


# Implementación de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno para limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga

Quevedo Garofalo, Jonathan Fabian y Reimundo Cordonez, Kevin Fernando

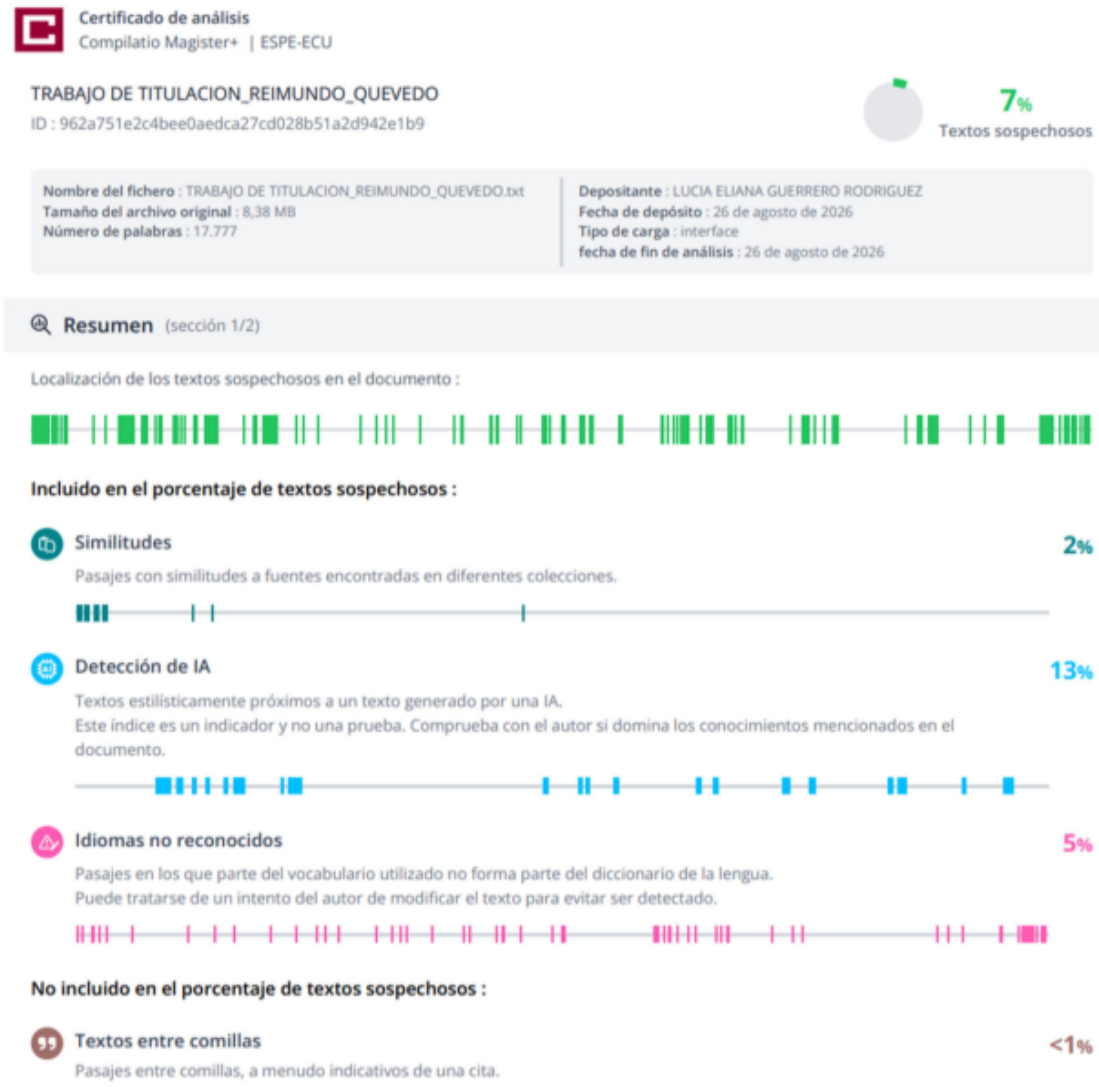
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Automatización e Instrumentación

Mgtr. Guerrero Rodríguez, Lucía Eliana

26 de agosto de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TRABAJO DE TITULACION_REIMUNDO_QUEVEDO
ID : 962a751e2c4bee0aedca27cd028b51a2d942e1b9

7%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TRABAJO DE TITULACION_REIMUNDO_QUEVEDO.txt
Tamaño del archivo original : 8,38 MB
Número de palabras : 17.777

Depositante : LUCIA ELIANA GUERRERO RODRIGUEZ
Fecha de depósito : 26 de agosto de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 26 de agosto de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :

Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 2%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

Detección de IA 13%
Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.

Idiomas no reconocidos 5%
Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%
Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Validez únicamente en Firma.
Firmado electrónicamente por:
LUCIA ELIANA
GUERRERO RODRIGUEZ

**Mgtr. Guerrero Rodríguez, Lucía Eliana**

**Directora**

**C.C.: 0501878649**

**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación**

## Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Implementación de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno para limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga"** fue realizado por los señores **Quevedo Garofalo Jonathan y Reimundo Cordonez Kevin Fernando,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Latacunga, 26 de agosto de 2026**

Validez únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
LUCIA ELIANA
GUERRERO RODRIGUEZ

**Mgtr. Guerrero Rodríguez, Lucía Eliana**

**Directora**

**C.C.: 0501878649**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación**

## Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Quevedo Garofalo, Jonathan Fabian** con cédula de ciudadanía n° 175285156-6 **y Reimundo Cordonez, Kevin Fernando,** con cédula de ciudadanía n° 055010829-4, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Implementación de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno para limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Latacunga, 26 de agosto de 2026**

**Quevedo Garofalo, Jonathan Fabian**

**C.C.: 175285156-6**

**Reimundo Cordonez, Kevin Fernando**

**C.C.: 055010829-4**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación**

## Autorización de Publicación

Nosotros **Quevedo Garofalo, Jonathan Fabian** con cédula de ciudadanía n° 175285156-6 **y Reimundo Cordonez, Kevin Fernando,** con cédula de ciudadanía n° 055010829-4, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Implementación de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno para limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Latacunga, 26 de agosto de 2026**

**Quevedo Garofalo, Jonathan Fabian**

**C.C.: 175285156-6**

**Reimundo Cordonez, Kevin Fernando**

**C.C.: 055010829-4**

## Dedicatoria

Este logro representa el esfuerzo de muchos años y no habría sido posible sin las personas que me acompañaron, y también sin las lecciones de vida que me hicieron más fuerte.

En primer lugar, dedico este trabajo a mi madre, por ser mi mayor inspiración, por su amor infinito y por cada sacrificio que hizo para verme llegar hasta aquí. A mi abuela, mi segunda madre, cuyas enseñanzas, ternura y paciencia me acompañaron en cada paso que di, formando a la persona que soy hoy. A mi padrastro, por su apoyo incondicional, por creer en mí y ser un respaldo constante e invaluable en mi vida.

A mi padre, por haberme demostrado que no necesito de nadie más que de mí mismo para lograr mis objetivos y descubrir mi propia fortaleza.

A toda mi familia, por ser mi refugio seguro y brindarme el aliento necesario para no rendirme nunca.

A Dayana, mi mejor amiga, gracias por tu lealtad, por las risas compartidas y por estar a mi lado tanto en los momentos de estrés como en los de alegría.

Finalmente, una dedicatoria muy especial para Anderson mi hermano. Fuiste una pieza fundamental en este proceso. Gracias por empujarme a ser mejor, por escucharme, por tu paciencia y por acompañarme en cada desafío de esta carrera. Este triunfo es tan tuyo como mío.

REIMUNDO CORDONEZ KEVIN FERNANDO

## Dedicatoria

Este logro representa el esfuerzo de muchos años y no habría sido posible sin las personas que me acompañaron y me brindaron su aliento en cada etapa de este camino.

En primer lugar, dedico este trabajo a mi madre, por ser mi mayor inspiración y mi pilar más fuerte. Gracias por tu amor infinito, por tu paciencia inagotable y por cada sacrificio que hiciste para verme llegar hasta aquí; todo lo que soy te lo debo a ti.

A mis hermanas, Jessica y Paola, por ser mis compañeras incondicionales. Gracias por escucharme, por su apoyo constante y por darme ánimos en los momentos que más lo necesitaba. Su presencia en mi vida es un refugio seguro y este triunfo también es suyo.

A mi padre, por haberme forjado el carácter y demostrado la fortaleza que llevo dentro. Gracias por impulsarme a superar los obstáculos, a confiar en mis propias capacidades y a luchar con determinación para alcanzar mis metas.

Finalmente, a mis amigos, gracias por las risas compartidas, por su lealtad y por estar a mi lado tanto en las largas jornadas de estrés como en los momentos de alegría. Ustedes hicieron que la carga académica fuera más ligera y convirtieron esta etapa en una experiencia que llevaré siempre conmigo.

QUEVEDO GAROFALO JONATHAN FABIAN

**Agradecimiento**

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Santísima Virgen del Quinche, por brindarme la salud, la sabiduría y la fuerza espiritual necesaria para no rendirme y llegar hasta este momento, iluminando cada paso de mi camino.

A la Mgtr. Lucia Guerrero, le extiendo mi más sincera gratitud. Su guía, paciencia y conocimientos fueron un apoyo y una ayuda inmensa para la realización y culminación de este trabajo.

A mis grandes amigos que me ha regalado la universidad y la vida: Cristofer, Josué, Keveen, Lesly y Liseth. Gracias por las vivencias compartidas, por aligerar la carga académica y por hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

Finalmente, a mi compañero de titulación, Jonathan. Gracias totales por el aguante en las largas jornadas, por el trabajo en equipo y por el apoyo mutuo que nos brindamos para sacar este proyecto adelante. ¡Lo logramos!

REIMUNDO CORDONEZ KEVIN FERNANDO

**Agradecimiento**

A mi familia, por ser mi pilar fundamental y mi mayor motivación. Gracias por su apoyo incondicional, por su infinita paciencia y por todos los sacrificios que han hecho para permitirme alcanzar esta meta. Este logro académico es el reflejo de todo lo que me han brindado y les pertenece a ustedes tanto como a mí.

A la Mgtr. Lucia Guerrero, por su tiempo, su invaluable guía y su orientación a lo largo de este proceso. Gracias por compartir sus conocimientos y por encaminarnos con paciencia para culminar con éxito este trabajo de titulación.

A mis amigos: Mateo, Josué, Jesús, Isac, Daniel y Evelyn. Gracias por su valiosa amistad, por los momentos compartidos, por hacer que la carga académica sea más ligera y por convertir esta etapa universitaria en una experiencia inolvidable.

Finalmente, a mi compañero de tesis, Kevin Reimundo. Gracias por el gran equipo que formamos, por la dedicación y por no rendirnos frente a los retos de este proyecto. El esfuerzo mutuo, la constancia y el aguante en esas largas jornadas de trabajo fueron la clave para sacar todo esto adelante. ¡Misión cumplida, lo logramos!

QUEVEDO GAROFALO JONATHAN FABIAN

## Índice de contenidos

Carátula ..... 1
Reporte de verificación de contenidos ..... 2
Certificación ..... 3
Responsabilidad de Autoría ..... 4
Autorización de Publicación ..... 5
Dedicatoria ..... 6
Dedicatoria ..... 7
Agradecimiento ..... 8
Agradecimiento ..... 9
Índice de contenidos ..... 10
Índice de tablas ..... 14
Índice de figuras ..... 15
Índice de ecuaciones ..... 18
Resumen ..... 19
Abstract ..... 20
Capítulo I ..... 21
Introducción ..... 21
Planteamiento del problema ..... 22
Formulación del problema o pregunta de investigación ..... 23
Objetivos ..... 23
*Objetivo general* ..... *23*
*Objetivos específicos* ..... *23*
Justificación ..... 24
Antecedentes ..... 25

*Navegación Autónoma y Mapeo con Tecnología LIDAR* ..... *25*

*Aporte del Presente Proyecto* ..... *25*

*Alcance* ..... *26*

Capítulo II ..... 28

Marco teórico ..... 28

Introducción ..... 28

Vehículos Autónomos Guiados: Definición y Métodos de Guiado ..... 28

Robótica Móvil y Cinemática de Tracción Diferencial ..... 30

Sensores de Medición de Distancia: Tecnología LDS y Principio ToF ..... 31

Odometría e Integración Cinestésica ..... 33

Microcontroladores y Sistemas Embebidos ..... 34

Instrumentación para la Medición de Corriente y Tensión en la Estación de Carga ..... 35

Medición de corriente mediante resistencia de derivación ..... 36

El circuito integrado INA219 ..... 38

Acondicionamiento de la señal: amplificador de derivación ..... 39

*Conversión analógico-digital* ..... *40*

*Interfaz de comunicación I²C* ..... *41*

*Determinación de la potencia y la energía consumida* ..... *43*

Topología y Aislamiento en Redes Inalámbricas Institucionales ..... 44

Interfaz Humano-Máquina Embebida ..... 44

Indicadores de Desempeño Operativo ..... 46

Marco conceptual ..... 47

Capítulo III ..... 50

Desarrollo ..... 50

Enfoque de la investigación ..... 50

Modalidad de la investigación ..... 50

Desarrollo del sistema.....50
Implementación del sistema de adquisición y medición de parámetros eléctricos.....51
*Diseño del nodo de procesamiento y comunicación.....52*
*Diseño del sistema de adquisición y medición de energía .....53*
*Diseño de la interfaz gráfica (HMI).....54*
*Servidor web.....56*
Adquisición de datos.....62
*Curva de carga .....63*
Calibración y validación del instrumento .....63
Consideraciones éticas.....64
Implementación.....65
*Registro histórico en memoria no volátil.....65*
*Carga a respaldar de la base de carga (Xiaomi E101CDZ):.....67*
*Cálculo de autonomía frente a la carga real del sistema.....69*
Análisis de resultados.....70
*Descripción general del ensayo .....70*
*Estadística descriptiva del tramo de carga activa.....70*
*Energía consumida y validación contra la capacidad teórica de la batería.....71*
*Comportamiento en el tramo previo al arranque de la carga.....72*
*Registro operativo del vehículo y de los consumibles .....72*
*Configuración de rutinas de limpieza automatizada .....75*
Implementación del interfaz Humano-Maquina .....79
Acoplamiento final de la estación de carga y supervisión.....80
Capítulo IV.....91
Conclusiones y recomendaciones.....91
Conclusiones .....91

Recomendaciones .....93

Referencias.....95

Apéndice.....98

## Índice de tablas

**Tabla 1** Justificación de las librerías de software seleccionadas.....57

**Tabla 2** Contraste de las lecturas .....64

**Tabla 3** Estadística descriptiva de las variables eléctricas.....71

## Índice de figuras

**Figura 1** Navegación Laser .....28

**Figura 2** Funcionamiento del sensor LiDAR. .....30

**Figura 3** AGV para instalaciones de salud.....31

**Figura 4** Principio básico y aplicación del sistema TOF.....32

**Figura 5** Odometría visual-inercial monocular (VIO) mediante grafo de factores.....33

**Figura 6** Estructura genérica de un microcontrolador .....34

**Figura 7** Estructura de los pines de la ESP32 DEVKIT.....35

**Figura 8** Robot AGV comercial Xiaomi S40C .....36

**Figura 9** Modulo Sensor Monitor de Corriente y Voltaje Dc .....38

**Figura 10** Esquema de acondicionamiento de Señal.....40

**Figura 11** Conversor Análogo – Digital (ADC) .....41

**Figura 12** Esquema de comunicación y elementos .....42

**Figura 13** Ejemplo de Diagrama de un HMI.....45

**Figura 14** Conexión WebSocket.....46

**Figura 15** Diagrama de conexión del módulo INA219 a los GPIO de la ESP32.....51

**Figura 16** Programación para el nodo de procesamiento y comunicación.....52

**Figura 17** Definición de pines I2C.....53

**Figura 18** Declaración de credenciales del punto de acceso.....54

**Figura 19** Creación del servidor asíncrono y del WebSocket.....54

**Figura 20** Activación del modo punto de acceso .....55

**Figura 21** Registro del manejador de WebSocket sobre el servidor .....55

**Figura 22** Inclusión del archivo de cabecera .....58

**Figura 23** Respuesta HTTP.....58

**Figura 24** Guardas de inclusión.....58

**Figura 25** Declaración de la constante en PROGMEM.....59

**Figura 26** Variables para la "Estación de carga".....59

**Figura 27** Registrador de la Curva de Carga.....60

**Figura 28** Panel "Supervisión".....61

**Figura 29** Bloque inferior "Vida útil de consumibles".....61

**Figura 30** Representación Gráfica “Vida útil de consumibles" .....61

**Figura 31** Envío periódico de la trama JSON hacia la interfaz.....62

**Figura 32** Declaración del nombre del archivo y del formato .....65

**Figura 33** Función auxiliar que convierte el punto decimal .....65

**Figura 34** Instalación del UPS como respaldo energético .....66

**Figura 35** Gabinete metálico Beaucoup empleado para alojar la etapa de potencia.....67

**Figura 36** Adaptador que entrega 20VDC .....68

**Figura 37** Baterías de Litio .....69

**Figura 38** Historial semanal de misiones de limpieza (veces).....72

**Figura 39** Historial semanal de misiones de limpieza (duración) .....73

**Figura 40** Historial semanal de misiones de limpieza (Área) .....74

**Figura 41** Gestión de consumibles del vehículo .....74

**Figura 42** Reconocimiento y seccionamiento del laboratorio de Circuitos Eléctricos. .....76

**Figura 43** Reconocimiento de las Zonas y comienzo del mapeo. .....77

**Figura 44** Mapeo del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Zona 2. .....78

**Figura 45** Finalización del mapeo del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Zona 3. .....79

**Figura 46** Interfaz humano – máquina.....80

**Figura 47** Implementación final .....82

**Figura 48** Diagrama de flujo de la comunicación del sistema. .....82

**Figura 49** Distribución de energía y comunicación del sistema .....83

**Figura 50** Distribución y datos desplegados en el HMI. .....84

**Figura 51** Verificación del módulo INA219.....85

**Figura 52** Preparación de la línea de potencia .....86

**Figura 53** Diseño del HMI. .....87

**Figura 54** Integración del INA219 en el circuito .....88

**Figura 55** Depuración y validación del registro. .....89

**Figura 56** Instalación física del sistema .....90

## Índice de ecuaciones

**Ecuación 1** Formula para calcular distancia.....32

**Ecuación 2** Ley de Ohm con caída de tensión.....37

**Ecuación 3** Ley de Joule.....37

**Ecuación 4** Ecuación de la relación de rechazo en modo común.....39

**Ecuación 5** Resolución del ADC.....41

**Ecuación 6** Potencia eléctrica instantánea.....43

**Ecuación 7** Energía eléctrica.....43

**Ecuación 8** Energía eléctrica discreta.....43

**Ecuación 9** Potencia entrega en la carga.....67

## Resumen

El presente trabajo de integración curricular detalla la implementación de un sistema de limpieza autónoma supervisada para el laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Latacunga. Este entorno académico presenta un alto tráfico diario, lo que reduce las ventanas de tiempo disponibles y dificulta el mantenimiento mediante métodos manuales tradicionales; estos resultan insuficientes, demandan jornadas extensas y presentan limitaciones de acceso en los espacios reducidos bajo las mesas de trabajo y los anaqueles. A ello se suma la ausencia total de registro y trazabilidad del proceso, que impide verificar su cumplimiento y cuantificar su costo operativo. Para solventar esta problemática, se implementa un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) de plataforma comercial, dotado de un sensor de distancia láser (LDS) que ejecuta el mapeo básico del entorno, la evasión de obstáculos y la planificación de rutas, integrado a una capa de supervisión de diseño propio construida sobre un microcontrolador ESP32. Dicha capa incorpora instrumentación electrónica en la estación de carga para la medición de corriente y tensión, lo que permite registrar la energía consumida por ciclo y calcular indicadores de disponibilidad operativa. La supervisión y el comando se ejecutan desde una Interfaz Humano-Máquina (HMI) de corte industrial, servida por el propio microcontrolador sobre una subred inalámbrica aislada del laboratorio. La metodología se enmarca en un enfoque cuantitativo-tecnológico, orientado a evaluar el desempeño del sistema mediante estadística descriptiva aplicada a las variables medidas. Como resultado, el sistema integra un equipo comercial cerrado dentro de una arquitectura de supervisión abierta, aplicando de manera práctica los principios de instrumentación, adquisición de datos y la supervisión propia de la Industria 4.0.


*Palabras clave:* vehículo autónomo guiado, supervisión, instrumentación, adquisición de datos, interfaz humano-máquina, Industria 4.0.

**Abstract**

This curriculum integration project details the implementation of a supervised autonomous cleaning system for the Electrical Circuits laboratory at the University of the Armed Forces ESPE, Latacunga campus. This academic environment experiences high daily traffic, which narrows the available time windows and hinders maintenance through traditional manual methods; these prove insufficient, demand long working shifts, and face access limitations in the confined spaces beneath workbenches and shelves. In addition, the process currently lacks any form of recording or traceability, which prevents verifying its execution and quantifying its operational cost. To address this issue, a commercial Automated Guided Vehicle (AGV) platform is deployed, equipped with a Laser Distance Sensor (LDS) that performs basic environment mapping, obstacle avoidance, and route planning, integrated into a custom supervisory layer built on an ESP32 microcontroller. This layer incorporates electronic instrumentation at the charging station for current and voltage measurement, together with laboratory occupancy sensing, allowing cleaning missions to be scheduled within the windows when the space is unoccupied, recording the energy consumed per cycle, and computing operational availability indicators. Supervision and commanding are carried out through an industrial-grade Human-Machine Interface (HMI) served by the microcontroller itself over an isolated wireless subnet within the laboratory. The methodology follows a quantitative-technological approach, aimed at evaluating system performance through descriptive statistics applied to the measured variables. As a result, the system integrates closed commercial equipment into an open supervisory architecture, providing a practical application of the instrumentation, data acquisition, and supervisory control principles of Industry 4.0.

*Keywords:* automated guided vehicle, supervision, instrumentation, data acquisition, human-machine interface, Industry 4.0.

# Capítulo I

## Introducción

El avance de la automatización y la robótica móvil, existen dos pilares fundamentales de la industria 4.0, ha propiciado que las tareas manuales repetitivas pasen a ser realizadas por sistemas autónomos altamente eficientes. Hoy en día los Vehículos Autónomos Guiados (AGV) ya no son sólo para la logística industrial, sino que se han instalado en ámbitos académicos y de servicios, ofreciendo soluciones precisas para actividades como el mantenimiento y la limpieza de espacios físicos.

Dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Latacunga, el laboratorio de Circuitos Eléctricos es un espacio fundamental para la formación técnica de los estudiantes. Sin embargo, la gran concurrencia y la distribución física de los equipos de trabajo en el nivel del suelo dificultan la ejecución de las labores de limpieza mediante métodos tradicionales, demandando tiempos excesivos y dejando zonas críticas de difícil acceso sin la higiene adecuada.

El problema de ingeniería ha cambiado con la disponibilidad de plataformas AGV comerciales dotadas de navegación láser: la dificultad no está ya en construir el vehículo sino en integrar un equipo comercial cerrado dentro de una arquitectura de supervisión abierta que permita programarlo, monitorearlo y auditarlo bajo criterios industriales. La situación es similar a la de la industria real, cuando ésta tiene que integrar a sus sistemas de control actuales equipos propietarios.

Con el objetivo de dar solución a esta necesidad, el presente proyecto desarrolla la implementación de un sistema de limpieza autónoma supervisada. La plataforma AGV cuenta con un sensor de distancia láser (LDS) que le permite mapear de forma básica el entorno, evitar obstáculos y optimizar rutas en los espacios reducidos bajo los anaqueles. Encima de ella se construye una capa de adquisición y supervisión basada en el microcontrolador ESP32, que instrumenta la estación de carga, detecta la ocupación del laboratorio, gestiona el pido de las

misiones y presenta la información al operador mediante una Interfaz Humano-Máquina de corte industrial, prescindiendo de la aplicación comercial de usuario final.

El documento está organizado de la siguiente manera: el Capítulo I presenta la formulación del problema, los objetivos, la justificación, los antecedentes y el alcance del trabajo. El Capítulo II presenta el marco teórico y los conceptos sobre los que se apoya el desarrollo del sistema. El Capítulo III describe la metodología empleada para el desarrollo, la aplicación y la evaluación de desempeño. En el Capítulo IV se lleva a cabo el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Por último, el Capítulo V recoge las conclusiones y recomendaciones que se extraen del trabajo realizado.

**Planteamiento del problema**

El Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, es un ambiente académico de alto tránsito y de vital importancia para el desarrollo práctico de los estudiantes. Todos los días este lugar es muy concurrido por profesores y estudiantes, y eso reduce los espacios de tiempo disponibles e impide que las tareas de limpieza se realicen con normalidad utilizando los métodos tradicionales.

El problema tiene tres dimensiones. En el primero, se trata de una ineficiencia temporal: para mantener el laboratorio en condiciones óptimas de limpieza integral es necesario una elevada inversión de tiempo humano, y se estima que el personal de servicios generales debería dedicar casi exclusivamente al espacio en cuestión alrededor de una hora diaria, tiempo que compite directamente con la atención de las demás áreas del campus.

En segundo lugar, la configuración física del lugar impone limitaciones de acceso a nivel de piso. El laboratorio tiene anaqueles y mesas de trabajo cuya altura libre del piso no permite la entrada de los implementos de aseo convencionales y la postura del operario, por lo que las zonas ubicadas debajo de estos mobiliarios acumulan polvo y residuos de forma sostenida. Esa acumulación es particularmente importante en un laboratorio de circuitos eléctricos, ya que el

polvo que se deposita en los conductores, los bornes y los equipos de medición favorece las corrientes de fuga y degrada la precisión de los instrumentos.

En tercer lugar, y de forma transversal a lo anterior, el proceso carece totalmente de registro y trazabilidad. No se cuenta con información que permita determinar cuándo se realizó la limpieza, cuánto tiempo demandó, qué superficie efectiva se cubrió y qué recursos consumió. Esta falta de datos no permite comprobar el cumplimiento del proceso, ni evaluar objetivamente cualquier mejora que se introduzca, ni justificar técnicamente las decisiones de mantenimiento del espacio.

**Formulación del problema o pregunta de investigación**

¿De qué manera la implementación de un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno, integrado a una capa de adquisición y supervisión de datos, optimiza el tiempo operativo, el acceso a espacios reducidos y la trazabilidad del proceso de limpieza en el laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Latacunga?

**Objetivos**

***Objetivo general***

Implementar un sistema de limpieza autónoma supervisada, basado en un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno y una capa de adquisición y supervisión de datos, para mejorar el proceso de limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Latacunga.

***Objetivos específicos***

- Analizar el estado del arte y las especificaciones técnicas de las plataformas AGV comerciales con navegación láser y de las arquitecturas de supervisión embebida, a fin de establecer los criterios de selección e integración del sistema.

- Diseñar e implementar el nodo de adquisición y supervisión sobre microcontrolador ESP32, incorporando la instrumentación de la estación de carga, la gestión de las misiones de limpieza y la Interfaz Humano-Máquina para su monitoreo.
- Validar el funcionamiento del sistema mediante pruebas en el entorno real del laboratorio, evaluando la cobertura de limpieza, la duración y la energía consumida por misión, y la disponibilidad operativa frente al método manual empleado actualmente.

**Justificación**

La justificación del presente proyecto se fundamenta en la necesidad de modernizar e innovar los procesos de mantenimiento y limpieza dentro del entorno académico del laboratorio de Circuitos Eléctricos. Desde una perspectiva práctica y operativa, la automatización de la limpieza mediante un sistema robótico móvil permite abordar de manera directa las limitaciones del aseo manual, reduciendo el tiempo de dedicación que actualmente recae sobre el personal de servicios generales. Gracias a su navegación láser, el AGV accede a los espacios confinados bajo los anaqueles y bases de trabajo, zonas que por su naturaleza resultan de difícil alcance humano.

Desde el punto de vista tecnológico y académico, la ejecución de este trabajo representa un espacio fundamental para consolidar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación. El núcleo de ingeniería del proyecto no reside en el vehículo, sino en la capa de supervisión que se construye sobre él: el diseño del acondicionamiento y la instrumentación de la estación de carga, la programación del microcontrolador ESP32 como unidad de adquisición y control, la definición de la lógica de enclavamiento que condiciona el arranque de las misiones a la ocupación real del espacio, el diseño de la topología de red aislada y el desarrollo de la Interfaz Humano-Máquina.

De este modo, el proyecto integra áreas fundamentales de la carrera como la instrumentación electrónica, la adquisición y el procesamiento de datos, el control supervisorio y las redes industriales. Adicionalmente, el enfoque adoptado reproduce un escenario habitual en

la industria: la incorporación de equipamiento comercial cerrado dentro de arquitecturas de control abiertas, problema conocido como integración de sistemas heredados o brownfield, cuya resolución constituye una competencia profesional directamente transferible al ejercicio del tecnólogo.

## Antecedentes

Los Vehículos Autónomos Guiados (AGV) en la robótica de servicios han dado un salto formidable, gracias a la creciente accesibilidad de plataformas comerciales dotadas de percepción espacial y a la consolidación de arquitecturas abiertas de supervisión. Se detallan los estudios que conforman la base tecnológica de este trabajo haciendo énfasis en la navegación mediante sensores de distancia láser, las arquitecturas de control distribuido y la integración de equipamiento comercial cerrado dentro de sistemas de supervisión abiertos.

### *Navegación Autónoma y Mapeo con Tecnología LIDAR*

Dentro del dominio de la percepción ambiental, los sensores LIDAR para la medición de distancia se han establecido como la opción ideal para la robótica móvil en interiores. Los trabajos pioneros de Zhang y Singh [1] evidenciaron que los algoritmos de odometría y mapeo LIDAR (LOAM) son capaces de generar representaciones tridimensionales de alta fidelidad en tiempo real. Más recientemente, estudios como el de Macario et al. (2023) han demostrado que los sistemas SLAM que funcionan únicamente con sensores LIDAR (LiDAR-Only SLAM) logran tiempos de respuesta muy bajos y alta fiabilidad en condiciones de iluminación variable, lo que resulta ideal para pasillos y laboratorios. En el contexto de la limpieza automatizada, estos sensores son mucho más superiores que los sistemas tradicionales de evasión por topes mecánicos o ultrasonido, reduciendo la tasa de colisiones en espacios confinados.

### *Aporte del Presente Proyecto*

Existen múltiples desarrollos comerciales en el campo de los robots de limpieza autónoma; sin embargo, todos ellos operan como sistemas cerrados, concebidos para el usuario doméstico y gobernados exclusivamente desde una aplicación móvil propietaria que no

expone la información del proceso ni permite condicionar su ejecución a variables externas. El presente proyecto no busca replicar la plataforma de navegación, tarea ya resuelta industrialmente, sino superar esa limitación mediante el diseño de una capa externa de instrumentación y supervisión que convierte al equipo comercial en un activo monitoreado y auditable dentro de un entorno institucional.

El aporte concreto se materializa en cuatro elementos. Primero, la instrumentación de la estación de carga mediante el circuito integrado INA219, que permite obtener por medios propios variables de proceso que el fabricante no expone, tales como la energía consumida por misión, la duración efectiva de cada ciclo y el estado real de acople del vehículo. Segundo, la rutina de limpieza programada, que combina el criterio temporal con el de ocupación para ejecutar la misión de forma autónoma sin intervención del operador. Tercero, la sustitución de la aplicación comercial de usuario final por una Interfaz Humano-Máquina de corte industrial, autocontenida y servida localmente sobre una subred aislada, accesible desde cualquier terminal del laboratorio sin depender de servicios en la nube de terceros.

De esta manera, el trabajo establece una plataforma académica replicable que ejemplifica los principios de instrumentación, adquisición de datos y la supervisión propia de la Industria 4.0, aplicados sobre una problemática cotidiana y verificable del propio campus.

***Alcance***

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo la implementación de un sistema de limpieza autónoma supervisada, destinado exclusivamente a la limpieza a nivel del suelo en el laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Latacunga.

A nivel de hardware, el proyecto abarca la selección e integración de una plataforma AGV comercial dotada de sensor de distancia láser, y el diseño, montaje y puesta en marcha del nodo de adquisición y supervisión, que comprende el microcontrolador ESP32, la

instrumentación de medición de corriente y tensión en la estación de carga mediante el circuito integrado INA219, y la infraestructura de red inalámbrica aislada.

A nivel de software, el alcance se delimita al desarrollo del firmware del microcontrolador para la adquisición periódica de las variables instrumentadas, la máquina de estados que gestiona el ciclo de carga y de misión, la lógica de enclavamiento por ocupación, la rutina de limpieza programada para los días viernes, el registro histórico de las variables en memoria no volátil, y la Interfaz Humano-Máquina de tipo web, autocontenida y servida por el propio dispositivo, sin dependencia de servicios externos ni de la aplicación comercial del fabricante.

El proyecto no contempla la modificación, intervención física ni reprogramación del firmware interno de la plataforma AGV comercial, la cual se integra en su condición original de fábrica y se trata como un equipo de campo cerrado. En consecuencia, los algoritmos de mapeo, localización y planificación de rutas ejecutados internamente por el vehículo no forman parte del desarrollo propio y se documentan únicamente a nivel de especificación funcional. Tampoco se contempla la limpieza, desinfección o manipulación de los instrumentos, fuentes de poder o equipos de medición ubicados sobre las mesas de trabajo, ni la reconstrucción arquitectónica tridimensional del laboratorio, ni la integración del sistema a plataformas domóticas o servicios en la nube de terceros, en concordancia con la topología de red aislada descrita en el Capítulo II.

Finalmente, el sistema será validado mediante pruebas de funcionamiento in situ, orientadas a comprobar la cobertura de limpieza alcanzada, la autonomía operativa, la exactitud de las variables eléctricas adquiridas frente a un instrumento patrón, y la consistencia de los datos registrados por la capa de supervisión en el entorno físico establecido.

# Capítulo II

# Marco teórico

## Introducción

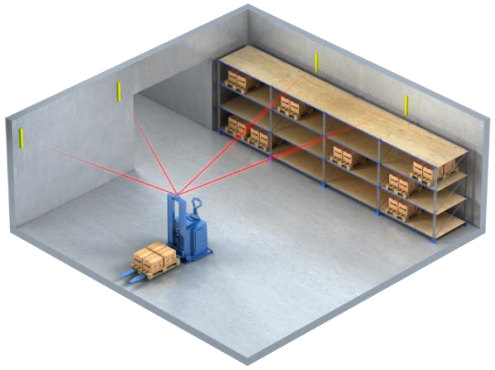
El desarrollo e implementación del presente trabajo de integración curricular se sustenta en los principios de la robótica móvil, la instrumentación electrónica, el control de sistemas embebidos y la arquitectura del Internet de las Cosas Industrial (IIoT). A continuación, se exponen los fundamentos teóricos sobre los que se sustenta el funcionamiento del sistema propuesto, ordenados de acuerdo a las capas que componen la arquitectura: plataforma de navegación, capa de instrumentación y adquisición, y capa de comunicación y supervisión.

### *Vehículos Autónomos Guiados: Definición y Métodos de Guiado*

Un Vehículo Autónomo Guiado (AGV, por sus siglas en inglés) es un robot móvil diseñado para el transporte automatizado de materiales sin la intervención directa de un operador humano [2]. Surgidos originalmente en la década de 1950 en el ámbito de la logística industrial como plataformas de arrastre que seguían cables electrificados en el suelo, sus capacidades tecnológicas se han expandido en la actualidad para abarcar tareas complejas dentro de la robótica de servicios [2].

**Figura 1**

*Navegación Laser*



*Nota*. El AGV cuenta con un sensor láser giratorio (generalmente ubicado en la parte superior) que emite haces de luz láser en abanico o escaneo continuo hacia el entorno circundante. Tomado de [2].

El sensor mide el ángulo y la distancia exacta respecto a estos reflectores fijos. Haciendo un cálculo de triangulación geométrica en tiempo real, el vehículo determina su posición exacta dentro del mapa del almacén [2].

Los métodos de navegación empleados por estos vehículos se clasifican de acuerdo con su nivel de dependencia de una infraestructura externa [3].

Entre los métodos tradicionales de trayectoria fija destacan:

- Guiado por cableado enterrado (Inductivo): Emplea un cable energizado bajo la superficie del suelo que genera un campo electromagnético, el cual es detectado y seguido por los sensores del robot [2].
- Guiado por cinta magnética: Utiliza cintas adheridas directamente a la superficie del suelo. Es de instalación económica, pero susceptible al desgaste por el tránsito continuo [3].
- Guiado óptico o láser por reflectores (Triangulación): Requiere la instalación de espejos reflectantes en las paredes o columnas del recinto. Un escáner rotativo en el vehículo emite pulsos y calcula su posición exacta mediante triangulación geométrica [3].

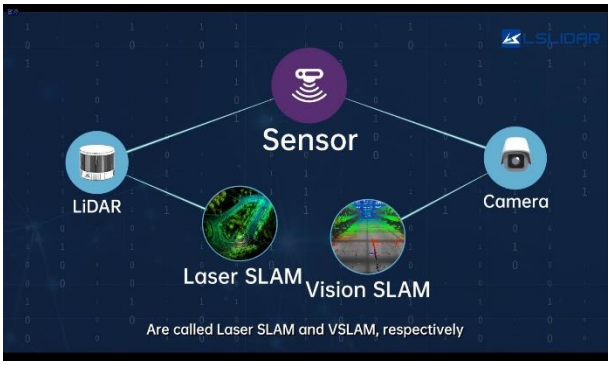
No obstante, para operar en entornos dinámicos se emplea el guiado natural o libre de infraestructura, apoyado en algoritmos de Mapeo y Localización Simultáneos (SLAM) [3]. Este método se fundamenta en el reconocimiento de las características físicas del entorno mediante sensores LiDAR o visión artificial, construyendo un mapa virtual y navegando al comparar las lecturas en tiempo real con dicho mapa [3].

En el presente proyecto, se utiliza una plataforma equipada con guiado natural mediante SLAM (**Figura *2***) y tecnología LiDAR [1], decisión técnica idónea para un entorno académico

como el laboratorio de Circuitos Eléctricos [2]. A diferencia del guiado por cintas (que se degradarían por el tráfico estudiantil) o por reflectores fijos, el guiado natural permite al vehículo navegar, replanificar sus rutas de forma inteligente y evadir obstáculos dinámicos imprevistos característicos de este entorno —tales como mochilas, sillas o personas que cambian de posición— sin necesidad de intervenir la infraestructura del edificio ni alterar la disposición del mobiliario [3].

**Figura 2**

*Funcionamiento del sensor LiDAR.*




*Nota.* El LiDAR, o Lidar (Light Detection and Ranging), es un sistema tecnológico que emplea pulsos láser para medir distancias, creando representaciones detalladas del entorno en tres dimensiones. Tomado de [16].

Estas representaciones, llamadas nubes de puntos, pueden capturar la topografía y la morfología del terreno con una precisión excepcional [16].

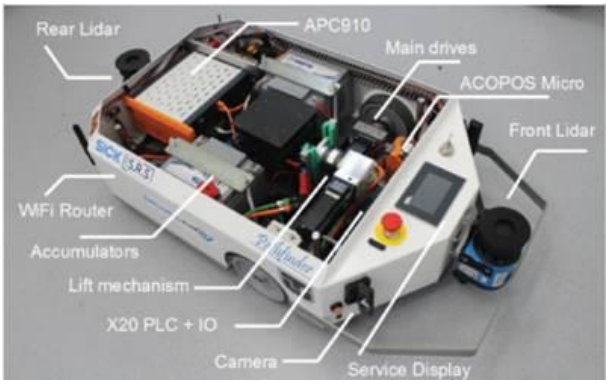
***Robótica Móvil y Cinemática de Tracción Diferencial***

Los Vehículos Autónomos Guiados (**Figura *3***) destinados a tareas de servicio y mantenimiento requieren una alta maniobrabilidad para desenvolverse en entornos con obstáculos tanto estáticos como dinámicos. El sistema cinemático de tracción diferencial, adoptado por la plataforma empleada en este trabajo, está compuesto por dos ruedas motrices montadas sobre un mismo eje transversal y accionadas por motores de corriente continua

independientes; a ello se suma una o más ruedas de giro libre, encargadas de aportar estabilidad mecánica sin restringir el movimiento del conjunto [4].

**Figura 3**

*AGV para instalaciones de salud.*




*Nota.* Se muestra la arquitectura de hardware que mantiene internamente un AGV dedicado para trabajar en entornos de hospital, al no contar con la tapa superior o cubierta, nos permite observar cada componente y sistema del que está compuesto el AGV. Tomado de [5].

El control de la trayectoria y de la velocidad angular del vehículo se logra variando la velocidad relativa entre la rueda izquierda y la derecha. Cuando ambas giran a igual velocidad y en el mismo sentido, el vehículo se desplaza en línea recta; en cambio, si las velocidades difieren, describe una curva cuyo radio depende de la magnitud de esa diferencia [3]. Ante situaciones extremas, como encontrarse con un callejón sin salida entre los anaqueles del laboratorio, la inversión del sentido de giro de una rueda respecto a la otra permite que el vehículo rote sobre su propio eje vertical, con lo cual el radio de giro se reduce prácticamente a cero [4]. Esta característica es la que habilita el desplazamiento en los espacios confinados que motivan el presente trabajo [4].

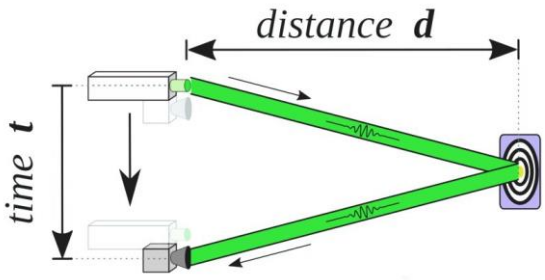
***Sensores de Medición de Distancia: Tecnología LDS y Principio ToF***

Para la percepción espacial y la construcción de mapas del entorno, la plataforma comercial empleada incorpora un Sistema de Distancia Láser o Laser Distance Sensor (LDS), denominación estandarizada en la robótica de consumo para referirse a los sensores LiDAR de

escaneo horizontal en dos dimensiones. Esta torreta que mantiene un sensor, el cual integra un diodo emisor de luz láser infrarroja junto con un fotorreceptor, ambos acoplados a un motor rotativo que barre los trescientos sesenta grados del plano a altas revoluciones por segundo [4]. El principio físico que subyace en este sensor es el tiempo de vuelo (**Figura *4***) o Time of Flight (ToF): el sistema emite un pulso óptico ultracorto hacia el entorno y, al impactar el haz contra la superficie de un obstáculo, ya sean paredes, patas de mesas o tableros de circuitos, una porción de la luz se refleja de vuelta hacia el receptor [4].

**Figura 4**

*Principio básico y aplicación del sistema TOF*




*Nota.* Dado que la velocidad de la luz (representada en física como c) es una constante universal conocida, la distancia al objetivo (d) se puede determinar fácilmente. Tomado de [4].

Debido a que la luz tiene que recorrer el espacio dos veces (el viaje de ida y el de vuelta), el tiempo medido debe dividirse a la mitad [4].

Un cronómetro digital de alta precisión calcula entonces la distancia al objeto a partir de la relación entre la velocidad de la luz en el aire y el tiempo total transcurrido, según la expresión:

$$d = (c \cdot \Delta t) / 2$$ **Ecuación 1**

*Formula para calcular distancia*

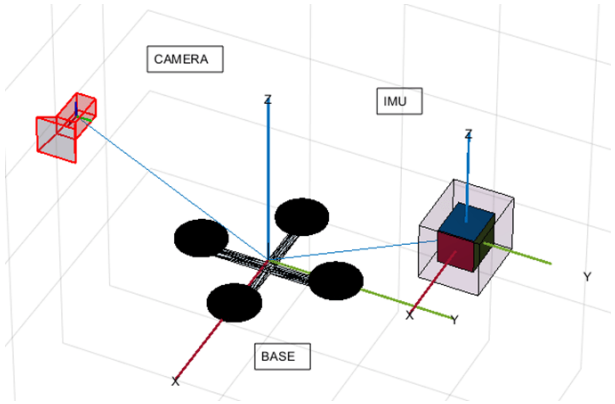
La división entre dos compensa el trayecto de ida y vuelta del haz luminoso. De la agregación continua de estas mediciones en ángulos conocidos resulta un arreglo polar de distancias denominado nube de puntos, que representa con fidelidad el contorno perimetral y los obstáculos presentes en el laboratorio [4].

***Odometría e Integración Cinestésica***

Toda navegación autónoma exige un conocimiento continuo de la posición geométrica y la orientación del vehículo respecto a su punto de partida en el mapa. Para ello se recurre a la Odometría, método de estimación de posición fundamentado en la integración matemática incremental del movimiento rotacional de los actuadores de tracción (**Figura *5***) [1]. El chasis de la plataforma incorpora, en el eje de cada rueda motriz, codificadores ópticos o magnéticos; cada pulso generado por estos corresponde a un desplazamiento lineal conocido en la circunferencia de la llanta.

**Figura 5**

*Odometría visual-inercial monocular (VIO) mediante grafo de factores*




*Nota.* Al integrar de manera diferencial el conteo de pulsos de ambas ruedas en intervalos de muestreo reducidos, el procesador interno del vehículo calcula su posición cartesiana y su ángulo de orientación. Tomado de [4].

El emparejamiento constante de estos datos odométricos con las lecturas espaciales del sensor LDS es lo que permite al sistema corregir los errores acumulativos provocados por el

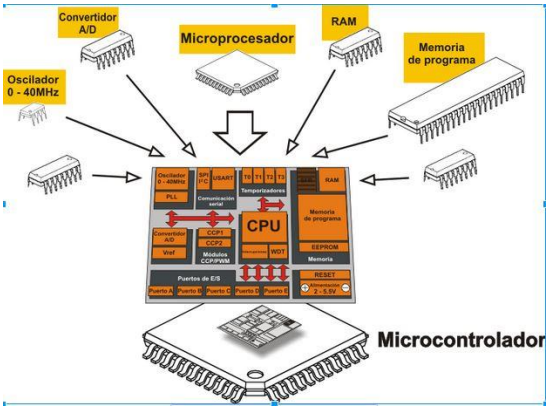
deslizamiento de las ruedas sobre la superficie del suelo, garantizando una localización precisa y el retorno autónomo a la estación de recarga [1].

***Microcontroladores y Sistemas Embebidos***

Un microcontrolador es un circuito integrado que concentra en un solo encapsulado una unidad central de procesamiento, memoria de programa y datos, y periféricos de entrada y salida, diseñado específicamente para ejecutar tareas de control embebido en tiempo real [5]. A diferencia de los microprocesadores convencionales o las computadoras de placa reducida (como la familia Raspberry Pi), los microcontroladores (**Figura 6**) operan con un consumo energético mínimo y no dependen de un sistema operativo de propósito general para garantizar tiempos de respuesta deterministas frente a eventos de hardware [5].

**Figura 6**

*Estructura genérica de un microcontrolador*




*Nota.* Se muestra un diagrama de como básicamente está estructurado cualquier microcontrolador, indicando de esta manera cada componente acoplado en una placa previamente diseñado. Tomado de [7].

Para gestionar la arquitectura de adquisición y supervisión del presente trabajo, se seleccionó el microcontrolador ESP32 de Espressif Systems [6].

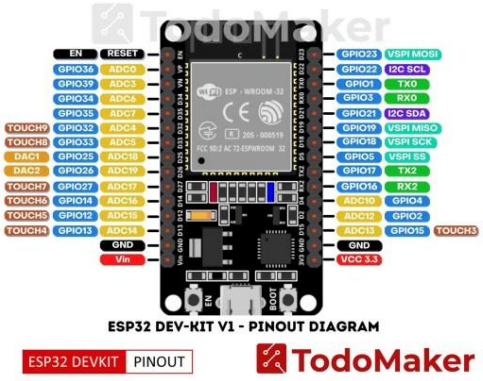
Este dispositivo destaca por integrar un procesador Xtensa de doble núcleo de 32 bits capaz de operar a una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz, respaldado por 520 KB de

memoria SRAM interna y soporte para memoria flash externa [6]. Además, dispone de múltiples modos de bajo consumo (sleep modes) que optimizan la eficiencia energética del sistema [6].

La selección de esta plataforma frente a alternativas comerciales se fundamenta en su alta capacidad de procesamiento a bajo costo, su reducido consumo eléctrico y, de manera crítica, su integración nativa de radiofrecuencia para Wi-Fi y Bluetooth [6]. Esta característica resulta imperativa para desplegar el servidor web embebido y operar la subred inalámbrica aislada dentro del laboratorio. Asimismo, el ESP32 (**Figura *7***) incorpora una amplia gama de periféricos como conversores analógico-digitales (ADC), temporizadores, modulación por ancho de pulso (PWM) y puertos SPI e I²C [6]. Precisamente, el controlador de hardware dedicado para el bus I²C resulta un recurso técnico indispensable para establecer la comunicación y lectura constante del sensor de instrumentación en la estación de carga [6].

**Figura 7**

*Estructura de los pines de la ESP32 DEVKIT*




*Nota.* Se presenta el diagrama de pines (pin_out) que mantiene el ESP32, el esquema visual es una herramienta de referencia indispensable para la integración de hardware. Tomado de [7].

**Instrumentación para la Medición de Corriente y Tensión en la Estación de Carga**

El robot AGV comercial (**Figura *8***) no muestra hacia el exterior las variables de su proceso interno, de manera que la estación de carga constituye la única interfaz física accesible para caracterizar su comportamiento. Instrumentar esta estación permite obtener por medios

propios la corriente y la tensión de carga, y a partir de ellas derivar la energía consumida por misión, la duración efectiva de cada ciclo y el estado real de acople del vehículo, información que el fabricante no proporciona por ningún otro medio.

**Figura 8**

*Robot AGV comercial Xiaomi S40C*



*Nota*. Se muestra el robot aspirador colocado sobre la base de carga la cual no indica ningún valor de medición hacia al exterior. Tomado de [8].

***Medición de corriente mediante resistencia de derivación***

La medición directa de corriente exige interrumpir el circuito e intercalar el instrumento en serie, procedimiento inviable en una instalación permanente de automatización. El método normalizado en instrumentación industrial es, por ello, indirecto: se inserta en el trayecto de la corriente una resistencia de valor conocido, reducido y estable, denominada resistencia de derivación o shunt, y se mide la caída de tensión que se produce en sus extremos [9]. Por la ley de Ohm, esa caída resulta directamente proporcional a la corriente circulante [9]:

$$Vsh = I \cdot Rsh$$ **Ecuación 2**

*Ley de Ohm con caída de tensión*

de Vsh es la caída de tensión en la resistencia de derivación, expresada en voltios; I es la corriente que circula por el circuito, en amperios; y Rsh es el valor de la resistencia de derivación, en ohmios [9].

El despeje de la corriente es inmediato, de manera que la resolución y el alcance del sistema de medida quedan determinados por la elección del valor de la resistencia. Esta elección constituye un compromiso de diseño: un valor elevado incrementa la sensibilidad (al producir una señal de mayor amplitud para la misma corriente), pero eleva simultáneamente la potencia disipada en forma de calor y la tensión insertada en el circuito, magnitud conocida como tensión de inserción o burden voltage, que perturba al propio circuito que se pretende medir [10]:

$$Pdis = I2 \cdot Rsh$$ **Ecuación 3**

*Ley de Joule*

La resistencia empleada debe presentar una tolerancia estrecha, un coeficiente de temperatura reducido (expresado habitualmente en partes por millón por grado Celsius) y una potencia nominal superior a la disipada en el punto de operación. Para una corriente de carga del orden del amperio, como la que presenta la base del vehículo autónomo, un valor de 0,1 Ω proporciona una sensibilidad de 100 mV por amperio con una disipación de apenas 0,1 W, cifras adecuadas para la aplicación.

En cuanto a la ubicación del elemento sensor, existen dos configuraciones en instrumentación electrónica [10]. En la medición del lado alto (high-side), la resistencia se

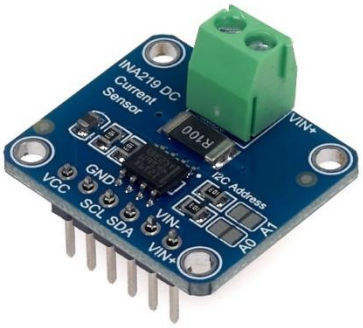
intercala entre la fuente y la carga; esta disposición conserva intacta la referencia de tierra de la carga y permite detectar fallas a tierra, pero obliga a que la etapa de amplificación tolere una tensión de modo común igual a la tensión completa del bus [10]. En la medición del lado bajo (low-side), la resistencia se ubica en el retorno; el acondicionamiento resulta más simple al operar cerca del potencial de referencia, pero se introduce una impedancia en el camino de retorno que altera dicha referencia [10]. La aplicación desarrollada para este proyecto adopta la configuración de lado alto, por preservar la integridad de la referencia de tierra de la estación de carga [10].

**El circuito integrado INA219**

El dispositivo INA219 (**Figura 9**) de Texas Instruments, integra en un único encapsulado la totalidad de la cadena de medida descrita en los apartados anteriores [11]. Incorpora el amplificador de derivación con topología de desviación nula, un amplificador de ganancia programable, el convertidor analógico-digital, un canal independiente para la medición de la tensión del bus, un multiplicador interno y la interfaz de comunicación digital [11].

**Figura 9**

*Modulo Sensor Monitor de Corriente y Voltaje Dc*



*Nota*. Convertidor analógico-digital con resolución configurable de 9, 10, 11 o 12 bits, y modos de promediado que permiten intercambiar tiempo de conversión por reducción de ruido. Tomado de [12].

Sus características principales son las siguientes: Medición de la tensión del bus en el rango de 0 a 26 V, con canal de entrada independiente del canal diferencial [12]. Amplificador de ganancia programable con factores de división 1, 2, 4 y 8, que establecen rangos de medida de la tensión de derivación de ±40, ±80, ±160 y ±320 mV respectivamente; el valor por omisión corresponde al rango de ±320 mV. Exactitud máxima de 0,5 % sobre el rango de temperatura de operación en la versión de grado B [12]. Dieciséis direcciones programables mediante la configuración de los terminales A0 y A1. Alimentación única entre 3 y 5,5 V, con un consumo máximo de 1 mA, compatible de forma directa con la tensión de operación del microcontrolador [12].

***Acondicionamiento de la señal: amplificador de derivación***

La señal disponible en los extremos de la resistencia de derivación es de amplitud reducida, del orden de las decenas de milivoltios, y se encuentra superpuesta a una tensión de modo común que puede alcanzar la tensión completa del bus. Extraer únicamente la componente diferencial exige, en consecuencia, un amplificador diferencial con elevada relación de rechazo al modo común, parámetro que cuantifica la capacidad del circuito para atenuar las señales presentes por igual en ambas entradas y que se expresa en decibelios [10].

$$CMRR = 20 \cdot log10\,(Ad \,/\, Amc)$$ **Ecuación 4**

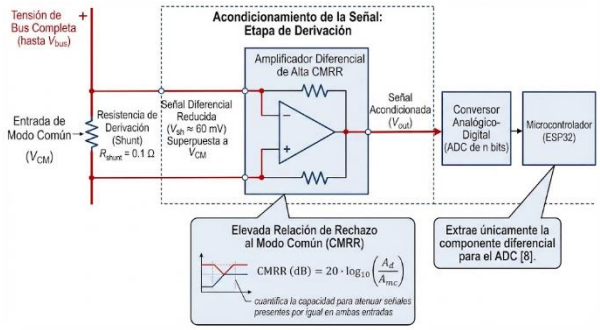
*Ecuación de la relación de rechazo en modo común*

donde Ad representa la ganancia que el amplificador aplica a la señal diferencial y Amc la ganancia que aplica a la señal de modo común. Cuanto mayor es el cociente entre ambas, menor es la contribución de la tensión del bus al error de medida [11]. Cuando la señal útil es

de pequeña amplitud, la fuente de error dominante deja de ser el ruido y pasa a ser la tensión de desviación de entrada del amplificador, junto con su deriva térmica y su ruido de baja frecuencia. Para suprimir estas contribuciones se emplean topologías de desviación nula, que conmutan periódicamente la configuración interna del amplificador a fin de medir y cancelar de forma continua su propia desviación, reduciendo además el ruido de densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia [11].

**Figura 10**

*Esquema de acondicionamiento de Señal*



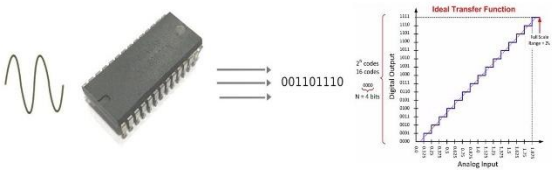

*Nota*. Se presenta un diagrama de bloques de un sistema clásico para la medición de corriente en una línea de alimentación, utilizando también una resistencia **SHUNT** la cual será leído por el microcontrolador, en este caso ESP32.

***Conversión analógico-digital***

Una vez amplificada, la señal debe traducirse a una representación numérica manipulable por el sistema digital. El convertidor analógico-digital cumple esta función asignando a cada valor de tensión de entrada un código binario dentro de un conjunto finito de niveles. Para un convertidor de *n* bits, el número de niveles disponibles es dos elevado a *n*, y la amplitud del escalón de cuantificación, o bit menos significativo, se obtiene dividiendo el rango de entrada de plena escala entre dicho número de niveles [13]:

**Figura 11**

*Conversor Análogo – Digital (ADC)*




*Nota.* Se indica con un gráfico el proceso principal en cómo se trasforma una señal física, es decir, de manera real se convierte a datos binarios, los mismos que son más entendibles para el lenguaje de computadora. Tomado de [14].

$$LSB = FSR / 2n$$ **Ecuación 5**

*Resolución del ADC*

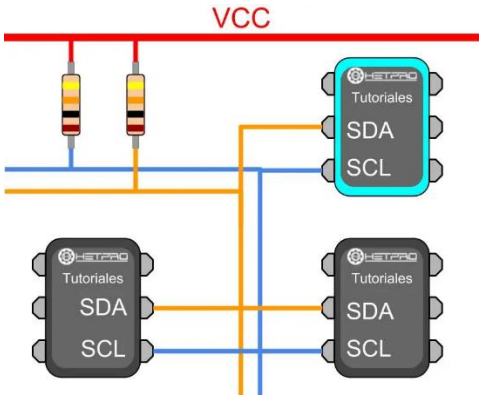
De esta discretización se desprende un error inherente al proceso, denominado error de cuantificación, acotado a la mitad del escalón [13]. La resolución efectiva puede mejorarse promediando varias conversiones consecutivas de una misma magnitud: al ser el ruido de naturaleza aleatoria y la señal determinista, el promedio de N muestras reduce la componente aleatoria en proporción a la raíz cuadrada de N, a costa de incrementar el tiempo total de conversión [13].

***Interfaz de comunicación I²C***

La comunicación entre el circuito de medida y el microcontrolador se establece mediante el bus I²C, un enlace serie síncrono de dos hilos concebido para la interconexión de circuitos integrados en distancias cortas. Las dos líneas que lo componen son la línea de datos, SDA, y la línea de reloj, SCL, ambas de tipo colector abierto y provistas de resistencias de polarización hacia la tensión de alimentación (**figura 12**), lo que permite que cualquier dispositivo conectado imponga el nivel bajo sin generar conflictos eléctricos.

**Figura 12**

*Esquema de comunicación y elementos*




*Nota.* Se representa el esquema de conexión físico del bus $I^2C$, esta conexión se denomina protocolo la cual será de manera síncrono usado de manera muy primordial en los sistemas embebidos y electrónica industrial. Tomado de [15].

El protocolo opera bajo un esquema maestro-esclavo: el maestro, función que desempeña el microcontrolador, genera la señal de reloj e inicia todas las transacciones, mientras que los dispositivos esclavos responden únicamente cuando son interpelados mediante su dirección [11]. El INA219 opera exclusivamente como esclavo y admite velocidades de transferencia en modo rápido, entre 1 y 400 kHz, así como en modo de alta velocidad hasta 2,56 MHz; sus terminales SDA y SCL incorporan filtros de supresión de impulsos y disparadores Schmitt para atenuar el efecto del ruido presente en el bus [11]. La ventaja determinante de esta interfaz en el contexto del presente trabajo radica en su direccionamiento: al identificarse cada dispositivo por una dirección propia, un número elevado de periféricos comparte las mismas dos líneas físicas [11]. Ello permite incorporar posteriormente instrumentación adicional al nodo de supervisión sin consumir terminales de entrada y salida del microcontrolador, recurso limitado en este tipo de plataformas [11].

***Determinación de la potencia y la energía consumida***

La disponibilidad simultánea de la corriente y la tensión permite obtener la potencia instantánea entregada a la plataforma como el producto de ambas magnitudes:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$ **Ecuación 6**

*Potencia eléctrica instantánea*

La energía consumida durante un ciclo completo de carga se obtiene integrando la potencia instantánea a lo largo del intervalo comprendido entre el instante de acople y el instante en que la corriente desciende por debajo del umbral que indica el término del proceso:

$$E = \int p(t)\, dt$$ **Ecuación 7**

*Energía eléctrica*

Dado que el sistema de adquisición opera de forma discreta, con un período de muestreo constante, la integral se aproxima numéricamente mediante una suma de rectángulos, expresión que el microcontrolador evalúa de manera incremental en cada ciclo de adquisición sin necesidad de almacenar la serie completa de muestras:

$$E \approx \Sigma\, pk \cdot \Delta t$$ **Ecuación 8**

*Energía eléctrica discreta*

El resultado se obtiene en **julios** y se convierte a vatios-hora dividiendo entre 3600, unidad de uso convencional en la evaluación del consumo de equipos. Esta magnitud constituye la variable central del sistema de supervisión, por cuanto permite cuantificar objetivamente el costo energético de cada misión de limpieza y establecer la comparación con

el método manual empleado actualmente, dando respuesta directa a la pregunta de investigación planteada.

**Topología y Aislamiento en Redes Inalámbricas Institucionales**

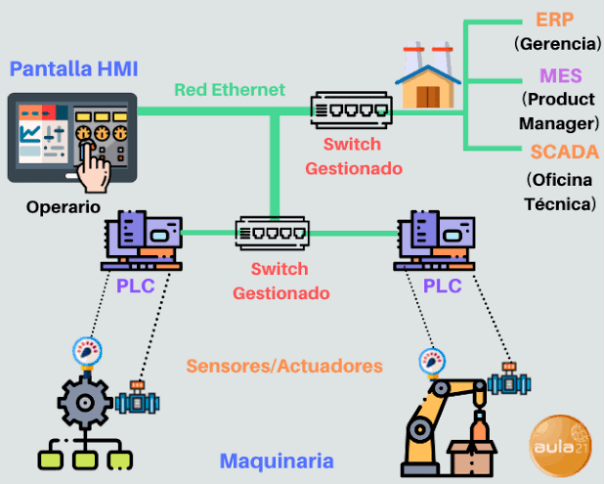
La implementación de sistemas IIoT dentro de laboratorios universitarios enfrenta una barrera crítica en la infraestructura de telecomunicaciones: las medidas de seguridad institucionales. Es habitual que las redes inalámbricas de las entidades universitarias operen bajo configuraciones avanzadas de administración, entre las que se incluye la directiva de aislamiento de punto de acceso o Access Point Isolation [16]. Esta capa de seguridad, situada en el nivel de enlace de datos del modelo OSI, impide el enrutamiento de paquetes entre clientes inalámbricos conectados a un mismo identificador de red; de allí que dos dispositivos conectados a la red general del campus no tengan visibilidad mutua y resulten incapaces de intercambiar tramas de control directo. Para sortear esta limitación, la metodología contempla el diseño y la implementación de una subred inalámbrica independiente y cerrada, segregada dentro del laboratorio de Circuitos Eléctricos mediante la instalación de un enrutador dedicado [16]. Este equipo actúa como servidor de direcciones y asigna direcciones estáticas al nodo de supervisión, a la plataforma AGV y a los terminales de visualización, dentro de un rango de subred privada. De esta manera, la topología prescinde de servidores en la nube, reduce la latencia de transmisión a milisegundos y garantiza la autonomía operativa del sistema incluso ante interrupciones del servicio de internet institucional [16].

**Interfaz Humano-Máquina Embebida**

En el ámbito de la automatización industrial, una Interfaz Humano-Máquina (HMI) es el medio interactivo que permite a un operador supervisar y controlar las variables de un proceso físico (**Figura *13***). Las arquitecturas modernas han evolucionado hacia interfaces basadas en tecnologías web servidas directamente desde sistemas embebidos.

**Figura 13**

*Ejemplo de Diagrama de un HMI.*



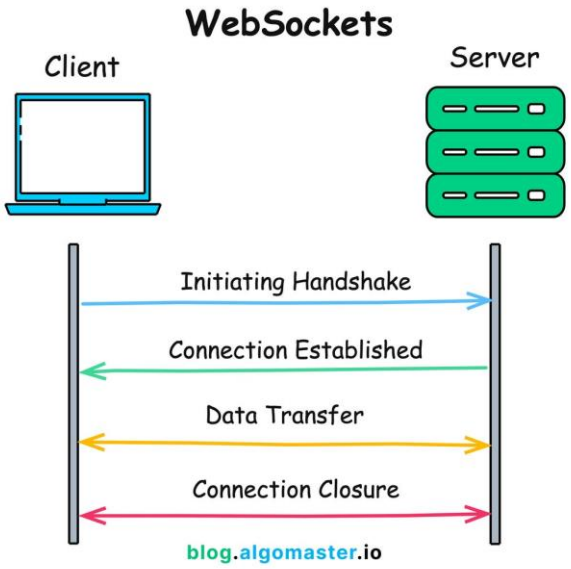

*Nota.* El esquema presentado nos deja muy clara la idea de lo que es un HMI y nos da entender la arquitectura de una red industrial moderna. Tomado de [17].

En este proyecto se emplea una arquitectura cliente-servidor donde el ESP32 actúa como servidor HTTP embebido, entregando los recursos estáticos (HTML y JavaScript) a cualquier navegador conectado a la subred.

Para garantizar una actualización en tiempo real de los datos sin saturar los recursos del microcontrolador, se sustituye la técnica convencional de sondeo periódico (polling) por el establecimiento de un canal bidireccional persistente mediante WebSockets (**Figura *14***). Esta aproximación reduce drásticamente la latencia y el tráfico de red, puesto que el servidor despacha información de forma asíncrona únicamente cuando se producen cambios [18]. Esta solución resulta superior a depender de la aplicación móvil de usuario final, ya que otorga al entorno académico el control total del proceso sin depender de servicios en la nube de terceros.

**Figura 14**

*Conexión WebSocket*




*Nota*. Muestra del ciclo de vida y la arquitectura de una comunicación WebSockets, este es un protocolo de red muy profesional la cual nos da el acceso a canales de comunicación de dos direcciones (Bidireccionales). Tomado de [19].

**Indicadores de Desempeño Operativo**

La medición objetiva del desempeño de equipos automatizados suele basarse en el indicador de Eficiencia General de los Equipos (OEE, por sus siglas en inglés), el cual integra tres factores fundamentales: la disponibilidad, el rendimiento y la calidad del proceso [20]. No obstante, en un escenario de limpieza autónoma donde el equipo comercial es un sistema cerrado que no informa su velocidad real de avance (rendimiento) ni el nivel de suciedad recogido (calidad), la evaluación de este proyecto se centra exclusivamente en el factor de disponibilidad operativa [20].

Este indicador se define como el cociente matemático entre el tiempo durante el cual el sistema estuvo ejecutando activamente su función (tiempo operativo real) y el tiempo total que estuvo programado para operar [20]. Para nutrir este cálculo y dar sustento teórico a la

validación del sistema, el microcontrolador gestiona en su memoria un registro persistente de las variables de proceso derivadas: la duración en minutos de cada misión, la energía acumulada en vatios-hora (Wh) por misión, el número de ciclos de carga completados y las ventanas de ocupación del laboratorio que fueron efectivamente aprovechadas [20]. La consolidación de estas variables aporta una trazabilidad operativa y de costos que no existe en el procedimiento de limpieza manual tradicional, permitiendo cuantificar el éxito de la implementación [20].

**Marco conceptual**

Con el fin de facilitar la correcta interpretación técnica y el análisis académico del presente trabajo de integración curricular, se definen a continuación los términos especializados aplicables al dominio de la automatización e instrumentación.

- **Aislamiento de punto de acceso (*AP Isolation*):** mecanismo de seguridad de redes inalámbricas que bloquea la comunicación directa entre dispositivos clientes conectados al mismo enrutador o punto de acceso, impidiendo la transferencia de datos punto a punto dentro de una red compartida [16].
- **Cinemática diferencial:** modelo de movimiento y control robótico para vehículos terrestres en el que la dirección y la velocidad de desplazamiento se determinan a partir de la diferencia de velocidad de rotación entre las ruedas motrices montadas en lados opuestos de un eje común [4].
- **Convertidor analógico-digital (ADC):** circuito que traduce una magnitud eléctrica continua en un código binario, asignando a cada valor de entrada uno de los niveles discretos disponibles según su resolución en bits [11].
- **Disponibilidad operativa:** indicador de desempeño que expresa la relación entre el tiempo durante el cual un equipo se encuentra efectivamente en operación y el tiempo total programado para ello.

- **Encoder (codificador rotativo):** transductor electromecánico que convierte la rotación angular o la posición de un eje mecánico en una serie de impulsos eléctricos digitales, utilizado para medir velocidad y posición.
- **HMI (interfaz humano-máquina):** panel de instrumentación visual, software o pantalla industrial que actúa como puente interactivo bidireccional entre un operador humano y un controlador de automatización, permitiendo la supervisión y el control de variables de proceso.
- **I²C (*Inter-Integrated Circuit*):** bus de comunicación serie síncrono de dos hilos, con esquema maestro-esclavo y direccionamiento individual, empleado para la interconexión de circuitos integrados en distancias cortas.
- **IIoT (Internet de las Cosas Industrial):** aplicación de la arquitectura de redes IoT en entornos industriales y de ingeniería, mediante la cual se interconectan sensores, actuadores y controladores embebidos con sistemas computacionales, con miras a optimizar procesos en tiempo real [18].
- **LDS (*Laser Distance Sensor*):** denominación técnica empleada en robótica móvil comercial para identificar los módulos de escaneo láser rotativos que operan en dos dimensiones, destinados al mapeo perimetral y a la detección de obstáculos.
- **Mapeo y localización simultáneos (SLAM):** algoritmo probabilístico y computacional que permite a un robot móvil construir un mapa coherente de un entorno desconocido mientras, al mismo tiempo, rastrea su propia ubicación espacial dentro de dicho mapa [2].
- **Microcontrolador:** circuito integrado que reúne en un solo encapsulado la unidad de procesamiento, la memoria de programa y de datos, y los periféricos de entrada y salida, concebido para ejecutar una aplicación dedicada dentro de un sistema embebido.
- **Odometría:** técnica de estimación de la posición, la trayectoria y la orientación de un vehículo móvil respecto de un punto de referencia inicial, calculada mediante la integración incremental de las mediciones tomadas en los actuadores de movimiento [1].

- **Polling (sondeo o muestreo secuencial):** técnica de comunicación mediante la cual una unidad de procesamiento maestra consulta de forma periódica el estado o los registros de datos de un dispositivo periférico esclavo.
- **Relación de rechazo al modo común (CMRR):** parámetro que cuantifica la capacidad de un amplificador diferencial para atenuar las señales presentes por igual en ambas entradas, expresado como el cociente en decibelios entre la ganancia diferencial y la ganancia de modo común.
- **Resistencia de derivación (*shunt*):** resistencia de valor reducido, elevada precisión y bajo coeficiente térmico, intercalada en serie en un circuito para determinar de forma indirecta la corriente que circula por él a partir de la caída de tensión que produce [11].
- **Tensión de inserción (*burden voltage*):** caída de tensión que el elemento sensor introduce en el circuito bajo medida y que constituye una perturbación del propio sistema que se pretende caracterizar [11].
- **Tiempo de vuelo (ToF):** principio físico de medición indirecta de distancia que determina el rango espacial hacia una superficie midiendo el tiempo que tarda una onda luminosa en viajar hacia el objetivo, reflejarse y regresar al receptor.
- **Vehículo Autónomo Guiado (AGV):** vehículo de transporte o servicio capaz de desplazarse de forma autónoma dentro de un entorno definido, siguiendo rutas determinadas mediante algún método de guiado y sin intervención directa de un operador.

# Capítulo III

# Desarrollo

## Enfoque de la investigación

El presente trabajo se enmarca en un enfoque cuantitativo-tecnológico. Es cuantitativo porque el desempeño del sistema se evalúa mediante variables numéricas —tensión, corriente, potencia y energía— adquiridas de forma automática; y es tecnológico porque su propósito no es explicar un fenómeno, sino diseñar, implementar y validar un artefacto que resuelve un problema identificado en el planteamiento del Capítulo I.

### *Modalidad de la investigación*

La modalidad es de campo y experimental. De campo, porque el sistema se instala y se valida en el entorno real donde se presenta el problema —el laboratorio de Circuitos Eléctricos— y no en un banco de pruebas aislado. Experimental, porque se manipula deliberadamente una variable independiente (la integración de la capa de supervisión sobre la plataforma comercial) y se observa su efecto sobre las variables dependientes definidas en los objetivos específicos: energía por ciclo, duración de la misión y disponibilidad operativa.

## Desarrollo del sistema

El sistema desarrollado se estructura en cuatro bloques funcionales que se comunican entre sí, siguiendo el mismo principio de separación por etapas descrito en el Capítulo II. Los tres primeros bloques constituyen el aporte de diseño propio del presente trabajo; el cuarto corresponde a la plataforma AGV comercial, que se integra en su condición original de fábrica y se trata, conforme al alcance definido en el Capítulo I, como un equipo de campo cerrado.

1. Implementación del sistema de adquisición y medición de parámetros eléctricos sobre la estación de carga mediante el circuito INA219.
2. Diseño del nodo de procesamiento y comunicación, implementado sobre el microcontrolador ESP32, que centraliza la lógica de enclavamiento, el registro y el servicio de la interfaz.

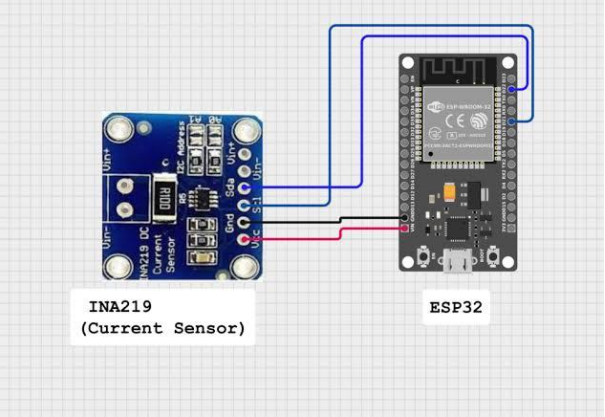
3. Diseño la interfaz gráfica de supervisión (HMI), servida de forma local y consumida por el operador desde un navegador web.
4. Diseño de la automatización en la plataforma AGV comercial, que ejecuta de forma autónoma la navegación, el mapeo y la limpieza, y que se trata como un equipo de campo cerrado.

***Implementación del sistema de adquisición y medición de parámetros eléctricos***

Este bloque instrumenta la estación de carga del vehículo mediante el circuito integrado INA219 (**Figura *15***), conectado en configuración de lado alto sobre la línea de alimentación de la base de carga. El dispositivo se direcciona por el bus I²C en la dirección 0x40, con las líneas SDA y SCL conectadas a los terminales GPIO21 y GPIO22 del microcontrolador respectivamente. El amplificador de ganancia programable se configuró en el rango de ±80 mV, y cada lectura se obtiene como el promedio de 16 muestras consecutivas, los cuales favorece a la reducción del ruido sobre el tiempo de conversión, justificado en el Capítulo II dada la naturaleza lenta de la variable medida. Este bloque entrega al nodo de procesamiento los valores de tensión, corriente y potencia, a partir de los cuales se deriva posteriormente la energía consumida por ciclo.

**Figura 15**

*Diagrama de conexión del módulo INA219 a los GPIO de la ESP32*



*Nota*. Se detalla el modo de conexión del cableado físico, el cual integra el **Módulo INA219** y el microcontrolador **ESP32.** Tomado de [21].

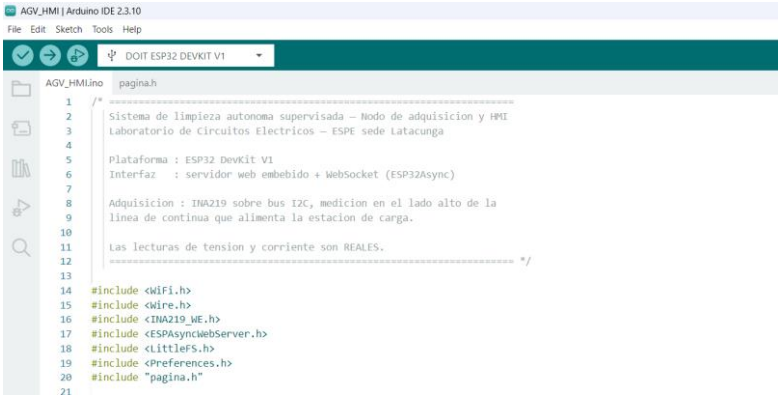
***Diseño del nodo de procesamiento y comunicación***

El microcontrolador ESP32 se colocó como parte central la lógica de enclavamiento, el registro de datos y el servicio de la interfaz de operador. Sobre este nodo se ejecuta un servidor de comunicación bidireccional mediante WebSocket (AsyncWebSocket, ruta /ws), que transmite en tiempo real las variables adquiridas hacia la interfaz sin recurrir al sondeo periódico por HTTP (**figura 16**). El registro histórico de las variables se almacena en el sistema de archivos LittleFS, en el archivo registro.csv, con valores separados por punto y coma, conforme al formato descrito en el Capítulo III.

En la Figura 16, se detalla las bibliotecas a ser utilizadas para establecer como punto de acceso.

**Figura 16**

*Programación para el nodo de procesamiento y comunicación*




*Nota*. Declaración de librerías para el nodo de procesamiento y comunicación, las cuales se desarrollaron en un entorno de desarrollo (Arduino IDE), las líneas de código muestran como estará integrará el hardware con el software.

***Diseño del sistema de adquisición y medición de energía***

La medición de las variables eléctricas de la estación de carga, se diseñó en torno al circuito integrado INA219, que combina en un único encapsulado la resistencia de derivación externa, el amplificador de ganancia programable, el convertidor analógico-digital y la interfaz I²C. Para el diseño (**Figura *17***) se adoptó una resistencia de derivación de 0,1 Ω en configuración de lado alto, colocada entre la fuente de la base de carga y el vehículo. Con una corriente de carga nominal de 0,6 A, la caída de tensión esperada sobre el shunt es de 60 mV, por lo que se seleccionó el rango de ganancia programable de ±80 mV en lugar del rango de ±320 mV que la librería toma por defecto, decisión que cuadruplica la resolución efectiva de la medición de corriente sin saturar el amplificador en el punto de operación normal. Se configuró, además, el modo de promediado de 240 muestras consecutivas por lectura, esto con la finalidad de reducir el ruido aleatorio de la medición a costa de un mayor tiempo de conversión.

En la **Figura 17** se detalla las contantes establecidas y la definición de los pines a ser utilizados para la conexión con modulo INA219.

**Figura 17**

*Definición de pines $I^2C$*

```
/* ------------------------------------------------------------------ *
 | Terminales                                                         |
 * ------------------------------------------------------------------ */
const uint8_t PIN_SDA      = 21;   // I2C hacia el INA219
const uint8_t PIN_SCL      = 22;
/* ------------------------------------------------------------------ *
 | Parametros del proceso                                             |
 * ------------------------------------------------------------------ */
const uint32_t T_MUESTREO   = 1000;  // ms entre adquisiciones
const uint32_t T_ENVIO      = 1000;  // ms entre tramas hacia la HMI
const uint32_t T_REGISTRO   = 60000; // CAMBIO: 60000 ms = 1 minuto entre escrituras al archivo

/* Datos tomados de la hoja de especificaciones del manual del equipo:
   base de carga E101CDZ y adaptador BLJ15WJ200060P-U, 20 V / 0,6 A / 12 W;
   bateria de ion de litio de 14,4 V y 2400 mAh de capacidad real.
   De ahi resulta una energia teorica de bateria de 34,6 Wh, cifra util
   para contrastar el resultado de la integracion.                    */
const float    V_BUS_NOM    = 20.0;   // V de la base de carga
const float    I_CARGA_NOM  = 600.0;  // mA de corriente nominal de carga
const float    E_BATERIA    = 34.6;   // Wh teoricos de la bateria

const float    I_FIN_CARGA  = 30.0;  // mA por debajo de los cuales se
                                     // considera terminada la carga
const float    V_ACOPLE     = 5.0;   // V minimos que indican acople
```

*Nota.* Se definieron las constantes de los parámetros que serán usados en el interfaz humano – máquina.

### *Diseño de la interfaz gráfica (HMI)*

El desarrollo de la interfaz siguió un proceso de cuatro etapas, desde la definición de la arquitectura de comunicación hasta la puesta en marcha como aplicación instalable.

#### Selección de la arquitectura de servidor

Se toma la decisión de adaptar una interfaz directamente en el microcontrolador ESP32, en lugar de utilizar un servidor externo, dado que el AGV opera dentro de un laboratorio con salida a internet.

En la **Figura *18***, se declaran las credenciales para el acceso a la conexión inalámbrica que ofrece la ESP32.

**Figura 18**

*Declaración de credenciales del punto de acceso*

```
/* ------------------------------------------------------------------ *
   Red
   Modo punto de acceso: la ESP32 crea su propia red y no depende de
   ningun router.
 * ------------------------------------------------------------------ */
const char* AP_SSID  = "AGV_LAB_CIRCUITOS";
const char* AP_CLAVE = "espe2026lat";      // minimo 8 caracteres

/* Modo estacion (para cuando exista el router dedicado):
const char* STA_SSID  = "SSID_DEL_ROUTER";
const char* STA_CLAVE = "CLAVE_DEL_ROUTER";
*/
```

*Nota.* Definición de las variables usadas para el punto de acceso, este fragmento de código gestionará sus conexiones inalámbricas, lo cual es vital para poder acceder al HMI del robot.

Al contar con un internet de uso educativo mantiene varias restricciones y modos de seguridad misma de la universidad, este fue el motivo por cual se opta por usar como un punto de acceso para evitar conflictos de red.

En la **Figura *19***, se muestra cómo se establece mediante el comando WebSocket como se crea su propia red inalámbrica la cual servirá como punto de conexión a la tableta.

**Figura 19**

*Creación del servidor asíncrono y del WebSocket*

```

AsyncWebServer servidor(80);
AsyncWebSocket ws("/ws");
Preferences memoria;

```

*Nota*. Este bloque de código se encargará de crear los objetos principales de software que manejará la comunicación web.

Se utilizó la librería ESPAsyncWebServer que permite atender peticiones HTTP y mantener una conexión (**Figura *19***), de forma simultánea sin bloquear el ciclo de control del programa principal.

En la **Figura *20***, se indica la librería WiFi.softAP, misma que es usada para activarse y direccionar a la pantalla sin necesidad de una conexión a internet.

**Figura 20**

*Activación del modo punto de acceso*

```
450
451   WiFi.softAP(AP_SSID, AP_CLAVE);
452   Serial.print(F("[RED] Punto de acceso: "));  Serial.println(AP_SSID);
453   Serial.print(F("[RED] Direccion HMI: http://"));
454   Serial.println(WiFi.softAPIP());
455
```

*Nota.* Este bloque de programación es para la definición del punto de acceso para el enlace de la red AGV.

El sistema de supervisión implementado para plataformas móviles necesita de una capa diseñada para iniciar con la comunicación.

El registro lo llevará el comando WebSocket mismo que se detalla en la Figura 21 que indicará el momento exacto que da inicio la transmisión bidireccional entre el HMI y el microcontrolador.

**Figura 21**

*Registro del manejador de WebSocket sobre el servidor*

```
456   /* Modo estacion:
457   WiFi.begin(STA_SSID, STA_CLAVE);
458   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(400); Serial.print('.'); }
459   Serial.println(WiFi.localIP());
460   */
461
462   ws.onEvent(alRecibir);
463   servidor.addHandler(&ws);
464
```

*Nota.* En los comandos colocados servirán para que la lógica del WebSocket se vincule al servidor web.

**Separación de la lógica de control y la capa de presentación**

El código de la interfaz (HTML, CSS y JavaScript) se aisló en un archivo de cabecera independiente (pagina.h) (**Figura *22***), declarado como una constante PROGMEM (**Figura *25***).Esto obedece a una limitación práctica del ESP32: su memoria RAM es reducida frente al tamaño que ocupa una página web completa con gráficas y estilos, de modo que almacenar la interfaz en la memoria flash del programa (**Figura *23***), en lugar de la RAM, evita comprometer la ejecución del resto de tareas del sistema (adquisición, registro y evaluación de estados). Esta separación también permitió trabajar la interfaz de forma independiente del firmware de control durante el desarrollo.

***Servidor web***

La librería WebServer que trae el núcleo de la ESP32 es síncrona mientras atiende una petición, bloquea el procesador y no puede hacer nada más ni leer el INA219, ni avanzar la máquina de estados, ni contar el reloj. Con varios clientes conectados a la vez (la tablet del HMI, la laptop de calibración), eso genera bloqueos perceptibles.

Motivo por el cual se opta una programación con la compatibilidad de javascript, debido a que este no será conectado a una red, no usamos aplicativos como adafruit mismos que permiten el desarrollo de manera online la supervisión del sensor, a continuación, en la Tabla 1 se detalla las librerías y el motivo de su uso.

**Tabla 1** *Justificación de las librerías de software seleccionadas.*

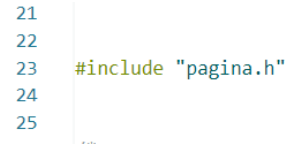
| Librería | Motivo |
|---|---|
| ESPAsyncWebServer + AsyncTCP (fork ESP32Async) | Servidor no bloqueante con WebSocket integrado; la única versión compatible con el núcleo 3.x de la ESP32 |
| WebSocket (AsyncWebSocket) | Empuja datos al HMI en tiempo real sin que la tablet tenga que preguntar constantemente (sondeo HTTP) |
| INA219_WE | Permite configurar rango del amplificador, promediado y factor de corrección |
| LittleFS | Resiste mejor los cortes de energía a mitad de escritura; SPIFFS está descontinuado |
| Preferences (NVS) | Guarda contadores de consumibles y el reloj de software, sobreviven a un reinicio |

La red opera aislada, sin internet (Capítulo II). Cualquier librería externa (React, Chart.js) se carga desde un servidor en línea en una red sin salida a internet, eso falla y la pantalla queda en blanco. Por eso todo el HTML, CSS y JavaScript vive dentro del propio firmware, sin dependencias externas: los medidores son CSS puro, la gráfica usa canvas nativo del navegador.

En la **Figura *22***, nos muestra la instrucción #include "pagina.h, la cual es una directiva de preprocesador de C/C++ que le indica al compilador que copie e inserte todo el contenido del archivo pagina.h exactamente en esa posición antes de compilar el programa.

**Figura 22**

*Inclusión del archivo de cabecera*



```
21
22
23  #include "pagina.h"
24
25
```

*Nota.* Se destaca una línea de código específica (**#include "pagina.h"**) que ilustra una excelente práctica de programación modular en C++, especialmente cuando se desarrollan interfaces web en microcontroladores como la ESP32.

En **Figura *23***, indicamos como las líneas preparan el canal de comunicación bidireccional. Le indican al servidor que cualquier evento (como presionar un botón en la pantalla o enviar un dato) se procesará con una función que tú has llamado alRecibir. Esto es lo que permite que la interfaz HMI sea en tiempo real, sin tener que recargar la página.

**Figura 23**

*Respuesta HTTP*



```
ws.onEvent(alRecibir);
servidor.addHandler(&ws);

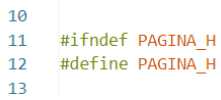
servidor.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest* p) {
  p->send_P(200, "text/html", PAGINA_HTML);
});
```

*Nota.* Se usa **send_P** (con "P" de PROGMEM) en lugar de send, que es la variante de la librería preparada para servir contenido almacenado en memoria flash en vez de RAM.

La **Figura *24*,** muestra el control principal del diseño de software en C/C++ o también llamadas como guardas de inclusión. Este bloque de programación utiliza comandos para proteger el funcionamiento del programa durante la compilación.

**Figura 24**

*Guardas de inclusión*



```
10
11  #ifndef PAGINA_H
12  #define PAGINA_H
13
```

*Nota.* Implementación de directivas de preprocesador (#ifndef y #define) en el archivo de cabecera de la interfaz web, utilizadas para prevenir errores de compilación por redefinición de variables mediante el bloqueo de inclusiones múltiples.

En **Figura *25***, ilustra la forma correcta de declarar y almacenar el código de la interfaz web dentro del firmware de un microcontrolador. Esta línea combina dos técnicas fundamentales de optimización y estructuración en C++.

**Figura 25**

*Declaración de la constante en PROGMEM*

```
13
14  const char PAGINA_HTML[] PROGMEM = R"rawliteral(
15
```

*Nota.* El calificador PROGMEM es el que instruye al compilador a alojar esta constante en la memoria flash del ESP32 en lugar de copiarla a RAM al arrancar, y R"rawliteral(...)" es la sintaxis de C++ para cadenas de texto multilínea, que permite escribir el HTML tal cual sin tener que escapar comillas ni saltos de línea.

**Organización de la interfaz en paneles funcionales**

Siguiendo el criterio de diseño ISA-101 para interfaces de alto desempeño, la pantalla se estructuró en bloques (**Figura *26***) que agrupan información por función, con un fondo neutro en escala de grises y el color reservado únicamente para condiciones anormales o que requieren atención del operador:

**Estación de carga:** tensión, corriente, potencia y energía acumulada del ciclo, con barras de rango para ubicar visualmente cada lectura dentro de sus límites esperados.

**Figura 26**

*Variables para la "Estación de carga"*

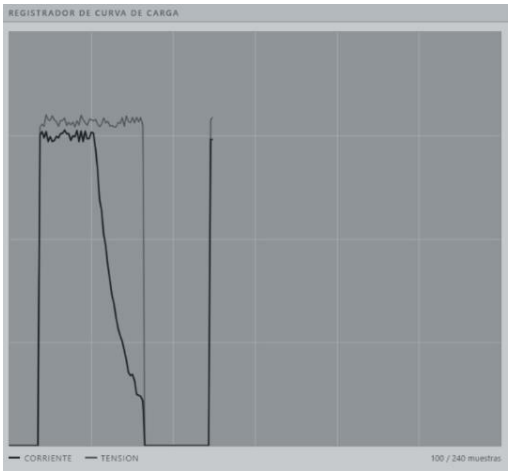
```
462
463  <main>
464
465    <!-- Variables electricas de la estacion de carga -->
466    <section>
467      <div class="rotulo">Estacion de carga</div>
468      <div class="cuerpo">
```

*Nota.* Bloque de programación HTML el cual será el que haga posible de conectar de manera virtual el panel que nos mostrará la visualización de variables eléctricas que nos envia la estación de carga.

La **Figura *27*,** muestra la curva de carga, este será un elemento activo para un mejor manejo y representación de lo mencionado. Esto a manera industrial es la mejor forma de obtener datos en tiempo real, y también se integra de manera física en el panel de supervisión. Esto se diseñó principalmente con librerías de JavaScript, debido a que se integra de mejor manera con las librerías antes mencionadas en la estructura de la ESP32.

**Figura 27**

*Registrador de la Curva de Carga*




*Nota.* Interfaz visual del registrador de la curva de carga generado mediante JavaScript, ilustrando el comportamiento en tiempo real de la tensión y la corriente del sistema en función del tiempo.

**Supervisión**: con el comando integrado como se muestra en la Figura 28, muestra cómo se integrará con el estado del vehículo, ocupación del laboratorio, nivel de batería, duración de la misión en curso, contadores operativos (misiones, ciclos de carga) y disponibilidad, junto con los controles de iniciar misión, enviar a la base, descargar registro y parada de emergencia.

**Figura 28**

*Panel "Supervisión"*

```
522
523   <section>
524     <div class="rotulo">Supervision</div>
525
526
```

*Nota.* El bloque de código HTML correspondiente a la declaración de la estructura usada en la sección de supervisión, la cual fue diseñada para agrupar los indicadores de estado y los controles operativos principales del sistema.

**Accesorios:** La Figura 30, muestra la vida útil restante de cada elemento del sistema de limpieza (cepillos, filtro, mopa), calculada a partir de las horas acumuladas de operación, esta determinadas por el propio fabricante.

El apartado de Accesorios, cuya estructura base a nivel de código se expone en la Figura 29, está dedicado a la gestión del mantenimiento preventivo del AGV

**Figura 29**

*Bloque inferior "Vida útil de consumibles"*

```
555
556 <section>
557   <div class="rotulo">Vida util de consumibles &mdash; segun horas de operacion acumuladas</div>
558   <div class="consumibles" id="consumibles"></div>
559 </section>
560
```

*Nota.* Este bloque se deja vacío en el HTML estático; se completa dinámicamente por JavaScript en **armarConsumibles(),** la cual se genera una tarjeta por cada pieza a partir del arreglo PIEZAS.

**Figura 30**

*Representación Gráfica "Vida útil de consumibles"*



*Nota.* Representación gráfica del panel de consumibles en la interfaz HMI. Las tarjetas indicadoras son generadas dinámicamente para visualizar el porcentaje de vida útil de cada componente y proporcionan los controles necesarios para resetear los contadores tras efectuar un reemplazo físico.

**Comunicación en tiempo real entre el ESP32 y la interfaz**

Se creó un canal WebSocket (/ws) independiente de las rutas HTTP convencionales para permitir que los indicadores y la gráfica se actualicen sin necesidad de recargar la página. El ESP32 envía cada segundo una trama en formato JSON (Figura 31) con el conjunto completo de variables de proceso, y la interfaz la interpreta en cliente para refrescar los valores en pantalla. Las órdenes del operador (iniciar misión, retorno a la base, paro de emergencia) por el contrario, se envían desde los botones de la interfaz como mensajes de texto sencillos, que el firmware interpreta para cambiar el estado del vehículo.

**Figura 31**

*Envío periódico de la trama JSON hacia la interfaz*

```
/* ============================================================
   Envio hacia la HMI
 * ============================================================ */
void enviarTrama() {
  if (ws.count() == 0) return;

  uint32_t s = millis() / 1000;
  char hora[9];
  snprintf(hora, sizeof(hora), "%02u:%02u:%02u",
           (unsigned)((s / 3600) % 24), (unsigned)((s / 60) % 60),
           (unsigned)(s % 60));

  char cons[160];
  int n = snprintf(cons, sizeof(cons), "[");
  for (uint8_t k = 0; k < N_CONSUMIBLES; k++)
    n += snprintf(cons + n, sizeof(cons) - n, "%s%.1f",
                  k ? "," : "", vidaRestante(k));
  snprintf(cons + n, sizeof(cons) - n, "]");

```

*Nota.* Bloque del código en C++ que corresponde al firmware del microcontrolador. Nos muestra la función que se estará disponible para empaquetar y transmitir de manera continua las variables del proceso en el formato **JSON.**

**Adquisición de datos**

La adquisición de datos desde el vehículo se tomó a través del microcontrolador ESP32 con el circuito integrado INA219, que registra de forma automática y periódica las variables de

tensión, corriente, potencia y energía en un archivo de valores separados por punto y coma almacenado en la memoria no volátil del dispositivo. Como técnica complementaria de validación, se empleó la medición directa con multímetro digital sobre los mismos puntos de conexión que instrumenta el INA219.

***Curva de carga***

El procedimiento para la obtención de la curva de carga se ejecutó de la siguiente manera:

1. Se llevó la batería del vehículo a un estado de descarga mediante la ejecución de misiones de limpieza sucesivas, hasta que el propio robot inició el retorno automático a la base por bajo nivel de carga.
2. Se verificó el cableado del nodo de adquisición, la referencia común entre el INA219, el microcontrolador y la fuente de alimentación, y la ausencia de tensión y corriente espurias con la base energizada y sin el vehículo acoplado.
3. Se depuró el registro almacenado en la memoria del microcontrolador, a fin de que la captura correspondiera exclusivamente al ciclo de carga bajo estudio.
4. Se acopló el vehículo a la base de carga y se dejó operar el sistema de forma autónoma, sin intervención del operador, hasta la finalización del ciclo.
5. Se descargó el archivo de registro generado por el nodo de adquisición y se procesó mediante hoja de cálculo para la obtención de los estadísticos descriptivos y las gráficas.

**Calibración y validación del instrumento**

Previo al registro definitivo, se contrastaron las lecturas del nodo de adquisición contra un multímetro digital de uso general, tomado como instrumento patrón por su disponibilidad en el laboratorio. La comparación se realizó sobre los mismos bornes de conexión, en dos condiciones de operación: con la batería del vehículo en estado de carga activa y con la batería en estado de mantenimiento o carga completa.

**Tabla 2**

*Contraste de las lecturas*

| **Condición** | **Multímetro (patrón)** | **HMI (INA219)** | **Diferencia** |
|---|---|---|---|
| Tensión, en cualquier condición | 19,75 V ± 0,02 V | 19,80 – 19,86 V | ≈ 0,1 V (0,5 %) |
| Corriente, batería en carga activa | 427,0 mA | 432,2 mA (media) | 5,2 mA (1,2 %) |
| Corriente, batería en mantenimiento | 2,3 mA | 1,88 mA (media) | 0,42 mA (18,3 %) |

La tensión y la corriente durante la carga activa presentan una concordancia satisfactoria con el instrumento patrón, con diferencias inferiores al 1,5 %, dentro del margen de exactitud de 0,5 % típico especificado por el fabricante del circuito integrado más el error propio de la lectura manual del multímetro. La corriente en la condición de mantenimiento exhibe una diferencia relativa mayor (18,3 %), aunque su magnitud absoluta es reducida (0,42 mA), atribuible a la resolución del instrumento patrón cerca de su límite inferior de medición. A partir de la corriente de carga activa se obtiene un factor de corrección de 0,988, aplicable como referencia para trabajos futuros que requieran una exactitud adicional.

**Consideraciones éticas**

El desarrollo del presente trabajo no involucra la participación de sujetos humanos como unidad de análisis, por lo que no aplican los procedimientos de consentimiento informado propios de la investigación con seres humanos. No obstante, se observaron los siguientes principios éticos propios del ejercicio de la ingeniería: se respetó la propiedad intelectual de las fuentes consultadas mediante su citación bajo la norma correspondiente; se emplearon las

medidas de seguridad eléctrica pertinentes durante la manipulación de circuitos energizados; y se reportan en el presente documento tanto los resultados favorables como las discrepancias e incertidumbres encontradas durante la fase de calibración, en apego al principio de honestidad científica.

## Implementación

### *Registro histórico en memoria no volátil*

Para conservar un historial de las variables eléctricas más allá de lo que puede mostrarse en la gráfica en tiempo real, se implementó un registro persistente sobre el sistema de archivos LittleFS (**Figura *32***), montado directamente en la memoria flash del ESP32. Cada muestra se escribe como una línea de texto en el archivo registro.csv (**Figura *33***), con separador de columnas punto y coma y separador decimal coma, convención pensada para que el archivo se abra correctamente en una hoja de cálculo configurada en español sin pasar por el asistente de importación.

**Figura 32**

*Declaración del nombre del archivo y del formato*



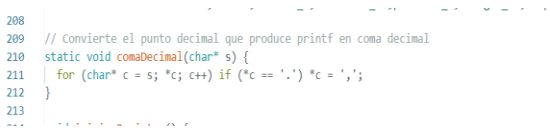
```
/* ============================================================
   Registro en memoria interna (LittleFS)
   El archivo lo escribe el propio programa, de modo que no hace falta
   ningun complemento del entorno para subirlo.
 * ============================================================ */
const char* ARCHIVO = "/registro.csv";

/* Formato del archivo
   */
const char SEP = ';';
// CAMBIO: Se reemplaza "ms" por "minutos" en la primera columna
#define ENCABEZADO "minutos;estado;tension_V;corriente_mA;potencia_W;energia_Wh;ocupado"
```

*Nota.* Bloque de programación que corresponde al lenguaje C++, el cual expondrá los parámetros de estructura para el registro local de los datos que se ubicaran en la memoria no volátil del ESP32. El nombre que se le dio para para obtener estos datos fuer registro.csv.

**Figura 33**

*Función auxiliar que convierte el punto decimal*



```
// Convierte el punto decimal que produce printf en coma decimal
static void comaDecimal(char* s) {
  for (char* c = s; *c; c++) if (*c == '.') *c = ',';
}
```

*Nota.* La función auxiliar desarrollada en el entorno IDE de Arduino, fue realizado con el objetico de que se reemplace los puntos decimales que se genera cuando se solicita la extracción de datos del registro.

El firmware escribe una línea nueva cada minuto y cierra el archivo de inmediato tras cada escritura, práctica que protege el registro ante un corte de energía imprevisto y que se complementa con el respaldo del Sistema de Alimentación Ininterrumpida Forza NT-511(**Figura *34***) y el gabinete metálico industrial Beaucoup (**Figura *35***) que alojan la etapa de potencia, descritos en el Capítulo II.

La Figura 34, se muestra la el sistema de respaldo usado, para mantener con carga al AGV, esto con la finalidad de que en caso de cortes no se pierda ningún dato de los parámetros establecidos.

**Figura 34**

*Instalación del UPS como respaldo energético*




*Nota.* Composición visual del sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) de 500VA empleado para el respaldo energético del nodo. A la izquierda se muestran las prestaciones comerciales [22], y a la derecha se detalla la placa de características eléctricas del equipo instalado físicamente en el proyecto.

En la **Figura 35** se detalla el tipo de gabinete usado, el cual según sus medidas corresponde a 300x300x200 mm, esto con la finalidad de alojar todos los accesorios electrónicos y de manera estética se más aceptable en un laboratorio.

**Figura 35**

*Gabinete metálico Beaucoup empleado para alojar la etapa de potencia*




*Nota.* Gabinete metálico industrial de servicio liviano de marca Beaucoup, empleado para el alojamiento, distribución y protección física de los componentes electrónicos correspondientes a la etapa de potencia del sistema. Tomado de [23].

***Carga a respaldar de la base de carga (Xiaomi E101CDZ):***

Para empezar con el análisis para el respaldo de la base para carga se debe distinguir entre el lado DC y el lado AC, porque son valores distintos:

- Lado DC (lo que la base entrega hacia la batería del robot):

$$20\,V \times 0{,}6\,A = 12\,W$$ **Ecuación 9**

*Potencia entrega en la carga*

- Lado AC (lo que realmente consume de la UPS):

la base de carga en sí no se conecta directo a la corriente recibe los 20 V DC de un adaptador externo (**Figura 36**).

La **Figura 36**, nos muestra el tipo de convertidor usado para alimentar la base de carga, este caso el usado en un cargador de la marca DELL, misma que comparte características ideales para el correcto funcionamiento de lo antes mencionado.

**Figura 36**

*Adaptador que entrega 20VDC*




*Nota.* Ese adaptador es el que sí se enchufa a la UPS, y convierte 120 V AC a 20 V DC con pérdidas propias del proceso.

**Equipos a respaldar con el Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS)**

- Entrada nominal de la base de carga Xiaomi: $20\,V * 0{,}6\,A\ =\ 12\,W$
- ESP32 DevKit V1 + INA219: No está en la placa, pero un ESP32 con WiFi activo en modo AP típicamente consume entre 3 W y 5 W en el rail de 5 V, incluyendo el sensor INA219 y las pérdidas del regulador.

$$\approx\ 12\,W\ +\ 4\,W\ \approx\ 16\,W$$

- Batería del AGV (Figura 37): 14,4 V nominal, 2400 mAh, 34,56 Wh de capacidad nominal, tensión límite superior de carga 16,8 V.

La Figura 37 indica los valores y el tipo de construcción de las baterías que mantienen funcionando al AGV, de esta manera se obtuvo los datos necesarios para establecer los parámetros eléctricos.

**Figura 37**

*Baterías de Litio*



*Nota.* Inspección del banco de baterías de iones de litio alojado en el compartimento inferior del AGV. Se corroboran los valores de placa (capacidad de 2400 mAh y tensión nominal de 14,4 V) necesarios para el correcto dimensionamiento del respaldo energético del nodo.

***Cálculo de autonomía frente a la carga real del sistema***

El dato de autonomía corresponde a plena carga (250 W), el sistema consume apenas una fracción de esa capacidad:

$$\text{Factor de carga } \frac{250\ W}{16w} \approx 6{,}4\%$$

Tras el análisis pudimos notar que el sistema esta sobredimensionado respecto a lo que realmente respalda, lo cual es positivo para la autonomía, debido al tiempo de respaldo de un UPS no escala de forma lineal con la carga, sino inversamente: a menor consumo, mayor duración.

Tomando el valor reportado de batería interna (12 V, 7 Ah → 84 Wh nominales) y aplicando un factor de eficiencia conservador del inversor de 0,65–0,70.

$$\text{Autonomía} = \frac{84\ Wh}{16\ Wh} \times 0{,}65 \approx 3{,}4\ h$$

El rango estimado de autonomía real comprende entre las 2,2 y 3,4 horas.

Con la corriente de carga nominal del AGV (0,6 A hacia una batería de 2400 mAh), un ciclo de carga completo toma aproximadamente:

$$tcarga = \frac{2400\ mAh}{600\ mA} \approx 4\ h$$

Es decir, la autonomía de la UPS (2,2–3,4 h) cubre entre el 55% y el 85% de un ciclo de carga completo del AGV. En términos prácticos: un corte de energía durante la noche o durante una sesión de pruebas no interrumpe una carga en curso ni deja al sistema de supervisión sin registro, pero si el corte se prolonga más allá de ese margen, conviene que el firmware contemple ese escenario (por ejemplo, journaling del estado antes de que la UPS se agote, ya que **anotar ()** cierra el archivo tras cada escritura y eso ya protege el registro ante un apagado abrupto).

**Análisis de resultados**

***Descripción general del ensayo***

Se presenta a continuación el análisis del ciclo de carga registrado por el nodo de adquisición implementado en el Capítulo IV, correspondiente a la batería del vehículo autónomo guiado tras haber sido llevada a un estado de descarga mediante misiones de limpieza sucesivas. El registro comprende 143 muestras adquiridas a intervalos de un minuto, para una duración total de captura de 142 minutos, equivalentes a 2 horas y 22 minutos. El ciclo completo exhibe dos tramos claramente diferenciados: un tramo inicial de corriente prácticamente nula, correspondiente al intervalo entre el acople físico del vehículo y el arranque efectivo del proceso de carga por parte del circuito interno del robot; y un tramo de corriente sostenida, correspondiente a la carga activa de la batería, que finaliza con un descenso abrupto de la corriente al alcanzarse el criterio de carga completa.

***Estadística descriptiva del tramo de carga activa***

El tramo de carga activa se extiende entre el minuto 29 y el minuto 142 del registro, con una duración de 113 minutos (1 hora con 53 minutos). Sobre este tramo, que constituye el 79,7

% de la duración total del ensayo, se calcularon los estadísticos descriptivos que se presentan en la **Tabla *2***.

**Tabla 3**

*Estadística descriptiva de las variables eléctricas*

| Variable | Media | Desv. estándar | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| Tensión (V) | 19,805 | 0,002 | 19,797 | 19,810 |
| Corriente (mA) | 432,2 | 10,7 | 415,9 | 469,0 |
| Potencia (W) | 8,560 | 0,17 | 8,238 | 9,288 |

La tensión medida en bornes de la estación de carga se mantiene prácticamente constante durante todo el tramo de carga activa, con una desviación estándar de apenas 0,002 V, coherente con el hecho de que dicha tensión la impone la fuente de alimentación y no la batería del vehículo. La corriente exhibe una variabilidad moderada (coeficiente de variación del 2,5 %), compatible con el comportamiento de un cargador de corriente constante y con la resolución del promediado configurado en el amplificador de ganancia programable del INA219.

***Energía consumida y validación contra la capacidad teórica de la batería***

La energía consumida se obtuvo mediante la integración numérica de la potencia instantánea implementada en el firmware del nodo (**Ecuación *8***, Capítulo II). Durante el tramo de carga activa se registró una energía acumulada de 16,0926 Wh, mientras que la captura completa incluido el tramo previo de corriente marginal— totalizó 16,1918 Wh. La batería del vehículo, según la hoja de especificaciones del fabricante, tiene una capacidad nominal de 2400 mAh a una tensión de 14,4 V, lo que equivale a una energía teórica de 34,56 Wh. El valor registrado por el sistema (16,19 Wh) representa el 46,9 % de dicha capacidad teórica, lo cual es consistente con el hecho de que el ensayo no capturó el ciclo de carga completo desde el 0 % hasta el 100 %, sino únicamente el tramo comprendido desde el momento del acople hasta la finalización del registro.

***Comportamiento en el tramo previo al arranque de la carga***

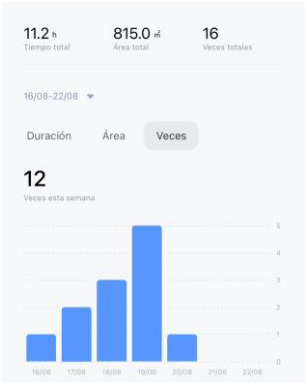
En los primeros 28 minutos del registro, el sistema identifico la tensión en la estación de carga (19,80–19,86 V), con una media de 1,88 mA y un máximo de 2,4 mA. Este comportamiento corresponde al intervalo en el que el vehículo se encuentra físicamente acoplado a la base, pero el circuito de gestión de batería interno del robot aún no habilita el paso de corriente de carga. Esta observación demuestra que el sistema implementado es capaz de distinguir, sin intervención del fabricante, entre el acople físico y el inicio real del proceso de carga, distinción que la aplicación comercial del vehículo no expone al usuario.

***Registro operativo del vehículo y de los consumibles***

Como evidencia complementaria del funcionamiento del sistema implementado, la **Figura 38,** presenta el historial de limpieza acumulado por el vehículo en la semana de pruebas (16/08 – 22/08), registrando un total de 16 misiones ejecutadas, 11,2 horas de operación acumuladas y 815,0 m² de superficie cubierta, con un máximo de actividad concentrado el día 19/08 (cinco misiones, 265 m² cubiertos).

**Figura 38**

*Historial semanal de misiones de limpieza (veces)*



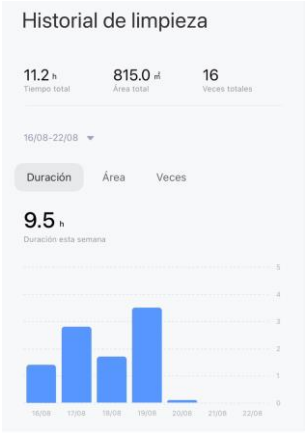

*Nota.* En la imagen se detalla el número de usos del AGV que fue utilizado en la semana, mismas que se logran visualizar el pico más alto el 19 de agosto, fecha en la cual se implementó la automatización ordenes de limpieza.

La **Figura 39** muestra el historial semanal de misiones de limpieza, correspondiente al período comprendido entre el 16 y el 22 de agosto.

Como parte de la verificación del funcionamiento del sistema una vez integrado el AGV al entorno del laboratorio, se registró el historial operativo generado por la aplicación móvil nativa del fabricante durante una semana de pruebas continuas. Este registro permite contrastar el comportamiento real del vehículo, en condiciones normales de uso, con los parámetros de diseño planteados en las secciones anteriores del presente trabajo.

**Figura 39**

*Historial semanal de misiones de limpieza (duración)*

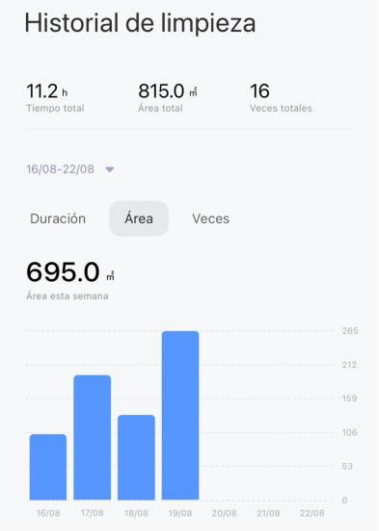



*Nota.* La distribución diaria evidencia una mayor concentración de actividad los días 17 y 19 de agosto, con una caída notable hacia el final del período consistente con jornadas de menor uso del laboratorio lo que confirma que el sistema respondió de forma autónoma a la variabilidad real de la demanda de limpieza, sin intervención manual adicional una vez configuradas las misiones.

De manera complementaria, la Figura 40 separa el área efectivamente cubierta por el AGV durante el mismo período, alcanzando un total de 695,0 m² en la semana en curso al momento del registro. La distribución diaria del área guarda una correspondencia directa con la de duración observada en la Figura 40**.**

**Figura 40**

*Historial semanal de misiones de limpieza (Área)*




*Nota.* El gráfico indica una velocidad de cobertura relativamente estable a lo largo de las distintas misiones, sin variaciones abruptas que sugieran obstáculos recurrentes o rutas ineficientes durante el período evaluado.

La **Figura 41** presenta la vida útil restante de los consumibles del sistema de limpieza (cepillo, cepillo lateral, filtro y almohadillas de la mopa), variable que, en conjunto con la energía por ciclo, permite proyectar los costos de mantenimiento del sistema.

**Figura 41**

*Gestión de consumibles del vehículo*



*Nota*. Este mecanismo de seguimiento, propio del ecosistema Xiaomi Home, es funcionalmente equivalente al bloque de consumibles incorporado en la interfaz gráfica propia del sistema, donde se implementó un cálculo análogo basado en las horas acumuladas de operación reportadas por el propio AGV para anticipar el reemplazo de cepillos, filtro y mopa antes de que su desgaste comprometa la calidad de limpieza o la integridad del motor de succión.

***Configuración de rutinas de limpieza automatizada***

Como complemento a la instrumentación de la estación de carga descrita en los apartados anteriores, se configuraron las rutinas de limpieza automatizada disponibles de forma nativa en la plataforma AGV comercial, con el fin de establecer un régimen de operación regular y reproducible durante la fase de validación del sistema. Cabe precisar que esta configuración se realiza a través de la aplicación de usuario final provista por el fabricante y no constituye parte del desarrollo propio descrito en los Capítulos II y III; se documenta en este apartado por su incidencia directa sobre los datos de cobertura y consumo energético presentados en el presente capítulo.

Para establecer la rutina del vehículo autónomo guiado, se utilizó la aplicación de usuario dado por el fabricante (Xiaomi Home), la cual permite parametrizar las rutinas de la plataforma comercial sin alterar su firmware original. Inicialmente, se ejecutó un recorrido de reconocimiento en el cual el sensor LDS generó el mapa bidimensional completo del entorno, permitiendo segmentar el área de trabajo en zonas específicas (Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4 y Oficina)

La Figura 42, para una navegación ordenada y focalizada. Se configuró una secuencia de limpieza profunda con succión en modo "Turbo", flujo de agua en nivel 3 y un patrón de ruta "en profundidad" con doble pasada, programada para ejecutarse todos los viernes a las 17:00 horas.

**Figura 42**

*Reconocimiento y seccionamiento del laboratorio de Circuitos Eléctricos.*



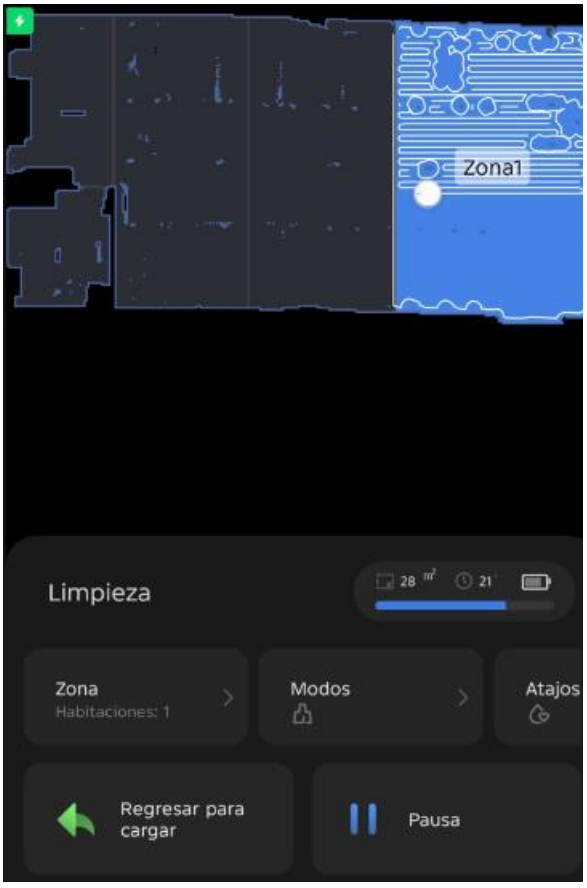

*Nota.* El gráfico indica el laboratorio de Circuitos Eléctricos estando ya seccionado las Zonas para poder recabar información y la siguiente salida el AGV reconozca el lugar y comienzo la limpieza automáticamente.

Cuando llega el tiempo en que se programó, el AGV empieza su recorrido de manera automática. La telemetría de la aplicación detecta el avance en los primeros minutos; comenzando a cubrir la Zona 1, consiguiendo un avance de $40m^2$ en 29 minutos, esto que evidencia la densidad del patrón de ruta profunda configurado (anexo D). Una vez finalizada esta primera área, el sistema pasa automáticamente a la Zona 1

En la Figura 43, comienza con la definición del perímetro del vehículo y la ejecución del patrón de barrido interior, que cubre los primeros $13m^2$ en 8 minutos (anexo D). Al finalizar esta etapa, el robot ha cubierto $27m^2$ en 19 minutos (anexo D).

**Figura 43**

*Reconocimiento de las Zonas y comienzo del mapeo.*



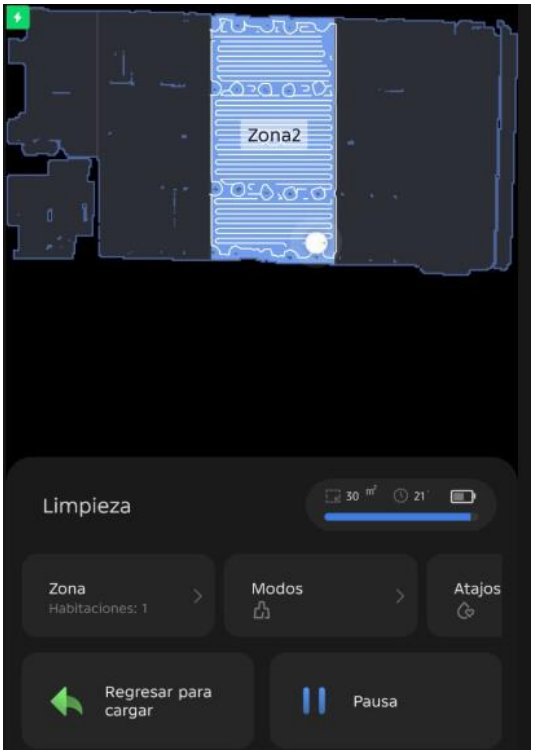

*Nota.* El gráfico indica el mapeado del laboratorio de Circuitos Eléctricos iniciando el en la Zona 1 para poder recabar información y poder continuar con la siguiente zona.

El avance secuencial continúa hacia la Zona 2 (*Figura 44*), donde el AGV mantiene el patrón sistemático, logrando limpiar 25 m² en 22 minutos (anexo D). Posteriormente, el equipo ingresa a la Zona 4, un espacio más reducido, donde limpia 8 m² en 6 minutos (anexo D).

Finalmente, en la Figura 44 se muestra el desplazamiento hacia la oficina para concluir la rutina, limpiando los últimos 2 m² en 1 minuto (anexo D). Para las pruebas se utilizó una limpieza estándar.

**Figura 44**

*Mapeo del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Zona 2.*



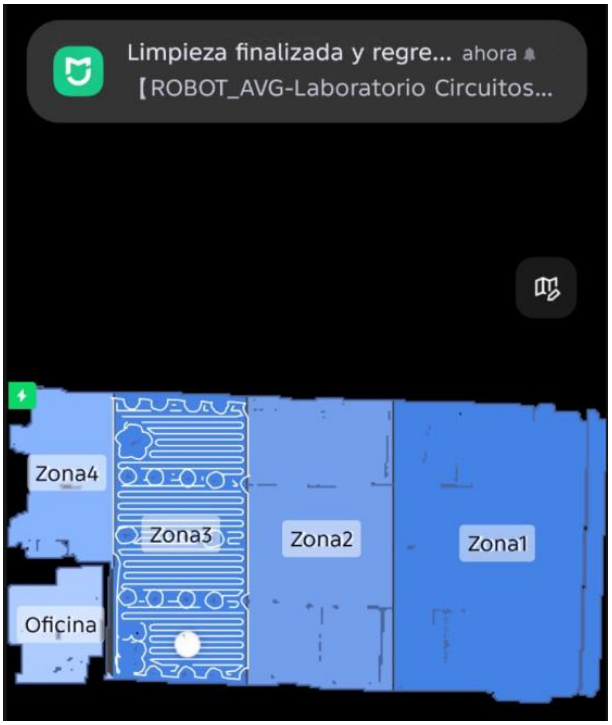

*Nota*. El gráfico indica el laboratorio de Circuitos Eléctricos acabando el mapeo de las Zona 2 para poder recabar información y poder continuar con la siguiente zona.

Una vez que el AGV ha completado la limpieza de todas las zonas programadas, la aplicación emite una notificación de "Limpieza finalizada y regresando" (*Figura 45*). En este punto, el vehículo interrumpe sus actuadores de limpieza y navega de manera autónoma de regreso a la estación de carga.

En la Figura 45 muestra el estado "Volviendo", consolidando un área total cubierta de 28 m² en 25 minutos para ese segmento final de la misión.

**Figura 45**

*Finalización del mapeo del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Zona 3.*



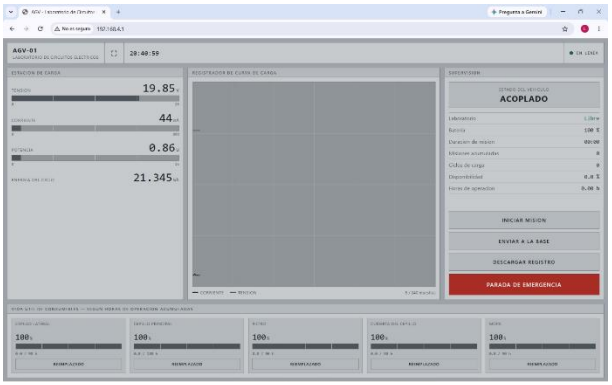

*Nota.* El gráfico indica el laboratorio de Circuitos Eléctricos acabando el mapeo de las Zona 3 para poder recabar información y poder continuar con la siguiente zona.

**Implementación del interfaz Humano-Maquina**

La Figura 46 muestra el panel principal de la Interfaz Humano-Máquina en su versión final, tal como se presenta al operador desde cualquier navegador conectado a la subred del nodo de supervisión. El diseño se organiza en tres columnas y una franja inferior.

**Figura 46**

*Interfaz humano – máquina*




*Nota.* Su diseño final el cual entra en contacto con el operador, mantiene los parámetros establecidos por la normativa ***ANSI/ISA-101.01-2015.***

La barra superior identifica el equipo (AGV-01) y su ubicación física, muestra la hora del reloj de software del sistema y un indicador de estado de enlace, que confirma en todo momento si la comunicación por WebSocket entre el navegador y el microcontrolador se encuentra activa.

La columna de la izquierda, Estación de carga, presenta las cuatro variables eléctricas adquiridas por el circuito INA219: tensión, corriente, potencia instantánea y energía acumulada del ciclo en curso, cada una con una barra de proporción respecto a su rango de operación esperado.

La columna central, Registrador de curva de carga, traza en tiempo real la evolución de la corriente y la tensión sobre una ventana móvil de 240 muestras, lo que permite al operador visualizar en vivo el comportamiento de la carga sin necesidad de descargar el archivo de registro.

**Acoplamiento final de la estación de carga y supervisión.**

El acoplamiento final, mostrado en la Figura 47, constituye la consolidación física de la estación de carga y del nodo de supervisión del sistema de limpieza autónoma. La disposición refleja la jerarquía funcional del proyecto en tres niveles.

En el nivel de ejecución, en el piso, se encuentra el AGV Xiaomi S40C acoplado a su base de carga. Es la plataforma comercial que ejecuta de forma autónoma la navegación, el mapeo y la limpieza mediante su sensor de distancia láser, tratada en este trabajo como un equipo de campo cerrado.

En el nivel de respaldo energético, sobre el archivador, se ubica el Sistema de Alimentación Ininterrumpida Forza NT-511. Su función es mantener operativos el nodo de adquisición y la base de carga ante un corte de energía, protegiendo tanto la continuidad del registro como una carga en curso, según el dimensionamiento presentado en el Capítulo IV.

En el nivel de control y supervisión, el gabinete metálico industrial Beaucoup aloja físicamente el nodo de adquisición: el microcontrolador ESP32, el circuito integrado INA219 y la instrumentación de la estación de carga. Es este microcontrolador, y no un equipo externo, el que ejecuta la lógica de enclavamiento, sirve la Interfaz Humano-Máquina y gestiona el registro de datos.

En la **Figura *47***, nos muestra tablet, montada en la parte superior, funciona como terminal del HMI: permite al operador visualizar en tiempo real las variables eléctricas, el estado del vehículo, la disponibilidad operativa y la vida útil de los consumibles, así como enviar comandos de inicio de misión, retorno a la base y parada de emergencia, sin depender de ningún equipo externo ni de aplicaciones de terceros.

**Figura 47**

*Implementación final*

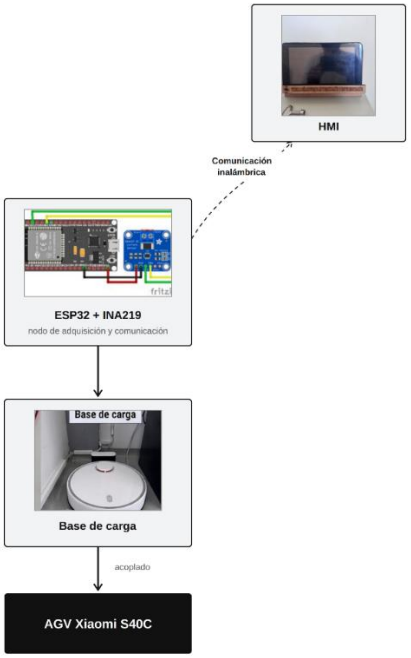


*Nota.* Implementación final con la estación de monitoreo hacia la estación de carga junto con el sistema UPS.

En la **Figura *48***, este esquema complementa la descripción del hardware presentada en el Capítulo II, mostrando de forma visual el sentido en que fluye la información entre los componentes físicamente instalados.

**Figura 48**

*Diagrama de flujo de la comunicación del sistema.*

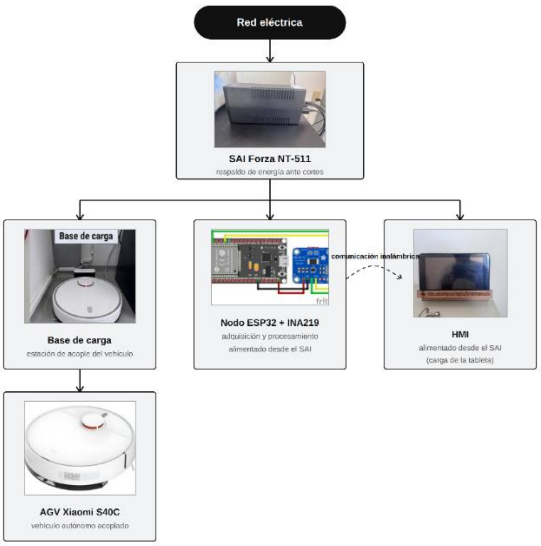


*Nota.* El diagrama representa el nodo de adquisición, compuesto por el microcontrolador ESP32 y el circuito INA219, como el origen de la comunicación hacia la interfaz humano-máquina (HMI); el enlace entre ambos es inalámbrico, establecido mediante la subred SoftAP servida por el propio ESP32, sin que exista conexión física entre el nodo y la tableta que aloja el HMI.

En la **Figura *49***, se elaboró un diagrama que sintetiza cómo se distribuye la energía desde la red eléctrica del laboratorio hasta cada uno de los subsistemas involucrados.

**Figura 49**

*Distribución de energía y comunicación del sistema*



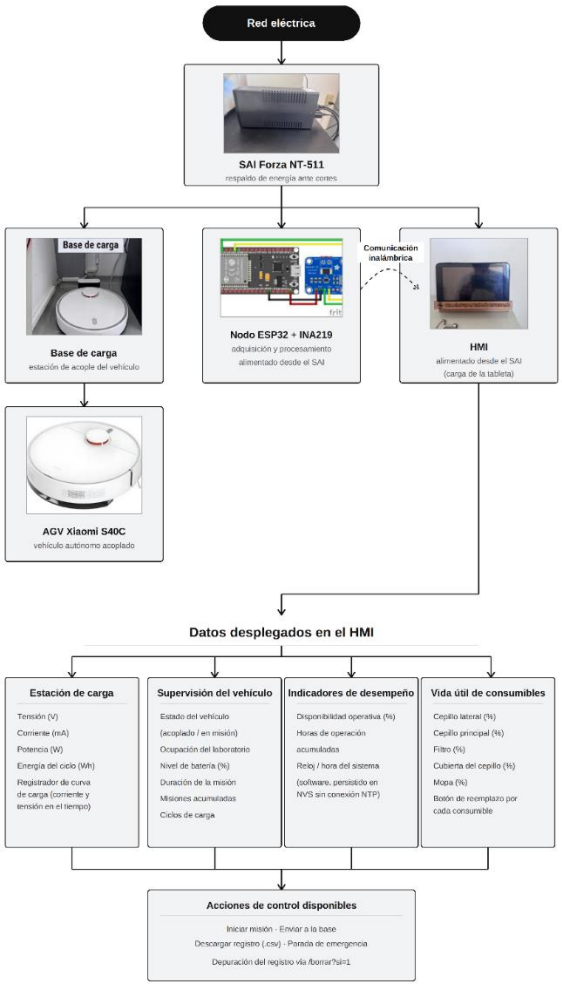

*Nota*. El diagrama parte de la red eléctrica del laboratorio como fuente primaria de alimentación, la cual ingresa al Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) Forza NT-511. Desde el SAI se derivan tres cargas independientes: la base de carga del vehículo autónomo, donde se acopla físicamente el AGV Xiaomi S40C; el nodo de adquisición compuesto por el microcontrolador ESP32 y el circuito INA219; y la interfaz humano-máquina (HMI), cuya tableta recibe alimentación eléctrica del mismo SAI para su carga, de forma independiente al canal de datos que emplea. La línea punteada entre el nodo de adquisición y el HMI representa el

enlace de comunicación inalámbrica establecido mediante la subred SoftAP servida por el propio ESP32.

En la **Figura *50***, se integró en una sola figura el diagrama de distribución de energía y la relación de variables desplegadas en el HMI. Aqui nos permite trazar de forma continua el recorrido completo: desde la fuente de alimentación del laboratorio hasta el dato específico que el operador observa en pantalla, evidenciando que cada categoría de información mostrada en la interfaz tiene un origen físico identificable dentro de la arquitectura del sistema.

**Figura 50**

*Distribución y datos desplegados en el HMI.*

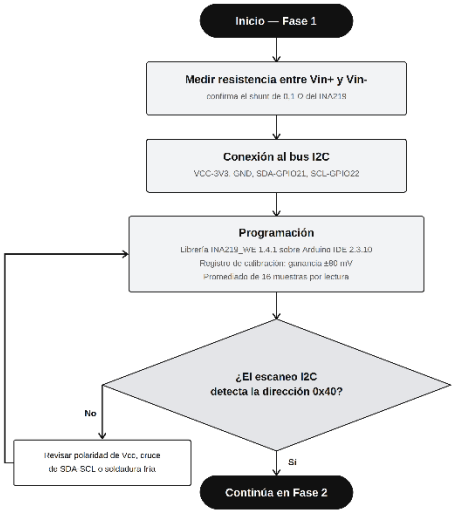


*Nota*. La mitad superior del diagrama reproduce la topología de alimentación ya descrita: la red eléctrica del laboratorio ingresa al Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) Forza NT-511, el cual distribuye energía de forma independiente hacia la base de carga del vehículo autónomo, el nodo de adquisición (ESP32 + INA219) y la tableta que aloja el HMI; el enlace punteado entre el nodo y el HMI representa el canal de datos inalámbrico vía SoftAP,

En la **Figura *51***, antes de intervenir el circuito de potencia, se verificó de forma aislada el módulo de instrumentación, con el propósito de descartar fallas del componente antes de exponerlo a la tensión real de la estación de carga. Este paso resultó particularmente relevante en el desarrollo del proyecto, dado que dos módulos INA219 se dañaron previamente por una conexión incorrecta de sus terminales de potencia.

**Figura 51**

*Verificación del módulo INA219*

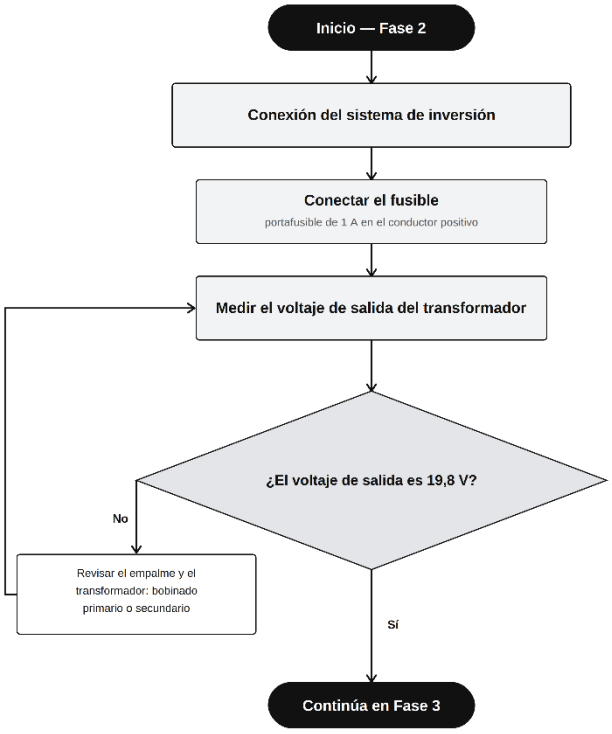



*Nota.* El diagrama representa el procedimiento de verificación del módulo INA219 previo a su integración en el circuito de potencia, incluyendo el punto de control mediante el cual se confirma la respuesta del dispositivo en la dirección I²C 0x40.

En la **Figura *52***, una vez verificado el módulo, se intervino el cable del adaptador de alimentación para incorporar la protección por fusible descrita en el Capítulo II. Esta fase incluye la identificación de los tres conductores del cable positivo, negativo e identificador del fabricante y la verificación de la tensión resultante antes de conectar cualquier equipo a la línea preparada.

**Figura 52**

*Preparación de la línea de potencia*



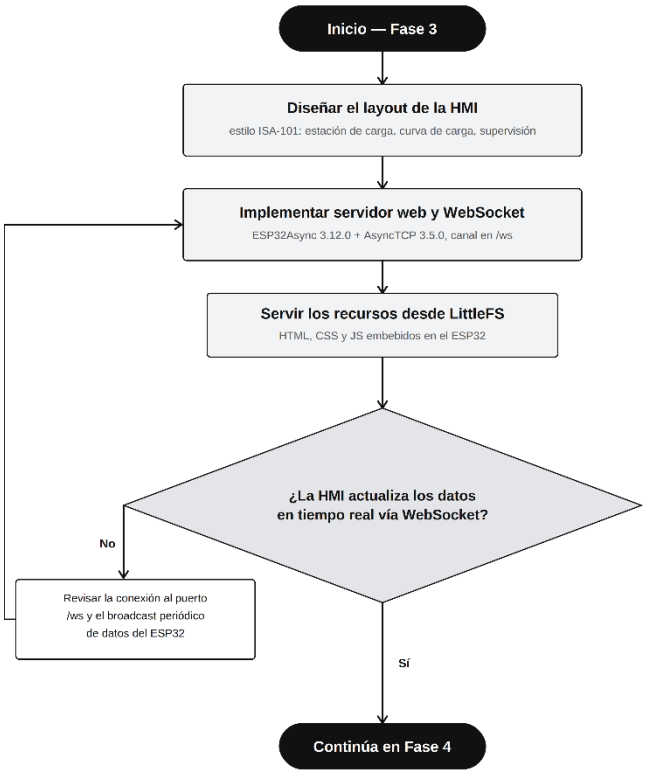

*Nota.* El diagrama detalla la preparación de la línea de alimentación, desde la identificación de los conductores del cable hasta la verificación de la tensión y polaridad en el punto de empalme, previa a la conexión del circuito de instrumentación.

En la **Figura *53***, después de lograr obtener el voltaje de salida ideal, continuamos, en esta fase diseñamos la interfaz de supervisión. Se definió el layout de la interfaz bajo el

estándar visual ISA-101, se implementó el servidor web embebido con canal de comunicación bidireccional mediante WebSocket, y se configuró el sistema de archivos LittleFS.

**Figura 53**

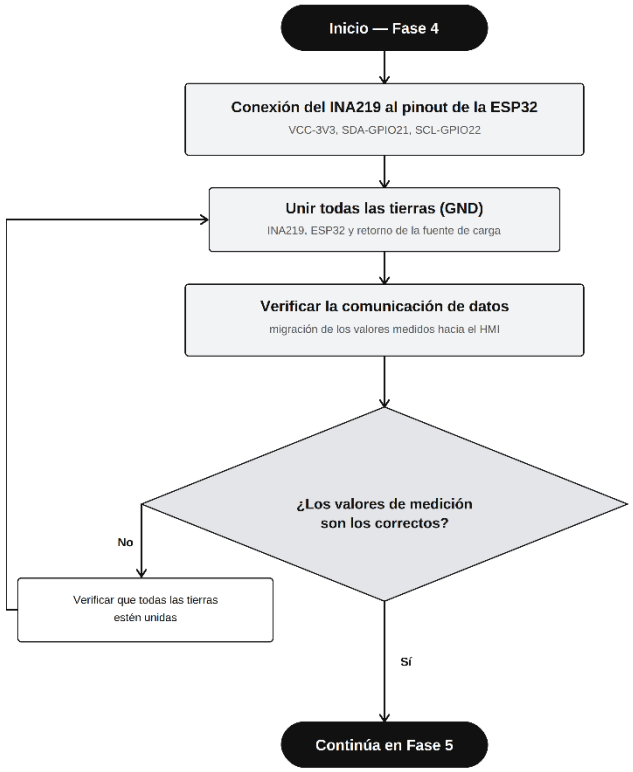
*Diseño del HMI.*




En la **Figura *54***, ya con el diseño del HMI completado y la verificación de datos sea la correcta, continuamos con la línea de potencia protegida, se procedió a conectar el módulo de instrumentación en el trayecto de corriente hacia la base de carga, una vez establecida la referencia de tierra común entre el circuito de potencia y el microcontrolador, esta última condición es indispensable para que la medición de voltaje sea similar a la del instrumento de medicion.

**Figura 54**

*Integración del INA219 en el circuito*

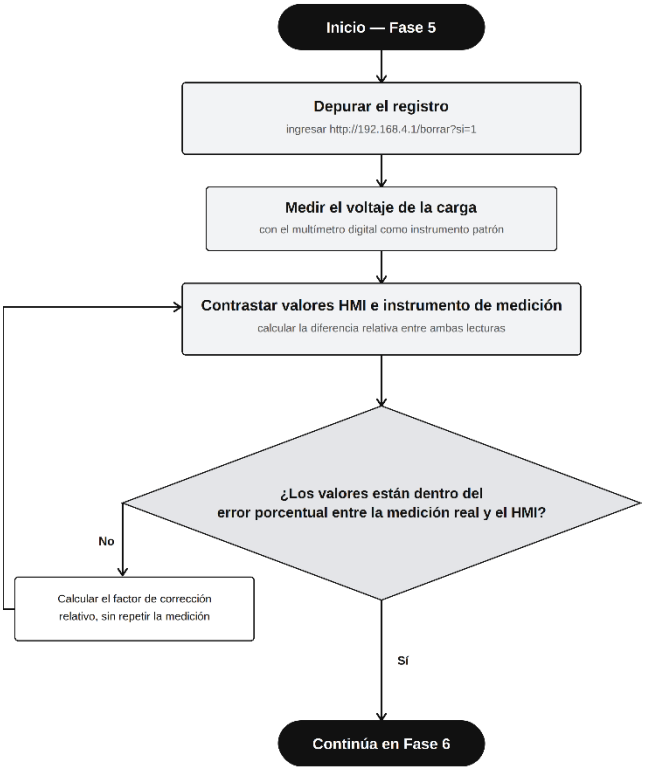



*Nota.* El diagrama ilustra la integración del módulo INA219 en el circuito de potencia y el punto de control mediante el cual se valida la referencia de tierra común entre los subsistemas de instrumentación y control.

En la **Figura *55***, con el sistema físicamente integrado, se procedió a su puesta en marcha y a la calibración de las lecturas obtenidas frente a un instrumento patrón, procedimiento descrito con mayor detalle en el apartado de Calibración y validación del instrumento del presente capítulo.

**Figura 55**

*Depuración y validación del registro.*

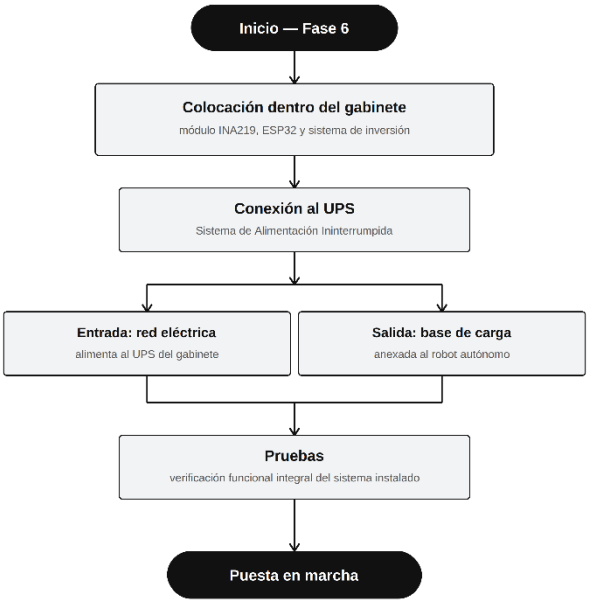



*Nota.* El diagrama detalla el procedimiento de puesta en marcha del sistema y el proceso de calibración de la corriente medida frente al instrumento patrón, incluyendo el criterio de aceptación del error relativo.

En la **Figura *56***, se muestra la implementación final, en esta última fase aborda la integración física de todos los subsistemas dentro de su emplazamiento final en el laboratorio, culminando con las pruebas de verificación funcional que habilitan la operación del sistema.

**Figura 56**

*Instalación física del sistema*




*Nota*. El diagrama documenta, con evidencia fotográfica del montaje real, la secuencia seguida para la instalación física del sistema. Se inicia con la colocación del nodo de adquisición (ESP32 + INA219) y el sistema de inversión dentro del gabinete metálico industrial, seguida de su conexión al Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) Forza NT-511.

# Capítulo IV

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Se implementó un sistema de limpieza autónoma supervisada que integra una plataforma robótica comercial (Xiaomi S40C) con navegación basada en sensor de distancia láser (LDS) a una capa de adquisición de datos y supervisión externa gobernada por el microcontrolador ESP32, cumpliendo con el objetivo general establecido para este trabajo. Esta arquitectura demostró la viabilidad técnica de auditar externamente un equipo de consumo de código cerrado sin necesidad de vulnerar o intervenir su firmware o hardware original de fábrica.

El nodo de instrumentación desarrollado, basado en el circuito integrado INA219 acoplado a una resistencia shunt de 0.1Ω en el lado alto, demostró una alta precisión al registrar las variables de tensión, corriente, potencia y energía acumulada del proceso de carga1. Al ser contrastado con un multímetro de laboratorio tomado como patrón, el error relativo se mantuvo por debajo del 1.2% durante la etapa de carga activa (432.2 mA promedio frente a 427.0 mA del patrón), validando el diseño del amplificador de ganancia programable de ± 80mV y el filtro digital de 16 muestras consecutivas.

El sistema de adquisición demostró la capacidad analítica de discriminar autónomamente entre el acoplamiento físico del robot a los bornes de la base de carga y el inicio real del proceso de carga química de la batería. Durante los primeros 28 minutos de reposo, el sensor registró una tensión constante (19.80 V a 19.86 V) pero una corriente residual prácticamente nula de 1.88 mA, evidenciando un nivel de detalle operativo y de salud de la batería que la aplicación propietaria del fabricante no expone al operador final.

El registro de datos acumulado durante la semana de validación (que consolidó un historial real de 16 misiones, 11.2 horas de operación acumuladas y 815.0 m² de superficie cubierta) comprobó la efectividad de la programación operativa local. Al coordinar la ejecución

del robot los viernes a las 17:00 horas (ventana de menor concurrencia) con la recopilación automática de datos en formato CSV en la memoria LittleFS del ESP32, se solucionó de manera definitiva la falta de trazabilidad histórica identificada en el problema de investigación.

La Interfaz Humano-Máquina (HMI) web, alojada directamente en la memoria flash (PROGMEM) del ESP32 y accedida de forma local mediante la dirección http://192.168.4.1, reemplazó con éxito la dependencia de servidores en la nube de terceros. Al utilizar una conexión bidireccional mediante WebSockets (/ws), el sistema transmitió tramas JSON cada segundo, permitiendo la monitorización instantánea del estado energético y la estimación en tiempo real del desgaste de los consumibles mecánicos de limpieza (filtros, cepillos y mopa) desde la tableta del laboratorio.

El ensayo de recarga determinó un consumo acumulado de 16.19 Wh para un ciclo de 142 minutos, lo cual equivale al 46.9% de la capacidad teórica nominal de la batería de litio del AGV (34.56 Wh, calculada a 2400 mAh y 14.4 V). Esta medición parcial se fundamenta físicamente en que el ensayo experimental no se inició desde un estado de descarga total (0% absoluto), sino a partir del umbral crítico de autonomía baja en el cual el robot suspende por sí mismo la navegación y retorna de manera autónoma a su estación de carga.

La arquitectura desarrollada demuestra, a nivel de prototipo funcional, que es posible convertir un equipo comercial cerrado en un activo monitoreado y auditable mediante una capa externa de instrumentación, sin necesidad de intervenir el firmware ni el hardware original del fabricante, principio aplicable a otros equipos similares dentro de la institución.

**Recomendaciones**

Se recomienda repetir el ensayo de recarga asegurando que la batería del vehículo autónomo guiado sea drenada por completo antes de iniciar el registro, permitiendo documentar la curva de carga ininterrumpida desde el acople físico hasta el corte por saturación química reportado por el cargador, con el propósito de validar la exactitud de la integración de potencia frente al 100% de la capacidad teórica nominal (34.56 Wh).

Incorporar en las rutinas de cálculo del firmware del ESP32 el factor de corrección de 0.988 deducido durante el contraste de corriente activa frente al instrumento patrón de laboratorio, con la finalidad de suprimir la incertidumbre residual en los algoritmos de integración de potencia y maximizar la exactitud de los reportes energéticos futuros.

Migrar el nodo de comunicaciones del ESP32 desde el modo de punto de acceso actual (SoftAP) hacia el modo estación (STA). Esto permitirá enlazar el dispositivo directamente a una subred inalámbrica local dedicada y aislada dentro del laboratorio, facilitando que múltiples terminales autorizados visualicen la HMI de forma concurrente sin requerir la desconexión manual de la red general del campus.

Evaluar la incorporación física de un sensor de ocupación de tipo radar de onda milimétrica (mmWave) conectado a un pin digital de entrada del ESP32 (como el pin GPIO27). Esto permitirá añadir una lógica de seguridad por hardware en el laboratorio de Circuitos Eléctricos, posibilitando que el microcontrolador actúe como un interruptor de enclavamiento físico que bloquee el suministro eléctrico de la base o emita alertas si se detecta presencia estática de estudiantes durante horas programadas de limpieza.

Ampliar el período de registro y almacenamiento de datos históricos en LittleFS más allá de la semana de validación de prueba, con el objetivo de estructurar una base de datos estadísticamente robusta que permita caracterizar con precisión los perfiles de desgaste mecánico y modelar la disponibilidad operativa del sistema de limpieza a largo plazo.

Como principal línea de desarrollo e integración domótica, implementar una Mini PC local ejecutando la plataforma de integración de código abierto Home Assistant. Esto permitirá centralizar y unificar los servicios: la Mini PC puede extraer el token local del robot comercial para enviarle comandos directos de movimiento desde la propia HMI web (reutilizando el diseño web desarrollado), mientras el ESP32 transmite las variables eléctricas al servidor central empleando protocolos ligeros de mensajería industrial como MQTT. Esto dotará al sistema de un control bidireccional completo e interactivo sin depender de la nube del fabricante.

Publicar y documentar en repositorios institucionales de código abierto tanto el firmware desarrollado para el microcontrolador como la estructura del archivo de cabecera de la interfaz HMI (pagina.h), promoviendo la replicabilidad de esta arquitectura de supervisión externa en otros laboratorios de la universidad que utilicen plataformas cerradas equivalentes.

## Referencias

[1] Z. J. &. S. S., «LOAM: Lidar odometry and mapping in real-time,» 2014.

[2] Solving, «Solving,» What is an AGV: The comprehensive guide, s.f s.f s.f. [En línea]. Available: https://www.solving.com/agv-complete-guide/. [Último acceso: 21 08 2026].

[3] Fabrico, «Fabrico,» Magnetic Tape, Laser Triangulation, and Natural Feature SLAM: AGV Navigation Methods Compared, s.f s.f s.f. [En línea]. Available: https://www.fabrico.io/blog/agv-navigation-methods-compared/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[4] K. A., Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2013.

[5] TechTarget, «IoT Agenda,» What is a microcontroller (MCU), s.f. s.f. s.f.. [En línea]. Available: https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[6] Espressif Systems, «ESP32 Series Datasheet,» 2024.

[7] «TodoMaker,» Conociendo al ESP32, [En línea]. Available: https://todomaker.com/blog/conociendo-al-esp32/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[8] «Mundotek,» Xiaomi S40C E101 aspiradora robot vacuum, [En línea]. Available: https://mundotek.com.ec/producto/xiaomi-s40c-e101-aspiradora-robot-vacuum-55w-aspira-y-trapea-3-niveles-de-control/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[9] Creus Solé A., Instrumentación industrial, 8.ª ed. ed., Ciudad de México: Alfaomega, 2011.

[10] Pallás Areny R., Sensores y acondicionadores de señal, Barcelona: Marcombo, 2007.

[11] Texas Instruments, «INA219 Zerø-drift, bidirectional current/power monitor with I2C interface,» Texas Instruments, 2015.

[12] Megatronica, «Megatrónica Tienda,» NA219 Módulo sensor monitor de corriente y voltaje DC, [En línea]. Available: https://megatronica.cc/producto/ina219-modulo-sensor-monitor-de-corriente-y-voltaje-dc/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[13] J. P. Bentley, Principles of Measurement Systems, Harlow, Inglaterra: Pearson Prentice Hall, 2005.

[14] Electronica Avanzada, ADC Conversor analogico a digital, 21 Octubre 2019. [En línea]. Available: YouTube, oct. 21, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=qDRgoVo6kkE. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[15] HetPro, Protocolo de comunicación I2C explicado, [En línea]. Available: https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[16] A. R. y. S. Salam, Internet of Things from Hype to Reality: The Road to Digitization, Cham, Suiza: Springer, 2019.

[17] «Cursosaula21,» Qué es un HMI, [En línea]. Available: https://www.cursosaula21.com/que-es-un-hmi/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[18] D. S.-R. e. I. A.-G. A. Medina-Pérez, An Internet of Thing architecture based on Message Queuing Telemetry Transport protocol and Node-RED: A case study for monitoring radon gas, Smart Cities, 2021.

[19] Algomaster, «Algomaster Blog,» An Introduction to WebSockets, [En línea]. Available: https://blog.algomaster.io/p/websockets. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[20] R. C. Hansen, Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/Maintenance Tool for Increased Profits., Industrial Press: Nueva York, 2001.

[21] «Cirkit Designer,» How to Use INA219: Examples, Pinouts, and Specs, [En línea]. Available: https://docs.cirkitdesigner.com/component/b753512c-f916-431c-9e71-325ec6038562/ina219. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[22] Tecnit, «Tecnit Tienda Online,» UPS con regulador Forza NT-511 de 500VA 250W de 6 tomas, [En línea]. Available: https://tecnit.com.ec/producto/ups-con-regulador-forza-nt-511-de-500va-250w-de-6-tomas/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

[23] Tecnit, «Tecnit Tienda Online,» Gabinete metálico Beaucoup I-0317 soporte pesado 60x40x20cm, [En línea]. Available: https://tecnit.com.ec/producto/gabinete-metalico-beaucoup-i-0317-soporte-pesado-60x40x20cm/. [Último acceso: 21 Agosto 2026].

# Apéndice