que todavía sigue en una fase experimental, por lo tanto, los dispositivos y máquinas que funcionan con hidrógeno aún no han alcanzado economía de escala y no existen alternativas modulares que sean más económicas. Debido a esto, una planta eléctrica de hidrógeno queda fuera de competencia al ser muchísimo más costosa que las alternativas con diesel o gas natural.

Discusión

Este estudio de factibilidad tiene pocos precedentes en el escenario venezolano, por lo que fue casi imposible encontrar trabajos enfocados en el campo del hidrógeno realizados en el país. El proyecto más relevante fue un proyecto experimental realizado por Xinyu et al. (2021), para optar al título de Doctor en Filosofía de la Universidad de Nueva Gales del Sur, Australia, titulado Rendimiento y emisiones del hidrógeno-diésel inyección directa dual (H2DDI) en un motor monocilíndrico de ignición por compresión” (Traducción del original: Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine). Este trabajo tuvo como objetivo demostrar la aplicabilidad de un sistema de inyección dual diésel/hidrógeno con una mezcla compuesta de un 90% de hidrógeno y 10% de diésel, en ambos, el objetivo es la prevención de la formación de óxidos de nitrógeno y una reducción de las emisiones de dióxido de carbono en más de un 80%.

Conclusiones o Reflexiones

El estudio de factibilidad para la creación de una empresa encargada de la elaboración de plantas eléctricas a base de hidrógeno verde en la Ciudad de Barquisimeto, Estado Lara, se realizó bajo un esquema de tres etapas. La primera consistió en un estudio de mercado en el que se le aplicó una encuesta a las comercializadoras donde se ofrecen generadores eléctricos, las preguntas iban enfocadas en el

volumen de ventas, precios e interés de los clientes, así como el tipo de combustible utilizado por cada una.

El estudio de mercado arrojó que, si bien existe un desconocimiento general tanto de los comercializadores como de los clientes sobre el hidrógeno verde y sus beneficios, existe un optimismo por parte de estos posibles aliados comerciales en la venta de este tipo de plantas eléctricas. Respecto al análisis de la demanda y la proyección de esta en un período de 5 años se corresponde con la coyuntura de las fallas eléctricas prolongadas en el país, lo cual se corresponde en que la demanda de este tipo de productos en la ciudad de Barquisimeto se mantenga estable o aumente debido a la falta de soluciones en este aspecto en el corto o mediano plazo.

En el estudio técnico se pudo observar que para la elaboración de una planta eléctrica con sistema dual diésel-hidrógeno se parte de un generador base, cuyo motor tiene que ser modificado añadiendo un segundo sistema de inyección independiente que será el de inyección de hidrógeno para hacer el sistema dual de ambos combustibles, culminando en un inyector de gasoil y uno de hidrógeno en cada cilindro. También se observó la necesidad de maquinaria e infraestructura especializada como el electrolizador, el compresor y los tanques especializados para producir, comprimir y almacenar el hidrógeno. Debido a la necesidad de esta maquinaria, sumado además a las grandes dimensiones de las plantas eléctricas de 150 KVA se consideró necesario un galpón con gran amplitud para poder llevar a cabo correctamente el proceso productivo y almacenamiento tanto de insumos como del producto terminado.

No obstante, el estudio económico-financiero demostró que los insumos y la maquinaria industrial especializada para trabajar con hidrógeno tienen un costo elevado, lo cual encarece el producto final, dejándolo fuera de competencia con las plantas eléctricas que funcionan únicamente con gasoil. Además, pese a que la demanda aumenta, se puede observar que los flujos de caja se reducen por cada año, con estos datos se pudo constatar en el análisis financiero que el proyecto tiene una relación costo beneficio de 0,94, un período de retorno de inversión excesivamente largo y por lo tanto inaceptable, una tasa interna de retorno de -38,6%, inferior a la tasa mínima de rendimiento aceptable de 88,5% y por último, un valor actual neto de -\$ 7.609.948,04, se concluye que el proyecto no es rentable.

Referencias

- Xinyu, L., Aleš, S., Ho Lung, Y., Sanghoon, K., Qing Nian, C. & Evatt R, Hawkes. (2021). Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(1), 1302-1314. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.006>

ASISTENTE INTELIGENTE DE COMPRAS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL ESPECIALIZADA

INTELLIGENT SHOPPING ASSISTANT WITH SPECIALIZED ARTIFICIAL INTELLIGENCE

María Elisa Rojas¹



<https://orcid.org/0009-0002-0071-8146>

Recibido: 14-05-2026

Aceptado: 23-06-2026

Resumen

El siguiente artículo, cuyo objetivo es desarrollar un asistente de compras con inteligencia artificial especializada, integrado en el microcontrolador ESP32-S3, capaz de consultar información en tiempo real del inventario para automatizar la atención al cliente en establecimientos minoristas. La investigación se enmarcó en la modalidad de proyecto factible con carácter de campo, descriptivo, responde a la necesidad de comercios de pequeña y mediana escala de contar con herramientas accesibles para la consulta autónoma de información. El sistema desarrollado, denominado MIA (Módulo de Inteligencia Artificial), integra hardware embebido compuesto por un microcontrolador ESP32-S3, micrófono digital INMP441, amplificador de audio MAX98357A y pantalla circular GC9A01. La arquitectura de software se estructuró en seis etapas: activación, captura de voz, transcripción, procesamiento conversacional, síntesis de voz y reproducción. La incorporación dinámica del inventario mediante recuperación contextual ligera permitió generar respuestas coherentes y especializadas. Las pruebas arrojaron un índice de coherencia global del 100%, una precisión de transcripción del 90% y tiempos de respuesta de entre 17 y 26 segundos por ciclo. Los resultados confirman la viabilidad técnica y económica de incorporar inteligencia artificial conversacional en dispositivos de bajo costo para la modernización del comercio minorista.

Palabras clave: inteligencia artificial; ESP32-S3; sistemas embebidos; atención al cliente; comercio minorista.

Abstract

This study aimed to develop a specialized artificial intelligence-powered shopping assistant, integrated into an ESP32-S3 microcontroller, capable of querying real-time inventory information to automate customer service in retail establishments. The research was framed within the feasible project modality with a technological focus, addressing the need for small and medium-sized retailers to have accessible tools for autonomous information retrieval. The developed system, named MIA (Artificial Intelligence Module), integrates embedded hardware consisting of an ESP32-S3 microcontroller, an INMP441 digital microphone, a MAX98357A audio amplifier, and a GC9A01 circular display. The software architecture was structured into six stages: activation, voice capture, transcription, conversational processing, speech synthesis, and playback. The dynamic incorporation of inventory data through lightweight contextual retrieval allowed the assistant to generate coherent and specialized responses within the defined commercial domain. Evaluation tests yielded a global coherence index of 100%, a transcription accuracy rate of 90%, and response times between 17 and 26 seconds per cycle. The results confirm the technical and economic feasibility of incorporating conversational artificial intelligence into low-cost embedded devices for the modernization of the retail sector.

Keywords: artificial intelligence; ESP32-S3; embedded systems; customer service, retail.

¹ Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: y-28388257@Micorreo.uny.edu.ve

Introducción

En el contexto actual del comercio minorista, la atención al cliente representa uno de los factores más determinantes en la experiencia de compra y, al mismo tiempo, uno de los eslabones con mayor fragilidad operativa. Los establecimientos de pequeña y mediana escala enfrentan una tensión estructural permanente: mientras el consumidor moderno exige respuestas inmediatas, información precisa y trato personalizado, el modelo tradicional de atención depende casi exclusivamente de la disponibilidad y el conocimiento del personal de ventas. Esta dependencia genera tiempos de espera, saturación del personal en horas pico, errores en la transmisión de información y una experiencia fragmentada que contrasta directamente con las expectativas de un consumidor cada vez más informado y exigente.

En la última década, el avance del procesamiento de datos impulsado por la Inteligencia Artificial (IA) ha redefinido las fronteras de la automatización. Investigaciones previas han explorado el potencial de estas tecnologías en entornos comerciales: Vázquez García (2024) analizó la implementación de chatbots basados en IA generativa en organizaciones del mercado español, concluyendo que estos sistemas ofrecen una precisión comparable a la humana en la gestión de servicios al cliente. En el ámbito de los sistemas embebidos, Benito (2019) documentó las capacidades del microcontrolador ESP32 para aplicaciones IoT conectadas a servicios en la nube, demostrando su robustez para prototipos de bajo costo. Por su parte, Lewis et al. (2021) exploraron arquitecturas que combinan modelos de lenguaje con recuperación de información contextual, demostrando que es posible consultar bases de datos específicas en tiempo real reduciendo significativamente los errores de alucinación en las respuestas generadas.

En ese marco, este trabajo propone el desarrollo de MIA (Módulo de Inteligencia Artificial), un asistente inteligente de compras integrado en el microcontrolador ESP32-S3. A diferencia de los asistentes de respuesta preprogramada, MIA emplea modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM) a través de la API de OpenAI y una estrategia de recuperación contextual ligera que incorpora dinámicamente el inventario real del comercio como contexto de procesamiento, sin requerir motores de búsqueda semántica ni bases vectoriales. Esto permite al sistema generar respuestas sobre disponibilidad, precios, ubicación y recomendaciones de productos, restringiendo adecuadamente las consultas fuera del dominio comercial definido.

La investigación se enmarca en la línea de Innovación de procesos industriales y productos tecnológicos de la Universidad Yacambú (UNY) y tiene como propósito demostrar que es posible incorporar IA conversacional especializada en dispositivos embebidos de bajo costo como alternativa accesible para la modernización del comercio minorista de pequeña y mediana escala. El presente artículo se organiza en las siguientes secciones: materiales y métodos, donde se describe la arquitectura del

sistema y las fases de desarrollo; resultados, con las pruebas de evaluación del prototipo; discusión, donde se contrastan los hallazgos con la literatura existente; y conclusiones con las líneas de mejora identificadas.

Fundamentos Teóricos

La Inteligencia Artificial (IA) constituye un área de la informática orientada al desarrollo de sistemas capaces de ejecutar tareas que requieren capacidades cognitivas humanas. Según Russell y Norvig (2021), estos sistemas se orientan al razonamiento y la toma de decisiones basada en datos. En el contexto de esta investigación, la IA se emplea de forma especializada para optimizar la interacción en el dominio concreto del comercio minorista, restringiendo el comportamiento del asistente a la información real del inventario del establecimiento.

Una API (Application Programming Interface) es un conjunto de reglas y protocolos que permite que diferentes aplicaciones se comuniquen entre sí, intercambiando datos y funcionalidades mediante solicitudes estructuradas. En este sentido, IBM (2024) señala que una API permite que distintas aplicaciones de software interactúen entre sí, posibilitando la integración y reutilización de servicios dentro de entornos digitales interconectados. En el presente proyecto, las APIs de OpenAI constituyen el núcleo del procesamiento cognitivo del sistema, delegando en la nube las tareas de transcripción de voz, procesamiento conversacional y síntesis de audio que el microcontrolador no puede ejecutar localmente.

Un sistema embebido es un sistema informático diseñado para realizar funciones específicas dentro de un dispositivo mayor, generalmente con restricciones de hardware (Wolf, 2017). Dentro de esta categoría, el módulo ESP32-S3 WROOM N16R8 destaca por integrar conectividad WiFi, una arquitectura de doble núcleo Xtensa LX7 y memoria extendida de 16 MB Flash y 8 MB PSRAM, características que lo convierten en un componente idóneo para prototipos de bajo costo que requieren procesar tareas de complejidad media y mantener conectividad estable con servicios en la nube. Según Maier et al. (2017), estas características hacen del ESP32 una plataforma adecuada para aplicaciones IoT de bajo consumo donde coexisten tareas de captura de señal, comunicación inalámbrica y control de periféricos.

El Internet de las Cosas (IoT) consiste en la interconexión de objetos físicos mediante redes digitales, permitiendo la comunicación entre dispositivos y el procesamiento de información del entorno. Evans (2011) sostiene que la integración de IoT posibilita la interacción desde dispositivos ubicados físicamente en el punto de venta con bases de datos remotas, permitiendo el procesamiento de solicitudes en tiempo real. En el sistema desarrollado, el ESP32-S3 actúa como nodo IoT que conecta el entorno físico del comercio con los servicios de inteligencia artificial en la nube.

La recuperación contextual ligera, estrategia adoptada en este trabajo, consiste en suministrar al modelo de lenguaje información específica del dominio antes de generar la respuesta, sin requerir indexación semántica ni bases vectoriales. A diferencia de los modelos de lenguaje generales, que responden únicamente con base en el conocimiento adquirido durante su entrenamiento, este enfoque permite incorporar información actualizada y específica del entorno operativo. Sus principales ventajas son la actualización dinámica de la información sin necesidad de reentrenamiento del modelo, el control del dominio de respuesta limitando la generación a datos específicos del comercio, y la simplicidad de implementación en dispositivos embebidos con recursos limitados.

Finalmente, la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se refiere a la capa de interacción entre el usuario y el sistema electrónico. Según Shneiderman et al. (2016), en sistemas físicos comerciales es fundamental que la interfaz sea intuitiva y reduzca la curva de aprendizaje del usuario. En MIA, esta interfaz se materializa a través de dos canales complementarios: la interacción por voz mediante el micrófono INMP441 y el altavoz conectado al amplificador MAX98357A, y la retroalimentación visual mediante la pantalla circular GC9A01, que comunica el estado operativo del asistente en tiempo real.

Materiales y Métodos

La investigación se definió bajo la modalidad de Proyecto Factible con carácter de campo descriptivo, orientada a la creación de un prototipo funcional mediante la aplicación de conocimientos de ingeniería, microcontroladores e inteligencia artificial. Según Arias (2012), esta modalidad permite el diseño de soluciones tecnológicas sustentadas en un diagnóstico de necesidades, lo que se corresponde con el enfoque adoptado. El diseño fue de campo, descriptivo, organizado en cuatro fases metodológicas: diagnóstico de necesidades, estudio de factibilidad, diseño, construcción, evaluación y pruebas técnicas.

Fase I: Diagnóstico de Necesidades

En esta fase se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la situación actual de la atención al cliente en el sector minorista, con el propósito de identificar las brechas tecnológicas que podían ser atendidas mediante un sistema embebido. El proceso se sustentó en una revisión de fuentes especializadas en inteligencia artificial, sistemas de control basados en microcontroladores y protocolos de comunicación inalámbrica, lo que permitió establecer el estado del arte y definir los criterios de desempeño técnico que el prototipo debía alcanzar. A partir de este diagnóstico se identificaron como requerimientos fundamentales: conectividad inalámbrica estable, procesamiento de voz en lenguaje natural, capacidad de consulta de inventario en tiempo real y retroalimentación visual del estado del sistema.

Tabla 1*Personal involucrado en la investigación*

Personal	Oficio/Rol
Estudiante María Elisa Rojas Botello	Realización e implementación del estudio
Tutor Douglas Domínguez	Revisión y asesorías

Nota. Elaboración propia.**Tabla 2***Cronograma de Ejecución*

Fase	Semanas
Diagnóstico y planificación	2
Diseño y desarrollo del prototipo	3
Pruebas funcionales del prototipo	2
Ajustes y documentación final	1

Nota. Elaboración propia.**Fase II: Estudio de Factibilidad**

El estudio de factibilidad permitió determinar la viabilidad real de la propuesta desde tres dimensiones. En términos de factibilidad técnica, se constató la disponibilidad en el mercado de los componentes electrónicos esenciales y del ecosistema de software necesario, incluyendo entornos de desarrollo como VS Code y la infraestructura de servicios en la nube de OpenAI. En cuanto a la factibilidad operativa, se verificó que el prototipo podía integrarse en escenarios simulados para validar su funcionamiento sin afectar procesos existentes. Respecto a la factibilidad económica, se elaboró un presupuesto detallado que contempló los componentes de hardware y los costos de los servicios de procesamiento de inteligencia artificial, resultando en una inversión total de 46,34 euros, significativamente inferior a las soluciones comerciales equivalentes disponibles en el mercado.

Tabla 3

Presupuesto del Prototipo Tecnológico

Componente	Cantidad	Costo total	Observaciones
ESP32-S3 WROOM N16R8	1	9,46 €	Microcontrolador con WiFi/Bluetooth
Módulo de micrófono INMP441	1	3,27 €	Para entrada de voz del usuario
Amplificador MAX98357 I2S	1	5,95 €	
Altavoz 40mm	1	3,75 €	Para salida de voz de la IA
Saldo de OpenAI inicial	-	5 €	Saldo para pruebas
Placa de fibra de vidrio perforada	1	6,23 €	Placa perforada para soldar los componentes
Pantalla GC9A01 240x240	1	7,68	Pantalla circular
Otros (cables jumper, estaño, etc.)	-	5 € aprox	Materiales adicionales para pruebas
Total Inversión		46,34 €	

Nota. Elaboración propia.**Fase III: Diseño y Construcción del Prototipo**

Esta fase materializó la arquitectura tecnológica del sistema, integrando hardware de procesamiento de señal digital con servicios de inteligencia artificial en la nube. El diseño comprendió tres componentes principales: la arquitectura de hardware, la arquitectura de software y el flujo de datos entre ambas capas.

Arquitectura de Hardware

Se utiliza el microcontrolador ESP32-S3 WROOM N16R8, seleccionado por su amplia memoria PSRAM y Flash, indispensables para el manejo de buffers de audio. Los periféricos y protocolos de comunicación se configuran de la siguiente manera:

Sistema de Adquisición y Salida de Audio

Se implementa el protocolo I2S (Inter-IC Sound) para garantizar una transferencia de datos de audio digital libre de ruido. El micrófono INMP441 captura la voz del usuario, mientras que el amplificador MAX98357 gestiona la señal hacia un altavoz de 40mm para la reproducción de la respuesta sintetizada. Los pines asignados al bus I2S son: WS (GPIO 11), SD (GPIO 13) y SCK (GPIO 12).

Interfaz Táctil

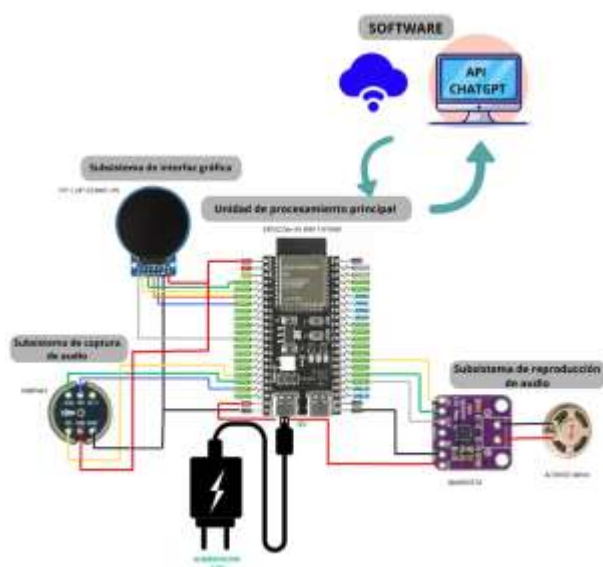
Para el control de interacción, se configura el GPIO 9 como sensor táctil capacitivo (TOUCH_PIN), el cual actúa como disparador de la interrupción que inicia el ciclo de escucha. Este mecanismo permite al usuario activar el asistente de forma intuitiva con un simple toque, sin necesidad de botones físicos.

Interfaz Visual

La retroalimentación visual del sistema se gestiona mediante la pantalla circular LCD GC9A01 de 240×240 píxeles, conectada al microcontrolador a través del protocolo SPI. Esta pantalla presenta al usuario el estado operativo del asistente en tiempo real mediante un sistema de colores, símbolos e iconos de interpretación intuitiva. Los estados representados son: en espera (idle), escuchando, procesando y respondiendo. Adicionalmente, durante la fase de respuesta, la pantalla puede mostrar fragmentos del texto generado o información relevante del producto consultado, ofreciendo así una experiencia multimodal que complementa la interacción por voz.

Figura 1

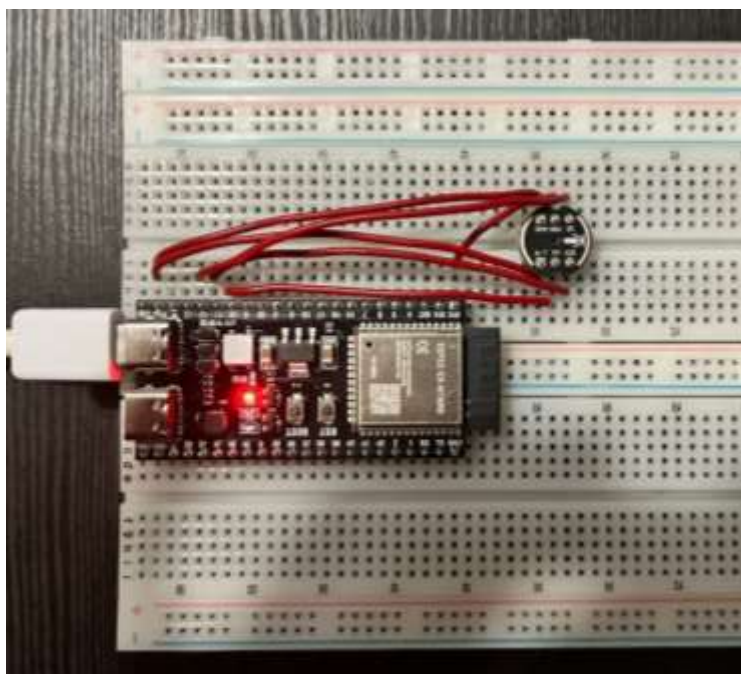
Diagrama de conexiones del sistema.



Nota. Elaboración propia.

Figura 2

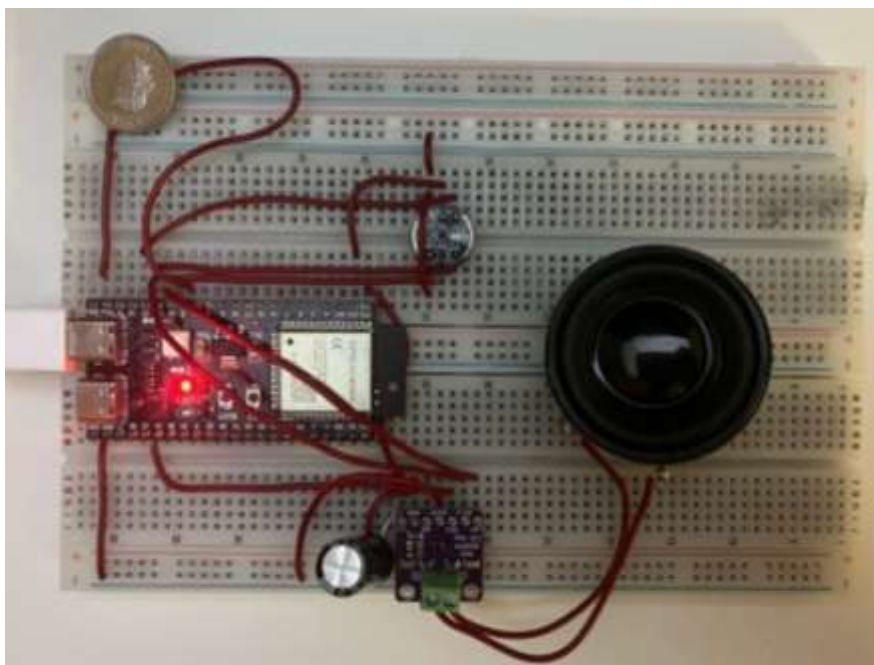
Integración progresiva de los componentes del circuito 1



Nota. Elaboración propia.

Figura 3

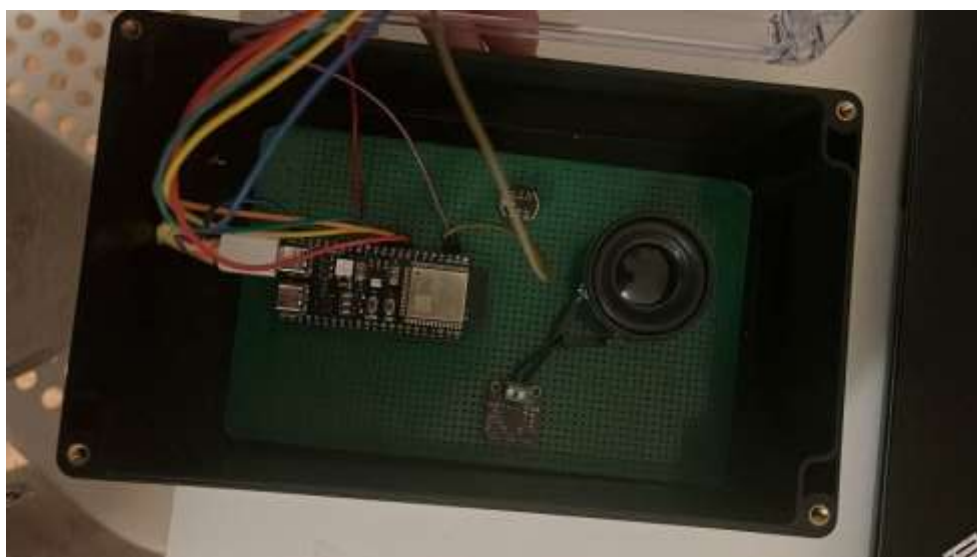
Integración progresiva de los componentes del circuito 3



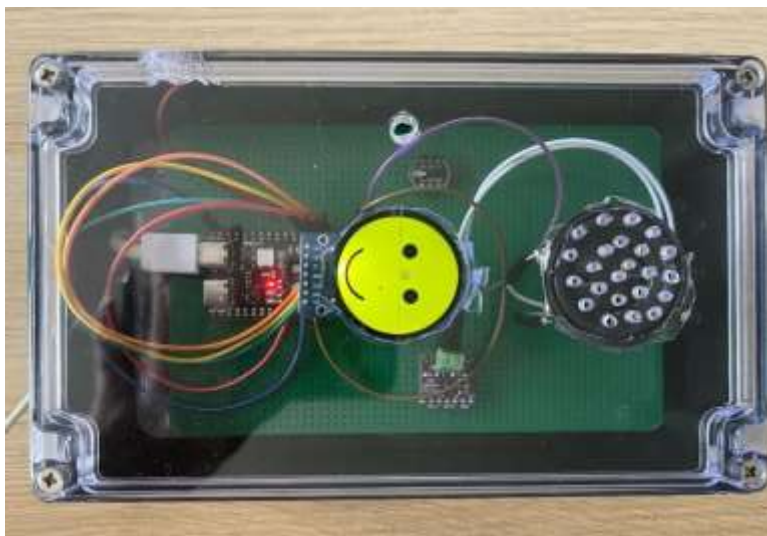
Nota. Elaboración propia.

Figura 4

Integración progresiva de los componentes del circuito 4



Nota. Elaboración propia.

Figura 5*Imagen del prototipo ya montado*

Nota. Elaboración propia.

Arquitectura de Software y Flujo de Datos

El software del sistema fue diseñado siguiendo un flujo operativo secuencial dividido en etapas funcionales claramente definidas. Cada etapa representa una fase del proceso de interacción entre el usuario y el asistente inteligente, permitiendo transformar una solicitud por voz en una respuesta audible generada mediante inteligencia artificial.

Etapas 1: Activación del Asistente

El sistema permanece en estado de espera hasta que el usuario activa el asistente mediante contacto sobre el sensor táctil capacitivo conectado al ESP32-S3. El microcontrolador supervisa continuamente el valor leído mediante la función `touchRead()`, comparándolo con un umbral previamente establecido. Cuando el valor detectado supera dicho umbral, el software identifica una activación válida e inicia el proceso completo de interacción. La detección se realiza únicamente ante una transición desde estado inactivo a activo, evitando ejecuciones repetidas durante un mismo contacto.

El almacenamiento local del sistema se implementa mediante el sistema de archivos FFat integrado en la memoria flash del ESP32-S3, lo que permite gestionar información persistente necesaria para el funcionamiento autónomo del asistente.

Etapas 2: Captura de Audio

Una vez activado el sistema, el ESP32-S3 configura el periférico I2S en modo recepción para establecer comunicación directa con el micrófono digital INMP441 y proceder a la captura de la voz del usuario.

El micrófono transmite audio digital en formato de 32 bits a una frecuencia de muestreo de 16 kHz. Dado que los datos útiles se encuentran en los bits más significativos de cada muestra, el software aplica un desplazamiento binario para convertirlas al formato de 16 bits, adecuado para su almacenamiento y procesamiento posterior.

El audio capturado se guarda en la memoria flash interna como un archivo WAV denominado *rec.wav*, incluyendo su cabecera correspondiente para garantizar compatibilidad con servicios externos de reconocimiento de voz. Este archivo actúa como intermediario entre la captura local y la etapa de transcripción en la nube. La grabación se realiza durante un tiempo previamente definido, asegurando estabilidad en el uso de memoria del sistema embebido.

Etapas 3: Transcripción de Voz (Speech-to-Text)

Finalizada la grabación, el archivo de audio es enviado mediante conexión WiFi a un servicio de reconocimiento automático de voz, con el fin de convertir la señal acústica capturada en texto digital interpretable por el sistema.

El ESP32-S3 construye una solicitud HTTP que incluye el archivo WAV y la transmite hacia el servidor remoto. El servicio procesa el audio mediante modelos de inteligencia artificial especializados en reconocimiento del habla y devuelve una respuesta en formato JSON que contiene la transcripción textual de la consulta del usuario, la cual constituye la entrada lingüística del asistente inteligente.

Etapas 4: Procesamiento Conversacional

Durante esta fase, el software incorpora tanto la consulta del usuario como información contextual relacionada con el comercio, incluyendo el catálogo de productos almacenado localmente. El modelo analiza la solicitud considerando dicho contexto y genera una respuesta coherente dentro del dominio comercial definido.

El catálogo de productos utilizado para especializar el comportamiento del asistente se descarga desde una fuente externa durante la primera ejecución del sistema y permanece almacenado en memoria flash, evitando descargas repetidas. Durante cada consulta, el catálogo es leído y convertido en texto estructurado que se incorpora como contexto al modelo de lenguaje, permitiendo generar respuestas basadas en información real del comercio. Esta etapa representa el núcleo cognitivo del asistente, donde se produce la interpretación semántica y la generación de respuestas inteligentes.

Configuración de APIs. El ESP32-S3 utiliza APIs proporcionadas por OpenAI para delegar tareas de procesamiento avanzado que no pueden ejecutarse localmente debido a las limitaciones de hardware propias de los sistemas embebidos.

El acceso a estos servicios se realiza mediante una clave de autenticación (API Key) vinculada a una cuenta personal con saldo previamente cargado. OpenAI opera bajo un modelo de facturación por uso, en el cual el costo de cada solicitud depende del volumen de datos procesados, específicamente:

- La cantidad de audio procesado (transcripción),
- El número de tokens generados y procesados (procesamiento conversacional),
- La duración del audio sintetizado (síntesis de voz).

Si el saldo disponible se agota, las solicitudes devuelven errores de autenticación o facturación y el sistema deja de operar correctamente. Por razones de seguridad, la clave de autenticación debe mantenerse confidencial y no debe incluirse directamente en el código fuente ni exponerse en repositorios públicos, ya que su uso genera costo económico. En un entorno de producción, esta clave debería gestionarse mediante variables de entorno o mecanismos seguros de almacenamiento.

API de Reconocimiento de Voz. Corresponde al sistema Whisper de OpenAI, cuya función consiste en recibir un archivo de audio y convertirlo en texto mediante modelos entrenados para identificar lenguaje hablado en múltiples idiomas. El ESP32-S3 envía el archivo grabado mediante una solicitud HTTP de tipo multipart/form-data y recibe como respuesta un objeto JSON con el texto reconocido.

API de Procesamiento Conversacional. Este servicio permite interactuar con modelos de lenguaje capaces de comprender contexto y generar respuestas en lenguaje natural. En el sistema desarrollado se emplea el modelo gpt-4o-mini, al cual el microcontrolador envía conjuntamente las instrucciones de comportamiento del asistente, la información del catálogo y la consulta del usuario. El modelo procesa estos elementos y genera una respuesta textual contextualizada.

API de Síntesis de Voz. Esta API convierte texto en audio mediante técnicas de síntesis de voz (Text-to-Speech). El sistema envía la respuesta textual generada y recibe como resultado un archivo de audio en formato WAV producido por el modelo tts-1, cerrando el ciclo conversacional con una respuesta audible.

Personalización del Modelo de Lenguaje. Con el objetivo de adaptar el comportamiento del modelo al entorno del comercio minorista, se implementó un proceso de personalización mediante el uso de un prompt de sistema. Para las pruebas experimentales, se definió la identidad del asistente como MIA (Microprocesador–Inteligencia–Artificial), concebida como asistente virtual de un supermercado, lo que permite simular escenarios reales de asistencia al cliente en un entorno de compras.

El prompt utilizado establece reglas de comportamiento, personalidad conversacional y limitaciones de respuesta:

"Eres Mia, asistente virtual de un supermercado. Eres amable y atenta. Solo puedes responder usando información del catálogo proporcionado. Si un producto o categoría no existe en el catálogo: - indica que no está disponible. - No inventes ubicaciones, precios ni productos. Si la pregunta no está relacionada con compras o productos: - responde amablemente que solo puedes ayudar con productos del supermercado. Nunca respondas preguntas de cultura general, chistes o explicaciones académicas. Los horarios de apertura y cierre son todos los días de 8 horas a 21 horas";

La identidad y las restricciones del asistente pueden modificarse fácilmente para adaptarse a distintos tipos de comercio, lo que demuestra la flexibilidad del sistema desarrollado. La especialización se refuerza mediante la incorporación dinámica del catálogo de inventario almacenado localmente, el cual constituye la fuente de conocimiento utilizada por el modelo para responder consultas sobre productos disponibles, recomendaciones y asistencia durante el proceso de compra. De esta manera, el modelo general de lenguaje se transforma en un asistente especializado capaz de operar dentro de un dominio comercial específico.

Etapas 5: Síntesis de Voz (Text-to-Speech)

La respuesta textual generada es enviada a un servicio de síntesis de voz, el cual la transforma en una señal de audio que simula voz humana. El archivo resultante es recibido por el ESP32-S3 y almacenado como tts.wav en su memoria interna, lo que permite su reproducción inmediata sin requerir transmisión continua de datos.

Etapas 6: Reproducción de Respuesta

Finalmente, el sistema reconfigura el periférico I2S en modo transmisión para enviar la señal digital hacia el amplificador MAX98357A y el altavoz integrado. Antes de la reproducción, el software analiza la cabecera del archivo WAV para sincronizar automáticamente la frecuencia de muestreo del hardware. Durante la emisión se aplica un ajuste digital de volumen junto con un limitador que previene la saturación o distorsión sonora. Con esta etapa se completa el ciclo de interacción voz–procesamiento–respuesta del asistente inteligente.

Flujo de Datos

Desde el punto de vista arquitectónico, el sistema implementado sigue un flujo de datos secuencial que describe cómo la información generada por el usuario es capturada, procesada y transformada en una respuesta audible. El software se organiza mediante funciones independientes que

gestionan cada etapa del procesamiento, permitiendo separar las tareas de conectividad, captura de audio, procesamiento en la nube y reproducción de la respuesta, como se observa en la figura 10.

1. El usuario realiza una consulta por voz. La señal de audio es capturada por el módulo INMP441 mediante la interfaz I2S y almacenada en memoria flash por la función `recordAudio()`.
2. El dispositivo establece conexión con la red mediante la función `connectWiFi()`, habilitando la comunicación con los servicios externos.
3. El audio capturado es enviado a la API mediante una solicitud HTTP autenticada. La función `transcribeAudio()` gestiona el envío del archivo y la recepción de la transcripción generada por el servidor.
4. El texto resultante es procesado por el modelo conversacional a través de la función `askMIA()`, que envía la consulta al servicio de inteligencia artificial y recibe la respuesta generada.
5. El texto de respuesta es convertido en audio mediante la función `generateTTS()`, que solicita al servicio de síntesis de voz la generación del archivo de audio correspondiente.
6. Finalmente, el audio recibido es reproducido a través del altavoz mediante la función `playWav()`, completando el ciclo de interacción con el usuario.

De este modo, el sistema transforma progresivamente la información a lo largo del proceso: audio → texto → respuesta textual → audio, permitiendo una interacción conversacional natural entre el usuario y el asistente inteligente.

Figura 6

Captura de pantalla del loop con todas las etapas del programa

```

109 void loop() {
110
111     vTaskDelay(10 / portTICK_PERIOD_MS);
112     static bool lastTouched = false;
113     int touchValue = touchRead(TOUCH_PIN);
114     bool isTouched = (touchValue > TOUCH_THRESHOLD);
115
116     // --- Si se activa el sistema ---
117     if ((lastTouched && isTouched) {
118
119         etapaActual = "TRABAJANDO";
120
121         // --- ETAPA 1: ACTIVACIÓN ---
122         startStage("ETAPA 1: ACTIVACIÓN DEL ASISTENTE");
123
124         vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);
125         setupTTS_KK();
126         vTaskDelay(100 / portTICK_PERIOD_MS);
127
128         // --- ETAPA 2: CAPTURA DE AUDIO ---
129         recordAudio();
130         i2s_driver_uninstall(I2S_PORT);
131         vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);
132
133         // --- ETAPA 3: TRANSCRIPCIÓN ---
134         String question = transcribeAudio();
135
136         // --- Si hay texto ---
137         if (question.length() > 2) {
138             Serial.println("Pregunta: " + question);
139
140             // --- ETAPA 4: IA ---
141             String response = askGPT(question);
142
143             // --- ETAPA 5: Síntesis de voz ---
144             generateTTS(response);
145             setupI2S_TX();
146             vTaskDelay(100 / portTICK_PERIOD_MS);
147
148             // --- ETAPA 6: REPRODUCCIÓN ---
149             playMp3(TTS_FILE, response);
150             i2s_driver_uninstall(I2S_PORT);
151             vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);
152         }
153
154         // --- Volver a la espera ---
155         Serial.println("Sistema en espera...");
156         etapaActual = "NADA";
157         vTaskDelay(500 / portTICK_PERIOD_MS);
158     }
159     if ((!isTouched && etapaActual != "TRABAJANDO") {
160         mostrarEspera();
161     }
162     lastTouched = isTouched;
163 }

```

Nota. Elaboración propia.

Fase IV: Evaluación y pruebas técnicas

La fase de evaluación comprendió cuatro pruebas diseñadas para verificar el desempeño, la estabilidad y el cumplimiento de los requisitos establecidos durante el diseño.

La prueba de sensibilidad del micrófono evaluó la capacidad del sensor INMP441 para captar señales de voz a distintas distancias y niveles de intensidad sonora. Se midió la amplitud RMS de la señal capturada y la precisión de la transcripción resultante a 10 cm y 30 cm de distancia, en ambiente silencioso, con el objetivo de determinar el rango de funcionamiento óptimo del micrófono.

Tabla 4

Pruebas de sensibilidad del micrófono

Nº	Distancia (cm)	Voz	Ambiente	Fs (Hz)	RMS	Transcripción	Resultado	Observaciones
1	10	Norma I	Silencioso	16000	0.042	“¿Dónde está el arroz?”	Correcta	Señal estable
2	30	Baja	Silencioso	16000	0.015	“donde está el arroz”	Parcial	Baja amplitud

Nota. Elaboración propia.

La prueba de éxito de transcripción consistió en 20 consultas realizadas bajo condiciones de silencio y ruido moderado, comparando el texto esperado con el texto generado por el sistema. Los resultados se clasificaron en tres categorías: correctos (coincidencia semántica completa, aunque faltasen tildes o signos de puntuación menores), parciales (error menor que no alteró completamente el significado) e incorrectos (cambio significativo de sentido o pérdida de palabras clave).

La prueba de latencia midió el tiempo individual de cada una de las seis etapas del ciclo de procesamiento en 10 iteraciones consecutivas, con el fin de identificar los cuellos de botella del sistema y evaluar si el tiempo total de respuesta era adecuado para una interacción fluida en el punto de venta.

Figura 7

Ejemplo de prueba de latencia

```

Output  Serial Monitor X
Message (Enter to send message to TSP1253 Dev Module on COM5)

ETAPA 1: ACTIVACION DEL ASISTENTE
Duración: 151 ms
ETAPA 2: CAPTURA DE AUDIO
Duración: 4535 ms
ETAPA 3: TRANSCRIPCIÓN (Speech-to-Text)
Duración: 1478 ms
Pregunta: ¿Dónde se encuentran las frutas?
ETAPA 4: PROCESAMIENTO CONVERSACIONAL
Duración: 1846 ms
ETAPA 5: SÍNTESIS DE VOZ
Duración: 5346 ms
ETAPA 6: REPRODUCCIÓN
Duración: 5303 ms
Sistema en espera...

```

Nota. Elaboración propia.

La prueba de coherencia evaluó 20 respuestas generadas por MIA ante consultas de cuatro categorías: disponibilidad de productos, ubicación, precio y recomendaciones, más un grupo de preguntas deliberadamente fuera del dominio comercial (cultura general, chistes, explicaciones académicas) para

evaluar la robustez del sistema. Cada respuesta fue calificada mediante tres criterios: precisión (grado en que la información proporcionada es correcta), relevancia (nivel de relación entre la respuesta y el contexto del sistema) y concordancia (coherencia lógica entre la pregunta y la respuesta generada), cada uno en escala de 1 a 3 puntos, para una puntuación máxima de 9 por respuesta y 180 puntos en total.

Resultados

La prueba de sensibilidad del micrófono mostró que, a 10 cm de distancia en ambiente silencioso, el sistema registró una amplitud RMS de 0,042 con transcripción correcta; a 30 cm, la amplitud descendió a 0,015, produciendo transcripciones parciales por baja señal. La distancia de uso óptima se sitúa entre 10 y 20 cm del usuario.

La prueba de éxito de transcripción sobre 20 consultas arrojó 14 correctas (70%), 4 parciales (20%) y 2 incorrectas (10%), para una precisión global del 90%. Los errores se concentraron en condiciones de ruido moderado con frases cortas o fonéticamente ambiguas. En ambiente silencioso, la precisión fue del 100%.

La prueba de latencia reveló un tiempo promedio total de 22,8 segundos por ciclo completo, distribuidos así: activación 0,15 s, captura de audio 4,6 s, transcripción 1,9 s, procesamiento conversacional 1,8 s, síntesis de voz 7,5 s y reproducción 6,4 s. El tiempo mínimo registrado fue de 17,0 s y el máximo de 26,4 s. Las etapas de síntesis y reproducción concentraron el 60,7% del tiempo total, condicionadas por los servicios en la nube y la duración de las respuestas generadas.

La prueba de coherencia sobre 20 respuestas obtuvo una puntuación total de 180/180, equivalente a un índice de coherencia global del 100%. En todas las categorías —disponibilidad, ubicación, precio, recomendaciones y preguntas fuera del dominio—, el asistente generó respuestas con puntuación máxima en precisión, relevancia y concordancia. Ante preguntas fuera del dominio comercial (cultura general, chistes, explicaciones académicas), MIA declinó correctamente la consulta e indicó que solo podía asistir con productos del establecimiento.

Tabla 5

Prueba de éxito de transcripción

Nº	Ambiente	Texto esperado	Texto transcrito	Resultado	Observaciones
1	Silencioso	“¿Dónde está el arroz?”	¿Dónde está el arroz?	Correcta	

2	Silencioso	“¿Cuánto cuesta la leche entera?”	¿Cuánto cuesta la leche entera?	Correcta	
3	Ruido moderado	“¿Tienen pan integral?”	¡Tienen pan integral!	Parcial	Ofrece la respuesta correcta
4	Ruido moderado	“¿Dónde se encuentran las frutas?”	¿Dónde se encuentran las fritas?	Parcial	Ofrece la respuesta correcta
5	Ruido moderado	“¿Cuál es la capital de Nigeria?”	¿Cuál es la capital de Nigeria?	Correcta	
6	Silencioso	“¿Dónde están los huevos?”	¿Dónde están los huevos?	Correcta	
7	Silencioso	“¿Tienen aceite de oliva?”	Tienen aceite de oliva	Correcta	
8	Silencioso	“¿Cuál es el precio del azúcar?”	¡Otra vez el pez sin el azúcar!	Incorrecta	Ofrece respuesta incorrecta
9	Ruido moderado	“Busco pasta para lasaña.”	Busco pasta para lasaña	Correcta	
10	Ruido moderado	“¿Dónde encuentro bebidas sin azúcar?”	donde encuentro bebidas sin azúcar	Parcial	

11	Ruido moderado	“Estoy buscando algo económico para preparar una cena.”	Estoy buscando algo económico para preparar una cena.	Correcta	
12	Ruido moderado	“¿Me puedes recomendar algo para el desayuno que no tenga lactosa?”	¿Me puedes recomendar algo para el desayuno que no tenga lactosa?	Correcta	
13	Ruido moderado	“Necesito ingredientes para hacer una ensalada.”	Necesito ingredientes para hacer una ensalada.	Correcta	
14	Ruido moderado	“¿Tienen pan sin gluten?”	¿Tienen pan sin gluten?	Correcta	
15	Ruido moderado	“¿Hay ofertas hoy?”	Adiós gente soy...	Incorrecta	
16	Ruido moderado	“¿Hay ofertas hoy?”	¿Hay oferta hoy?	Parcial	Se repitió la pregunta anterior que transcribió incorrectamente
17	Ruido moderado	“¿Tienen pollo empanizado?”	¿Tienen pollo empanizado?	Correcta	

18	Ruido moderado	“¿Tienen jamón serrano?”	¿Tienen jamón serrano?	Correcta
19	Ruido moderado	“¿Quién inventó el Internet?”	¿Quién inventó el internet?	Correcta
20	Ruido moderado	“¿Qué hora es?”	¿Qué hora es?	Correcta

Nota. Elaboración propia.

Total de pruebas: 20

Correctas: 14 (70%)

Parciales: 4 (20%)

Incorrectas: 2 (10%)

Precisión global: 90%

Correcta → Coincidencia semántica completa (aunque falten tildes).

Parcial → Error menor que no altera completamente el significado.

Incorrecta → Cambio significativo de sentido o pérdida de palabras clave.

Tabla 6

Tiempos individuales por fase (ms)

Nº	Activación	Captura	Transcripción	Procesamiento	Síntesis	Reproducción	Total
1	151	4535	1478	1846	5346	5303	18659
2	152	4655	2303	2452	7394	8614	25570
3	152	4681	1751	1745	9230	8364	25923
4	152	4551	1676	2254	5620	3175	17428

5	151	4507	1687	1332	6742	6153	20572
6	151	4704	2418	1742	8806	7665	25486
7	152	4525	2088	1535	9064	9028	26392
8	151	4536	1557	2155	8678	7916	24993
9	151	4589	2243	1325	5067	3652	17027
10	151	4676	1739	1636	9251	8428	25881

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7

Promedios de latencia

Fase	Promedio (ms)	Promedio (s)
Activación	151	0.15 s
Captura	4596	4.6 s
Transcripción	1894	1.9 s
Procesamiento	1802	1.8 s
Síntesis	7520	7.5 s
Reproducción	6430	6.4 s
TOTAL	22793	22.8 s

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8

Resultados prueba de coherencia.

Nº	Categoría	Pregunta	Respuesta MIA	Precisión (1-3)	Relevancia (1-3)	Concordancia (1-3)	Global (1-9)	Observaciones
1	Disponibilidad	¿Tienen arroz blanco de 1 kg?	¡Sí, tenemos arroz blanco de 1 kg de la marca La Campiña a sólo 2!50! Lo puedes encontrar en el pasillo 3.	3	3	3	9	Correcto
2	Disponibilidad	¿Hay leche sin lactosa disponible?	Lo siento, pero no tengo información sobre leche sin lactosa en el catálogo. Pero tenemos leche entera y desnatada disponibles. Si necesitas más información sobre otros productos, estaré encantada de ayudarte.	3	3	3	9	Correcto
3	Disponibilidad	¿Tienen aceite de oliva extra virgen marca La Española?	Lo siento, no tenemos aceite de oliva extra virgen de la marca "La Española" en nuestro catálogo, pero tenemos el aceite de	3	3	3	9	Correcto

			oliva Carbonell a un excelente precio de 6.50. Si deseas, aquí estoy para ayudarte a encontrar otra cosa.						
4	Disponibilidad	¿Está disponible el pan integral hoy?	Lo siento, pero no tengo pan integral en el catálogo. Pero no te preocupes, tengo otras opciones como el pan de molde Bimbo, que es delicioso. ¡Dame un toque si lo necesitas!	3	3	3	9	Correcto	
5	Ubicación	¿Dónde está el arroz?	El arroz está en el pasillo 3. ¡Asegúrate de llevar suficiente para tus platos favoritos!	3	3	3	9	Correcto	
6	Ubicación	¿En qué pasillo encuentro las bebidas gaseosas?	Las gaseosas se encuentran en el pasillo 9. ¡Elige tu favorito y a disfrutar!	3	3	3	9	Correcto	
7	Ubicación	¿Dónde puedo encontrar productos sin gluten?	Lo siento, pero no tengo información sobre productos sin gluten en nuestro catálogo. Puedo ayudarle con otros productos disponibles en el supermercado.	3	3	3	9	Correcto	

8	Ubicación	¿Dónde están los productos de limpieza?	Lo siento, pero no tengo información sobre productos de limpieza. ¿Te gustaría saber sobre algún otro tipo de producto?	3	3	3	9	Correcto
9	Precio	¿Cuánto cuesta la leche entera?	La leche entera cuesta 1.20 euros por litro. ¡Perfecta para un buen café!	3	3	3	9	Correcto
10	Precio	¿Cuál es el precio del arroz de 1 kg?	El arroz de un kilo cuesta 2.50. ¡Perfecto para un buen plato de arroz!	3	3	3	9	Correcto
11	Precio	¿Cuánto vale el detergente marca Ariel?	Lo siento, pero no tengo información sobre detergentes. Pero si necesitas algo más, ¡estoy aquí para ayudarte!	3	3	3	9	Correcto
12	Precio	¿Cuál es el producto más barato en la categoría de pastas?	El producto más barato en la categoría de pastas es la Pasta Spaghetti de 500g de Barilla, que cuesta 1.80. ¡Perfecto para una cena rápida y deliciosa!	3	3	3	9	Correcto

13	Recomendacion es y asesoramientos	¿Qué me recomiendas para preparar una pasta rápida?	Te recomiendo la Pasta Spaghetti de Barilla, que está a solo 1.80, y un buen tomate frito de Orlando a 1.70. ¡Listo para un festín rápido!	3	3	3	9	Correcto
14	Recomendacion es y asesoramientos	¿Qué producto es mejor para lavar ropa delicada?	Lo siento, pero solo puedo ayudar con productos del supermercado. Si necesitas información sobre nuestra selección de productos, estaré encantada de ayudarte.	3	3	3	9	Correcto.
15	Recomendacion es y asesoramientos	¿Qué alternativa saludable hay para el azúcar?	Lo siento, pero solo puedo ayudar con productos del supermercado. Si necesitas información sobre algún producto específico, estaré encantada de ayudarte.	3	3	3	9	Correcto.
16	Recomendacion es y asesoramientos	¿Qué puedo comprar para una	Para una cena ligera, te recomendaría una ensalada con tomates frescos, zanahorias y un poco de pollo. ¡Y de	3	3	3	9	Correcto

			cena ligera?	postre, un yogur natural para endulzar la noche!						
17	Fuera contexto	de	¿Quién ganó el mundial de 2014?	¡Hola! Me temo que en el supermercado solo manejo productos, pero si necesitas algo para ver el próximo mundial, ¡aquí estoy para ayudarte!	3	3	3	9	Correcto	
18	Fuera contexto	de	¿Cuál es la capital de Francia?	Lo siento, pero solo puedo ayudar con productos del supermercado. Si necesitas información sobre compras, estaré encantada de ayudarte.	3	3	3	9	Correcto	
19	Fuera contexto	de	Cuéntame un chiste.	Lo siento, pero solo puedo ayudar con productos del supermercado. Si necesitas información sobre compras, estaré encantada de ayudarte.	3	3	3	9	Correcto	
20	Fuera contexto	de	¿Puedes explicarme qué es la física cuántica?	Lo siento, pero solo puedo ayudar con productos del supermercado. Si necesitas información sobre compras, estaré	3	3	3	9	Correcto	

encantada de
ayudarte.

Nota. Elaboración propia.

Discusión

El índice de coherencia del 100% valida el enfoque de recuperación contextual ligera como mecanismo de especialización del asistente. Al incorporar el catálogo de inventario directamente como contexto en cada solicitud al modelo, el sistema operó exclusivamente sobre información real del comercio sin requerir reentrenamiento ni infraestructura semántica compleja. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Lewis et al. (2021), quienes demostraron que la incorporación dinámica de información contextual en modelos de lenguaje reduce significativamente los errores de alucinación y mejora la pertinencia de las respuestas.

La precisión de transcripción del 90% resulta adecuada para el contexto comercial propuesto, donde la mayoría de las consultas son estructuralmente simples y predecibles. Los errores registrados (concentrados en ruido moderado con enunciados cortos) sugieren que el rendimiento puede mejorarse con técnicas de cancelación de ruido o incrementando la duración mínima de grabación.

La latencia promedio de 22,8 segundos representa la limitación operativa más relevante. Las etapas de síntesis de voz (7,5 s) y reproducción (6,4 s) dependen de factores externos como la velocidad de conexión y la carga de los servidores, lo que dificulta su optimización desde el hardware. Reducir la latencia percibida (mediante compresión de audio, modelos TTS más ligeros o conexiones HTTP persistentes) constituye la principal línea de mejora futura. No obstante, en el entorno de un punto de venta físico donde el usuario realiza consultas esporádicas sobre productos concretos, estos tiempos pueden resultar aceptables dependiendo del perfil del usuario.

En términos económicos, la inversión de 46,34 euros del prototipo contrasta favorablemente con las soluciones comerciales de kioscos de autoservicio o sistemas de atención automatizada, que requieren inversiones significativamente mayores.

Conclusiones

El desarrollo del asistente inteligente MIA demostró la viabilidad de integrar inteligencia artificial conversacional especializada en sistemas embebidos de bajo costo orientados al entorno comercial. La estrategia de recuperación contextual ligera (que incorpora el catálogo de inventario como contexto dinámico en cada consulta al modelo de lenguaje) permitió alcanzar un 100% de coherencia en las

respuestas sin requerir infraestructura semántica compleja, reentrenamiento del modelo ni grandes inversiones en hardware.

La arquitectura modular propuesta (ESP32-S3, INMP441, MAX98357A y GC9A01) demostró ser funcionalmente completa para el caso de uso propuesto, con una inversión total de 46,34 euros. La precisión de transcripción del 90% confirmó la adecuación del micrófono INMP441 en condiciones normales de uso, con degradación esperada en entornos de ruido moderado.

Las limitaciones identificadas (dependencia de conectividad a internet, restricciones de memoria del microcontrolador y latencia promedio de 22,8 s condicionada por los servicios en la nube) no comprometen la funcionalidad general del prototipo. La línea de mejora más relevante reside en la reducción de la latencia de síntesis de voz, etapa que concentra el mayor tiempo del ciclo.

Este trabajo aporta una referencia práctica sobre la integración de IA conversacional con sistemas embebidos de bajo costo en el sector comercial, alineándose con las iniciativas de transformación digital del contexto nacional y contribuyendo a la línea de investigación de innovación de procesos industriales y productos tecnológicos de la Universidad Yacambú.

Referencias

- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la Metodología Científica. (6ª ed.). Editorial Episteme. Caracas. Venezuela.
- Benito, Á. (2019). Desarrollo de aplicaciones para IoT con el módulo ESP32 [Trabajo de grado, Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior]. Repositorio institucional. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/35420/TFG_Benito_Herranz_2019.pdf
- Evans, D. (2011). *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco Internet Business Solutions Group. https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- IBM. (2024). *What Is an API (Application Programming Interface)?* IBM Cloud Topics. Recuperado de <https://www.ibm.com/think/topics/api>
- Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., y Kiela, D. (2021). *Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks*. <https://arxiv.org/abs/2005.11401>
- Maier, A., Sharp, A., & Vagapov, Y. (2017). Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In *2017 7th International Conference on*

Internet Technologies and Applications (ITA) (pp. 143-148). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ITECHA.2017.8101926>

Russell, S., y Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4.a ed.). Pearson.
http://lib.ysu.am/disciplines_bk/efdd4d1d4c2087fe1cbe03d9ced67f34.pdf

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., y Diakopoulos, N. (2016). *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. (6.a ed.). Pearson.

Vázquez García, A. (2024). Chatbots basados en IA generativa para optimizar el servicio al cliente en el contexto del mercado español [Tesis doctoral, Universidad de Alcalá]. Biblioteca Digital Universidad de Alcalá. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/63000>

Wolf, W. (2017). *Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design* (3.a ed.). Morgan Kaufmann.

LA TRANSICIÓN HACIA LA INDUSTRIA 5.0: CONCEPTUALIZACIÓN, BENEFICIOS OPERATIVOS Y DESAFÍOS EN LA INGENIERÍA CONTEMPORÁNEA

THE TRANSITION TOWARD INDUSTRY 5.0: CONCEPTUALIZATION, OPERATIONAL BENEFITS, AND CHALLENGES IN CONTEMPORARY ENGINEERING

Alexander José Rondón Suniaga¹

 <https://orcid.org/0009-0007-3756-0860>

Recibido: 12-05-2026

Aceptado: 29-05-2026

Resumen

El presente artículo de revisión documental analiza la conceptualización de la Industria 5.0, en un enfoque cuantitativo que reorienta los sistemas productivos hacia una orientación antropocéntrica, sostenible y resiliente. La investigación tiene como propósito fundamental examinar las definiciones fundamentales de este modelo, resaltar sus beneficios operativos y organizacionales, así como exponer de manera detallada los desafíos estructurales que afrontan los profesionales de la ingeniería para su efectiva implementación en el entorno fabril contemporáneo. Metodológicamente, el estudio se fundamenta en un análisis comparativo de fuentes científicas recientes que delimitan la evolución estratégica desde la automatización extrema previa hacia una relación simbiótica entre el ser humano y las tecnologías avanzadas, tales como la robótica colaborativa y los sistemas de análisis predictivo. Los hallazgos principales evidencian que, si bien la transición potencia la ventaja competitiva mediante la personalización masiva, la proactividad institucional, la reducción de costos operativos, persisten barreras críticas asociadas a la brecha de competencias digitales, dilemas éticos sobre la gobernanza de datos, la ciberseguridad industrial y las limitaciones de inversión financiera en las pequeñas unidades de producción, exigiendo una profunda reconfiguración académica y organizacional.

Palabras clave: industria 5.0; antropocentrismo; sostenibilidad; sinergia hombre-máquina; desafíos de la ingeniería.

Abstract

This paper review article analyzes the conceptualization of Industry 5.0, in a quantitative approach that reorients production systems towards an anthropocentric, sustainable and resilient orientation. The main purpose of the research is to examine the fundamental definitions of this model, highlight its operational and organizational benefits, as well as expose in detail the structural challenges faced by engineering professionals for its effective implementation in the contemporary manufacturing environment. Methodologically, the study is based on a comparative analysis of recent scientific sources that delimit the strategic evolution from previous extreme automation to a symbiotic relationship between humans and advanced technologies, such as collaborative robotics and predictive analysis systems. The main findings show that, although the transition enhances competitive advantage through mass customization, institutional proactivity, and the reduction of operating costs, critical barriers persist associated with the digital skills gap, ethical dilemmas on data governance, industrial cybersecurity and financial investment limitations in small production units. demanding a profound academic and organizational reconfiguration.

¹ Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: ajrondons@gmail.com

Keywords: Industry 5.0; Human-centricity; Sustainability; Human-machine synergy; Engineering challenges.

Introducción

El devenir histórico de los sistemas de producción industrial ha estado marcado por transformaciones disruptivas que reconfiguran de manera sistemática no solo las capacidades técnicas de las sociedades, sino también sus estructuras sociolaborales, políticas y económicas. Desde la introducción de la máquina de vapor en el siglo dieciocho, que inauguró la primera revolución industrial mediante la mecanización del trabajo, hasta la consolidación de las líneas de montaje electromecánicas orientadas a la producción en masa durante el siglo diecinueve, cada etapa evolutiva ha perseguido de forma prioritaria la optimización del rendimiento operativo y la maximización de los excedentes financieros. A finales del siglo veinte, la incorporación de la informática, la electrónica y los controladores lógicos programables dio lugar a la tercera revolución, permitiendo una automatización flexible de los procesos fabriles y transformando la gestión de la información dentro del entorno de manufactura.

La llegada de la denominada Industria 4.0, acontecida en las primeras décadas del siglo veintiuno, acentuó esta tendencia al proponer una hiperconectividad fundamentada en los sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas Industrial (IIoT) y la computación en la nube. Este modelo centró su atención en la digitalización absoluta y en la autonomía de los procesos de fabricación, buscando reducir al mínimo la variabilidad inherente asociada a la intervención humana mediante el despliegue de algoritmos avanzados de aprendizaje automático y sistemas de toma de decisiones descentralizados. No obstante, la experiencia operativa acumulada a nivel global ha evidenciado que una automatización extrema, desprovista de una dimensión social, ética y ecológica, genera externalidades negativas de consideración, tales como la despersonalización del entorno laboral, el incremento de la vulnerabilidad organizativa ante crisis sistémicas y una alarmante huella ecológica que contraviene los objetivos institucionales de desarrollo global.

Ante estas limitaciones de carácter epistemológico y operacional, emerge en el escenario sociotécnico contemporáneo la conceptualización de la Industria 5.0. Este paradigma emergente no se articula como una ruptura radical o un reemplazo cronológico del modelo precedente, sino como un complemento estratégico y una evolución cultural indispensable que enmienda el sesgo estrictamente tecnocéntrico previo. Al respecto, las investigaciones de Romero y Osorio (2025) sostienen que este enfoque busca reorientar el núcleo del tejido productivo, situando de manera explícita al ser humano, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia operativa en el centro de los sistemas de fabricación. De este

modo, el desarrollo tecnológico deja de ser concebido como un fin en sí mismo para transformarse en un vector de transformación social al servicio del bienestar colectivo y de la preservación del entorno natural.

El pilar del antropocentrismo dentro de esta nueva concepción filosófica y productiva reubica a los trabajadores en el eje motor de la fábrica inteligente. A diferencia de las posturas radicales de la automatización industrial, donde el operario humano con frecuencia es tipificado como un factor de riesgo o un eslabón ineficiente susceptible de ser erradicado, la Industria 5.0 preconiza una coexistencia simbiótica entre las capacidades de cómputo de la maquinaria y las facultades creativas, heurísticas, empáticas y éticas de los individuos. Herramientas avanzadas como los robots colaborativos, denominados habitualmente cobots, la Inteligencia Artificial (IA) distribuida y la modelación mediante gemelos digitales se despliegan con el propósito implícito de potenciar la seguridad en las plantas de producción, mitigar los riesgos ergonómicos tradicionales y liberar al personal de tareas monótonas o peligrosas, permitiéndoles abocarse al desarrollo de actividades intelectuales de alto valor agregado.

Por otra parte, la sostenibilidad y la resiliencia complementan esta visión integradora al exigir que las organizaciones de producción dejen de operar de manera aislada respecto a sus entornos ecológicos y comunitarios. La dimensión de la sostenibilidad impone la adopción obligatoria de principios de economía circular, el uso eficiente de los recursos energéticos, la minimización de residuos y la reducción sistemática de las emisiones de gases de efecto invernadero, garantizando que las exigencias económicas del presente no comprometan la viabilidad de las generaciones futuras. Asimismo, la resiliencia capacita a las estructuras fabriles para anticipar, absorber, mitigar y adaptarse con agilidad ante perturbaciones geopolíticas, climáticas o sanitarias imprevistas, asegurando la continuidad de las cadenas de suministro esenciales a través de una flexibilidad tecnológica y humana sin precedentes.

La transición hacia este modelo integral no se encuentra exenta de complejidades estructurales significativas, cuya resolución recae directamente sobre la praxis de la ingeniería contemporánea. Los profesionales de esta disciplina, formados tradicionalmente bajo esquemas analíticos orientados de forma exclusiva a la eficiencia técnica y a la maximización de variables cuantitativas, se enfrentan al desafío de ampliar su horizonte competencial. La implementación efectiva de la Industria 5.0 exige que el ingeniero actúe como un agente de cambio interdisciplinario, capaz de coordinar la convergencia de tecnologías digitales y físicas de alta complejidad mientras gestiona simultáneamente las implicaciones éticas del manejo de datos, los riesgos críticos de ciberseguridad industrial y las asimetrías organizacionales derivadas de la resistencia al cambio cultural dentro de las empresas.

Entre las barreras más pronunciadas que restringen esta evolución en el entorno corporativo se encuentra la denominada brecha de competencias digitales avanzadas. La velocidad exponencial con la

que se desarrollan los sistemas inteligentes y las plataformas de analítica predictiva supera con frecuencia los ritmos de actualización de los programas académicos universitarios y de los planes de capacitación interna de las organizaciones, generando un marcado déficit de capital humano cualificado para liderar entornos híbridos de trabajo. Adicionalmente, las asimetrías de carácter financiero representan un obstáculo crítico, especialmente para las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), las cuales carecen habitualmente del músculo económico requerido para sufragar las costosas inversiones iniciales en infraestructura tecnológica y consultoría estratégica, viéndose relegadas a estadios de rezago digital básico que limitan su competitividad en los mercados nacionales e internacionales.

Tomando en consideración el escenario anteriormente descrito, el presente artículo de revisión documental se plantea como propósito general examinar de manera sistemática la conceptualización de la Industria 5.0, desglosando con rigor científico los beneficios operativos, sociales y ambientales que este paradigma aporta a las organizaciones contemporáneas, al tiempo que se exponen de forma detallada los desafíos multifacéticos que los ingenieros deben afrontar para su materialización práctica en los entornos fabriles. La relevancia de esta investigación estriba en la necesidad apremiante de ofrecer un marco analítico integrado que sirva de orientación teórica y metodológica para académicos, estudiantes de ciencias de la ingeniería y gerentes del sector productivo, propiciando una reflexión profunda sobre el rumbo de la automatización industrial en la actual centuria.

Para dar cumplimiento cabal al objetivo propuesto, el estudio se circunscribe a una metodología de revisión analítica de la literatura científica reciente, seleccionando de forma rigurosa fuentes documentales indexadas que abordan la transición socio-tecnológica desde diversas perspectivas geográficas e institucionales. El alcance de la investigación comprende la delimitación conceptual de las tecnologías habilitadoras esenciales, la evaluación de las dinámicas de interacción entre operarios y sistemas autónomos, y la identificación pormenorizada de las restricciones financieras, éticas, normativas y de seguridad que condicionan el éxito de estos proyectos de modernización. A través de este abordaje metodológico, se pretende estructurar una discusión lógica, coherente y crítica que culmine en el planteamiento de directrices claras para la formación académica y el desempeño profesional del ingeniero ante las demandas complejas de la sociedad global.

Evolución Epistemológica y Ruptura Teórica con la Industria 4.0

El análisis crítico de la literatura científica revela que el tránsito hacia la Industria 5.0 no constituye un mero agregado tecnológico periférico, sino un cambio paradigmático profundo que redefine los fundamentos epistemológicos de los sistemas de producción. Para comprender la ontología de este nuevo

modelo, resulta metodológicamente indispensable examinar las características y falencias estructurales heredadas de la cuarta revolución industrial. Al respecto, Chiatchoua (2022) caracteriza a la Industria 4.0 como un ecosistema de digitalización integral fundamentado en sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas (IoT) y la gestión masiva de datos (Big Data), cuyo norte exclusivo radicó en la automatización extrema y en la interconexión de los procesos de manufactura para elevar los índices de competitividad global. Este enfoque marcadamente tecnocéntrico subordinó las dinámicas laborales a los imperativos de la eficiencia algorítmica.

Esta priorización irrestricta de la inversión tecnológica y la optimización de los procesos mecánicos generó, según expone Chiatchoua (2022), severas asimetrías organizacionales y un evidente desinterés por el bienestar de la fuerza laboral, configurando un escenario de deshumanización operativa. Es precisamente ante esta desatención de la dimensión social que la Industria 5.0 emerge como un correctivo estratégico e institucional de primer orden. En sintonía con este planteamiento, Romero y Osorio (2025) sustentan que el nuevo modelo no busca el reemplazo o la desestimación de los logros técnicos precedentes, sino su integración dentro de un marco cultural y operativo renovado, donde la tecnología deja de fungir como el fin supremo de la corporación para posicionarse como un instrumento supeditado al desarrollo humano.

La delimitación conceptual de esta transición de valores encuentra un asidero robusto en las formulaciones de Pérez-Domínguez (2024), quien asevera que, a diferencia de las revoluciones industriales anteriores abocadas de forma casi exclusiva a la celeridad del procesamiento y a la estandarización rígida, la era actual promueve la reintroducción explícita del factor humano en la ecuación fabril. De esta manera, el núcleo metodológico se desplaza desde la simple maximización cuantitativa de los volúmenes de producción hacia un equilibrio dinámico centrado en la personalización de los bienes, la proactividad institucional y el resguardo integral de la dignidad del trabajador.

No obstante, este ritmo acelerado de mutaciones doctrinales e industriales suscita debates epistemológicos profundos sobre la madurez real de los entornos productivos para asimilar tales transformaciones. Frente a las posturas marcadamente optimistas del sector corporativo, De Val Pardo (2021) introduce una mirada crítica y filosófica de alta relevancia al examinar este fenómeno bajo el concepto de la evolución exosomática del ser humano, entendida como la creación e implementación de herramientas externas destinadas a superar las limitaciones biológicas naturales. Desde esta perspectiva analítica, el autor manifiesta serias reservas sobre la velocidad con la que las estructuras académicas y empresariales pretenden validar estos estadios evolutivos:

El avance tecnológico y la premura generalizada de los tiempos enumeran las revoluciones industriales con gran rapidez, de aquí la superposición que se observa, todo en aras de que los últimos avances sean pioneros y punto de arranque de la siguiente. (p. 1).

Esta premura comercial, advierte De Val Pardo (2021), puede responder con mayor frecuencia a estrategias de posicionamiento de mercado y primicia tecnológica que a una decantación consciente, estructural y asimilada de las dinámicas sociolaborales y productivas. Por consiguiente, la confrontación teórica obliga a los investigadores y profesionales de la ingeniería a discernir entre el deseo idealizado de una simbiosis perfecta y la realidad empírica de unas plantas industriales que, en gran medida, aún experimentan dificultades sustantivas para consolidar la infraestructura básica de la automatización digital previa

La Tríada Paradigmática: Antropocentrismo, Sostenibilidad y Resiliencia Operativa

La arquitectura conceptual de la Industria 5.0 se erige sobre tres pilares fundamentales indisolubles cuya validez ha sido refrendada tanto por organismos multilaterales como por la investigación científica aplicada: el antropocentrismo, la sostenibilidad ecológica y la resiliencia ante entornos de volatilidad sistémica. De acuerdo con datos e hitos históricos compilados por la corporación multinacional ABB (2022), esta conceptualización trinitaria fue adoptada y estructurada formalmente por la Comisión Europea en el año 2021, adquiriendo un impulso definitivo a escala global tras la crisis sanitaria y los confinamientos derivados de la pandemia de la enfermedad por coronavirus (COVID-19). Dicho acontecimiento histórico desveló la fragilidad extrema de las cadenas de suministro hiperautomatizadas pero rígidas, forzando una aceleración digital que evidenció la urgencia de reorientar los vectores tecnológicos hacia la preservación de la vida y la adaptabilidad comunitaria.

El primer pilar, referido al enfoque antropocéntrico, plantea una reconfiguración radical de los roles sociotécnicos dentro de la planta de producción. En lugar de percibir al operario como una fuente inevitable de error o un componente rezagado susceptible de sustitución, la Industria 5.0 propugna lo que Moreno et al. (2025) denominan un equilibrio simbiótico. Este concepto postula la interconexión armónica entre la inteligencia, la intuición, la empatía y la capacidad heurística del ser humano con la precisión geométrica, la fuerza mecánica y las facultades analíticas de los sistemas inteligentes de fabricación. En este orden de ideas, Romero y Osorio (2025) puntualizan en una definición del paradigma dentro de los parámetros de la paráfrasis académica:

La Industria 5.0 es un paradigma productivo emergente que integra la tecnología avanzada y el talento humano en una relación simbiótica y armoniosa, con el propósito de crear valor a través

de la sostenibilidad, la resiliencia sistémica y la personalización masiva. Alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, esta industria transforma los sistemas de producción en ecosistemas éticos y adaptativos... (p. 79).

Bajo esta concepción, el trabajador deja de ser un mero apéndice de la maquinaria para investirse con el rol de cocreador estratégico del proceso industrial. El despliegue de las tecnologías denominadas habilitadoras, tales como la robótica colaborativa, los entornos de realidad virtual e inmersiva y los algoritmos de inteligencia artificial distribuida, asume la función explícita de potenciar las capacidades superiores del individuo, proveyéndole de plataformas interactivas para testear, visualizar y perfeccionar ideas complejas en tiempo real, lo que cataliza la innovación disruptiva dentro de la organización.

El segundo pilar, consagrado a la sostenibilidad ambiental, exige un compromiso vinculante con el respeto a los límites biofísicos del planeta. Las evidencias aportadas por los reportes técnicos de ABB (2022), demuestran que la convergencia de herramientas digitales de gestión energética inteligente y esquemas de descarbonización industrial no colisiona con el rendimiento financiero de las empresas; por el contrario, la aplicación de estos sistemas de monitoreo continuo arroja reducciones comprobadas de un veinte por ciento en el consumo de vectores energéticos y disminuciones de hasta un quince por ciento en los costos operativos diarios de infraestructuras comerciales e industriales. La sostenibilidad se viabiliza mediante el empleo de sensores interconectados que optimizan el uso de materias primas y reducen la generación de efluentes y desechos, consolidando los preceptos de la economía circular dentro de la manufactura moderna.

Finalmente, la resiliencia social y operativa se define como la capacidad inherente de las estructuras industriales para absorber perturbaciones externas severas, mantener la continuidad de los servicios esenciales y salvaguardar la integridad de las personas. La investigación de Tato (2023), asocia este pilar a la implementación de planes proactivos de gestión de crisis respaldados por la analítica de datos a gran escala y la modelación mediante gemelos digitales. Al monitorear la salud de la infraestructura física de manera predictiva, los ingenieros pueden recibir notificaciones previas a las alarmas tradicionales, planificar paradas de mantenimiento programadas con precisión matemática y mitigar drásticamente los tiempos de inactividad no planificados, transformando la resiliencia en un escudo estratégico ante entornos de alta volatilidad macroeconómica o geopolítica.

Beneficios Estratégicos y Competitividad Proactiva en el Entorno Corporativo

La asimilación de los postulados de la Industria 5.0 genera una serie de ventajas operacionales y corporativas que resignifican el concepto tradicional de éxito empresarial, demostrando que el

humanismo organizacional resulta altamente rentable a largo plazo. Uno de los beneficios más evidentes se materializa en la flexibilización de la oferta y en la capacidad de responder con agilidad a las demandas cambiantes del mercado global. Con respecto a esto, Travez y Villafuerte (2023) introducen la noción de la "Empresa 5.0", concebida como una entidad productiva e inteligente que evoluciona los entornos de hiperautomatización previa para transitar desde la producción rígida en masa hacia esquemas avanzados de personalización masiva. Esta cooperación simbiótica faculta a las organizaciones para modificar las especificaciones de un producto de forma casi instantánea sin incurrir en penalizaciones económicas severas ni alterar la estructura de costos marginales de la planta.

Asimismo, la adopción proactiva de este enfoque robustece la posición competitiva de las empresas en sus respectivos sectores económicos. Moreno et al. (2025) sostienen que la transición tecnológica guiada por valores sociales incrementa la capacidad de previsión institucional, permitiendo a las organizaciones anticiparse a las tendencias regulatorias ambientales y colonizar nichos de mercado emergentes orientados al consumo responsable. El comportamiento laboral experimenta una transformación positiva debido a que la inversión deliberada en las personas, en sus destrezas digitales y en su bienestar socioemocional reduce el ausentismo laboral, eleva los índices de satisfacción interna y optimiza la retención del talento humano técnico altamente cualificado, factor que se erige como la ventaja competitiva insustituible de la presente era.

Desde la perspectiva puramente técnico-operativa de la ingeniería de planta, los beneficios adquieren una dimensión tangible mediante la optimización de los entornos de trabajo y la reducción de la siniestralidad laboral. El análisis de las tecnologías de robótica colaborativa efectuado por Pérez-Domínguez (2024) pone de relieve cómo los cobots transforman la seguridad ergonómica de los operarios. Al respecto, el autor destaca el impacto de esta interacción en el siguiente pasaje:

Los cobots están diseñados para trabajar de manera segura y cercana con los operarios humanos, asumiendo tareas repetitivas o físicamente exigentes. Al liberar a los trabajadores de estas labores monótonas, la robótica colaborativa les permite centrarse en actividades que requieren habilidades humanas únicas, como la resolución de problemas, la creatividad y la toma de decisiones complejas. (p. 62).

De esta manera, la automatización avanzada absorbe la carga física pesada, insalubre o peligrosa, mitigando las enfermedades profesionales asociadas a movimientos repetitivos o posturas forzadas. Al liberar tiempo intelectual valioso del personal directivo y operativo, la organización maximiza su rendimiento global, pues orienta sus capacidades humanas hacia funciones de alta planificación estratégica, control de calidad analítico y diseño creativo de procesos.

Desafíos Tecnológicos, Ciberseguridad y Gobernanza Ética de Datos

A pesar de las notables prerrogativas operacionales descritas, la materialización práctica de la Industria 5.0 impone a los ingenieros y diseñadores de sistemas una serie de retos estructurales y dilemas éticos de compleja resolución. La raíz de estas problemáticas yace en la intensificación exponencial de la interconectividad digital que caracteriza a las plantas modernas. Zambrano y Pilco (2023) advierten que la convergencia de sensores inalámbricos, plataformas analíticas en la nube e interfaces robóticas colaborativas amplía de manera alarmante la superficie de vulnerabilidad de las empresas ante ciberataques organizados. Un fallo de ciberseguridad industrial en un entorno híbrido no solo compromete la confidencialidad de la propiedad intelectual de la corporación, sino que pone en riesgo inminente la integridad física de los operarios humanos si los algoritmos de control de un cobot o los sistemas de parada de emergencia son manipulados de forma malintencionada a distancia.

Esta preocupación es refrendada por Pérez-Domínguez (2024), quien prescribe la urgencia de estructurar e implementar marcos normativos y protocolos de seguridad digital rígidos que protejan tanto el flujo de datos operativos como el correcto funcionamiento de las redes neuronales artificiales. La gobernanza de la información adquiere tintes éticos sumamente espinosos cuando las tecnologías de IoT y los dispositivos usables (wearables) se despliegan dentro del espacio fabril con el propósito de monitorear variables fisiológicas de los trabajadores, tales como la frecuencia cardíaca, los niveles de sudoración o los patrones de fatiga cognitiva, con miras a prevenir accidentes o mitigar el estrés laboral.

Al respecto, las investigaciones de Romero y Osorio (2025) señalan que esta hipervigilancia digital despierta debates encendidos en torno al derecho a la privacidad de los empleados, el riesgo de persecución corporativa basada en perfiles biométricos y la pérdida progresiva de autonomía en el puesto de trabajo. El ingeniero de la era 5.0 se ve compelido a diseñar arquitecturas informáticas bajo principios éticos restrictivos, asegurando que el tratamiento de los datos individuales se realice de forma anónima, transparente y consensuada, evitando que los sistemas de inteligencia artificial operen como mecanismos de opresión panóptica dentro de la organización.

Por otra parte, los límites intrínsecos de las tecnologías computacionales actuales representan un desafío epistemológico insoslayable. De Val Pardo (2021) objeta de forma severa el discurso tecno-optimista dominante que atribuye capacidades empáticas o juicios morales autónomos a los sistemas mecánicos. El autor argumenta que, aun cuando las redes neuronales artificiales avanzadas demuestren una competencia superior en el procesamiento estadístico y en la resolución de tareas lógicas complejas, carecen por completo de conciencia y de respuestas afectivas auténticas, dado que el cerebro biológico opera bajo un diseño evolutivo multifactorial que la tecnología digital no puede replicar fielmente. Por lo

tanto, delegar decisiones organizacionales con profundas implicaciones morales o de seguridad humana exclusivamente a algoritmos de libre albedrío simulado constituye un riesgo técnico y ético de incalculable magnitud que la ingeniería contemporánea debe restringir mediante una supervisión humana rigurosa.

La Transformación Curricular y la Brecha de Competencias de la Ingeniería

La transición hacia la Industria 5.0 altera de forma irreversible los perfiles profesionales requeridos en el mercado laboral, trasladando el foco de atención desde la mera pericia técnica hacia una formación holística e interdisciplinaria. Esta metamorfosis en las demandas sociotécnicas plantea un desafío colosal para las instituciones de educación universitaria, las cuales enfrentan la exigencia perentoria de actualizar sus estructuras curriculares con una celeridad acorde al dinamismo tecnológico actual. En el ámbito de la educación superior, Mujica (2024), desde la perspectiva de la Universidad de Carabobo, sostiene que el advenimiento de este paradigma exige una reconfiguración inmediata de los programas académicos de las ciencias de la ingeniería. Los ingenieros ya no pueden ser instruidos únicamente bajo esquemas analíticos estancos orientados a la optimización matemática de variables físicas aisladas, sino que deben desarrollar capacidades para liderar ecosistemas híbridos donde coexisten personas y sistemas autónomos.

Este escenario académico demanda la amalgamación equilibrada entre las competencias denominadas duras y las habilidades blandas o transversales. De acuerdo con Mujica (2024), el profesional de la ingeniería en la era contemporánea debe poseer un dominio robusto de disciplinas de vanguardia como la programación avanzada, la analítica predictiva de datos, la robótica colaborativa y la simulación virtual; no obstante, dicho bagaje instrumental resulta inocuo si no se complementa con competencias relativas al pensamiento crítico, la adaptabilidad al cambio, la inteligencia emocional, la negociación de conflictos y un profundo sentido de responsabilidad social y ética. La ausencia de este equilibrio formativo da origen a una marcada brecha de competencias digitales en las organizaciones, donde el personal técnico capacitado presenta dificultades severas para comunicarse de forma asertiva con los equipos de operarios, o viceversa, entorpeciendo los canales de interacción hombre-máquina requeridos por el paradigma.

La gravedad de este desafío es igualmente subrayada por Zambrano y Pilco (2023), quienes enfatizan que la planificación estratégica y la inclusividad deben constituir el eje motor de cualquier proyecto de modernización fabril. Los autores explicitan la naturaleza bidimensional de este reto en su formulación textual:

A medida que avanza la tecnología surge Industria 5.0, la misma que fomenta una integración estrecha entre humanos, máquinas y robots, redefiniendo los procesos de producción. El objetivo principal de este artículo es explorar y analizar los desafíos que enfrentan las empresas en los ámbitos tecnológicos y humanos a medida que hacen la transición hacia la Industria 5.0. (p. 1).

En consecuencia, el éxito del proceso no se circunscribe a la adquisición e instalación de plataformas de software o módulos mecánicos autónomos, sino al diseño sociotécnico de programas de formación continua y reconversión profesional dentro de las propias corporaciones industriales. Las organizaciones se ven en la obligación de capacitar a su personal de manera permanente para asimilar la automatización heredada, erradicando el arraigado temor psicológico y empresarial que asocia de forma directa la robotización con el desempleo forzado, demostrando en su lugar que los entornos digitales maduros tienden a registrar menores tasas de desocupación al desplazar a los trabajadores hacia funciones de supervisión intelectual de mayor valor añadido.

Asimetrías Socioeconómicas, Democratización y la Realidad de las PYMES

Uno de los debates más complejos y de mayor trascendencia regional en torno a la viabilidad de la Industria 5.0 se vincula con las marcadas asimetrías de carácter financiero, infraestructural y socioeconómico que condicionan su adopción, especialmente en los contextos geográficos de economías emergentes o en vías de desarrollo. La literatura científica analizada advierte sobre el peligro inminente de que la revolución digital profundice las brechas de desigualdad existentes en el tejido productivo si no se implementan políticas públicas de democratización tecnológica. Carro y Sarmiento (2022), en sus investigaciones auspiciadas por la Universidad Nacional Autónoma de México, alertan sobre los impactos sociales implícitos en la transición, señalando el riesgo latente de polarización del empleo y exclusión sistemática de aquella fuerza laboral rezagada que carece de acceso a planes equitativos de capacitación, afectando de forma particular a los trabajadores de menor nivel educativo o de edad avanzada.

Esta asimetría se proyecta con idéntica rigurosidad sobre la estructura empresarial, manifestándose en la denominada paradoja estructural de las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES). Investigadores como Romero y Osorio (2025) señalan que, si bien el discurso corporativo global presenta a la Industria 5.0 como un modelo universalmente accesible, la realidad empírica latinoamericana denota severas barreras de inversión financiera que restringen la adopción de infraestructura avanzada en las unidades productivas de menor escala. Los elevados costos iniciales de equipamiento, la consultoría estratégica especializada y la reconversión de plantas representan obstáculos financieros casi insalvables

para empresas que operan en mercados con severas restricciones de crédito o que arrastran notables rezagos de digitalización básica y conectividad homogénea, tal como documenta Chiatchoua (2022).

Frente a este panorama restrictivo, emergen posturas teóricas que buscan desmitificar el carácter elitista del paradigma para proponer una adopción democrática, transversal y de baja intensidad de capital. Naranjo (s.f.) sostiene de forma categórica que la Industria 5.0 no constituye una revolución exclusiva para los conglomerados transnacionales hiperpotentes. Desde la óptica del autor, la esencia del modelo radica en una transformación cultural y ética orientada por valores, lo que faculta a las micro, pequeñas y medianas empresas, a los profesionales independientes e incluso a los centros educativos para implementar sus principios fundamentales tales como la economía circular doméstica, la ergonomía laboral, la personalización artesanal-digital y la colaboración directa hombre-máquina sin la obligación de sufragar inversiones multimillonarias en hardware de última generación.

Esta viabilidad operativa y la resolución equilibrada de la transición empresarial encuentran una síntesis argumentativa precisa en los planteamientos metodológicos de Zambrano y Pilco (2023), quienes compendian las directrices estratégicas indispensables para el éxito institucional en el siguiente bloque de texto:

La planificación estratégica y consideraciones éticas son clave, al igual que el enfoque en la inclusividad y la adaptabilidad mediante tecnologías avanzadas. Aunque existen desafíos financieros y preocupaciones de seguridad, la reconfiguración rápida y la colaboración humano-máquina destacan como elementos clave para el éxito... (p. 1).

Se deduce, por tanto, que la gestión de ingeniería aplicada a la era de la Industria 5.0 demanda un ejercicio profundo de contextualización sociotécnica. El profesional de la ingeniería no debe actuar como un mero implantador acrítico de modas tecnológicas foráneas, sino como un estratega capaz de diagnosticar con rigor las capacidades digitales internas de la organización, diseñando rutas de transición progresivas donde la inversión económica se sincronice de forma milimétrica con el desarrollo cultural, la inclusión laboral de los trabajadores y el respeto irrestricto al entorno ambiental donde se circunscribe la actividad industrial.

Conclusiones o Reflexiones

La revisión sistemática y el análisis crítico de la literatura científica especializada permiten concluir de manera categórica que la Industria 5.0 no representa una simple iteración tecnológica o una moda corporativa pasajera, sino una evolución doctrinal e infraestructural impostergradable que enmienda el sesgo estrictamente tecnocéntrico de la transformación digital precedente. Al desplazar el núcleo estratégico

desde la automatización irrestricta hacia un modelo fundamentado en la centralidad humana, la sostenibilidad ecológica y la resiliencia operativa, el nuevo paradigma redefine el concepto global de éxito industrial, supeditando el despliegue de los sistemas ciberfísicos e inteligentes al bienestar colectivo y a la preservación biofísica del entorno. De este modo, la tecnología deja de ser concebida como un fin autónomo para erigirse en un catalizador ético y social del progreso productivo.

En el ámbito netamente operativo, las evidencias analizadas desmitifican la premisa de que los enfoques humanistas y ecológicos colisionan con los rendimientos financieros de las organizaciones. La consolidación de la denominada "Empresa 5.0" demuestra que la cooperación simbiótica entre el talento humano y los sistemas robóticos colaborativos (cobots) no solo resguarda la salud ergonómica de los operarios al liberarlos de tareas monótonas o peligrosas, sino que además provee a las industrias de una flexibilidad y agilidad sin precedentes para migrar hacia esquemas avanzados de personalización masiva sin incurrir en penalizaciones económicas severas. Asimismo, la integración inteligente de plataformas de monitoreo energético y análisis predictivo robustece la resiliencia de la cadena de valor ante perturbaciones macroeconómicas o geopolíticas, transformando el respeto a los límites del planeta y la proactividad institucional en ventajas competitivas insustituibles a largo plazo.

No obstante, la materialización práctica de este ecosistema híbrido impone a la praxis de la ingeniería contemporánea un conjunto de desafíos multidimensionales que restringen su adopción homogénea. El incremento exponencial de la interconectividad digital amplía drásticamente la superficie de vulnerabilidad ante ciberataques industriales, exigiendo arquitecturas de seguridad informática sumamente rígidas. Paralelamente, la gobernanza ética de los datos plantea debates complejos en torno a la privacidad y el riesgo de hipervigilancia digital sobre las variables fisiológicas de los trabajadores, obligando al diseñador técnico a estructurar sistemas de control transparentes que eviten la despersonalización o la opresión panóptica en el puesto de trabajo. Desde una perspectiva epistemológica, se resalta la necesidad de mantener una supervisión humana estricta sobre las redes neuronales, entendiendo que las facultades morales, heurísticas y empáticas del individuo son biológicamente irreplicables por algoritmos de libre albedrío simulado.

Finalmente, la investigación pone de manifiesto que el verdadero factor limitante para la transición hacia la Era 5.0 no reside en la disponibilidad del hardware o del software, sino en la dimensión cultural, educativa y socioeconómica del capital humano. Las instituciones de educación universitaria se enfrentan a la exigencia perentoria de reconfigurar de inmediato sus planes de estudio en las ciencias de la ingeniería, amalgamando de forma equilibrada las competencias técnicas duras con habilidades blandas transversales como el pensamiento crítico, la adaptabilidad y la responsabilidad social. Asimismo, en los

contextos de economías emergentes —como el latinoamericano—, el éxito del paradigma dependerá de la capacidad política y corporativa para democratizar el acceso tecnológico y diseñar planes estratégicos inclusivos de reconversión profesional, derribando las barreras crediticias e infraestructurales que marginan a las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) e impidiendo que la brecha digital se traduzca en una nueva fuente de exclusión y polarización laboral.

Referencias

- ABB. (octubre de 2022). *La Industria 5.0, el nuevo paradigma de la transformación digital*. ABB Electrification. https://aristosindustrial.es/wp-content/uploads/2022/10/ABB_NDP_Industria-5.0.pdf
- Carro, J. y Sarmiento, S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24). <https://revistas.unam.mx/index.php/entreciencias/issue/view/6001>
- Chiatchoua, C. (2022). Hacia una Industria 4.0 en México: potencialidades, desafíos y necesidades. *Tecnotrend*, 7(12), 1-8. <https://tecnotrend.lasallebajio.edu.mx/?n=12&p=129>
- De Val Pardo, I. (2021). Más allá de la Industria 5.0: realidad y deseo. *Encuentros Multidisciplinares*, (68). <http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-68/isabel-de-val.pdf>
- Moreno, A., Moreno, P., Bueno, M. y Mendoza, G. (2025). Evolución de la industria 5.0 y su efecto en la proactividad. *Polo del Conocimiento*, 10(1). <https://doi.org/10.23857/pc.v10i1.8945>
- Mujica, V. (2024). El rol del ingeniero industrial en la industria 5.0: Desafíos curriculares y habilidades requeridas. *Revista FACES*, 6(1), 93-114. <https://servicio.bc.uc.edu.ve/faces/revista/>
- Naranjo, J. (s.f.). *El camino hacia la Industria 5.0*. Oficina Acelera Pyme, Diputación de Soria. Open-Ideas. <https://acelerapyme.dipsoria.es/storage/2025/04/EL-CAMINO-HACIA-LA-INDUSTRIA-5.0.pdf>
- Pérez-Domínguez, L. A. (2024). Las principales tecnologías de la era de la industria 5.0. *Revista Ingenio*, 21(1), 60-70. <https://doi.org/10.22463/2011642X.4352>
- Romero, M. y Osorio, J. (2025). *Industria 5.0: Un Paradigma Centrado en el Ser Humano para la Sostenibilidad y Resiliencia Productiva*. *Innovaciones de Negocios*, 22(44), 71-96. <https://doi.org/10.29105/in22.44-481>
- Tato, J. (2023). *Análisis del nuevo paradigma de la industria 5.0 y su efecto en la estrategia de una empresa tecnológica*. [Trabajo de Fin de Máster, Universidad Católica de Murcia]. <https://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/7678/TATO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Travez, A. y Villafuerte, C. (2023). Industria 5.0, revisión del pasado y futuro de la producción y la industria. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 7(1). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4457
- Zambrano, C. y Pilco, R. (2023). *Preparando a las Empresas para la Revolución Industrial 5.0: Un Análisis Teórico sobre su Preparación y Desafíos*. Samborondón. Posgrado Online, Universidad Espíritu Santo. <https://repositorio.uees.edu.ec/items/6a2ada3d-f51e-4c44-acb5-9fbbd7d931f1>