DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN AUTOMATIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN

TEMA: 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

AUTORES:
QUEVEDO GAROFALO, JONATHAN FABIAN
REIMUNDO CORDONEZ, KEVIN FERNANDO

DIRECTORA:
MGTR. GUERRERO RODRIGUEZ, LUCÍA ELIANA



Objetivo general

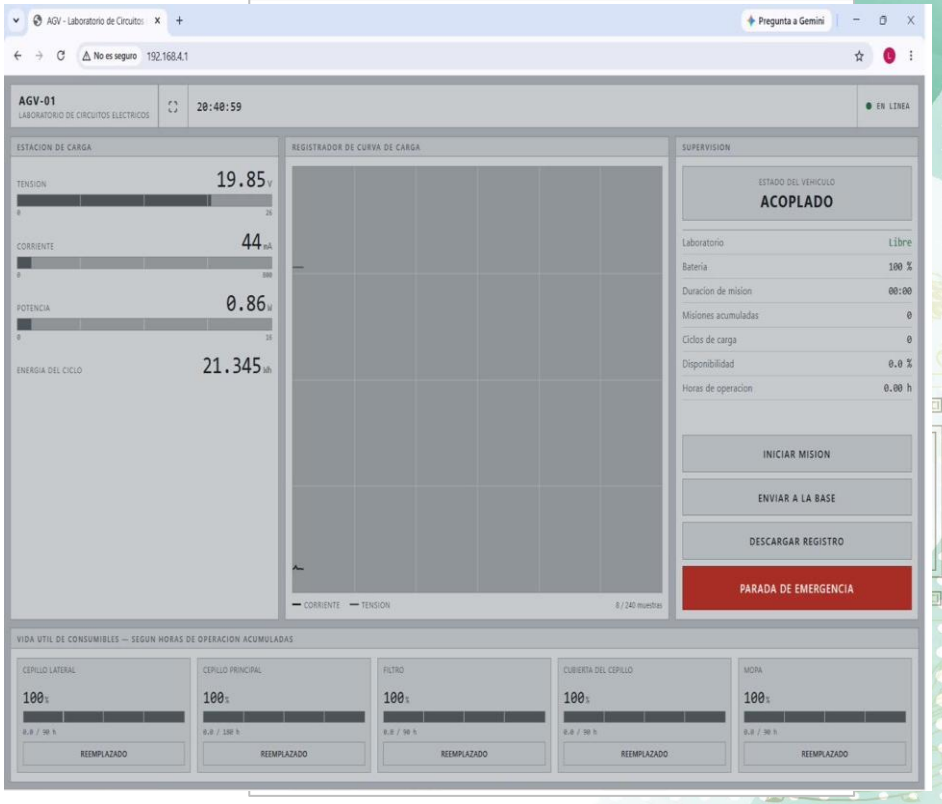
Implementar un sistema de limpieza autónoma supervisada, basado en un Vehículo Autónomo Guiado (AGV) con mapeo básico del entorno y una capa de adquisición y supervisión de datos, para mejorar el proceso de limpieza del laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,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

Contenido de la presentación

- Introducción y planteamiento del problema
- Objetivos y justificación
- Antecedentes, aporte y alcance
- Marco teórico: AGV, INA219, comunicación y HMI
- Metodología y arquitectura del sistema
- Desarrollo e implementación por bloques
- Resultados: calibración, curva de carga y operación
- Conclusiones y recomendaciones

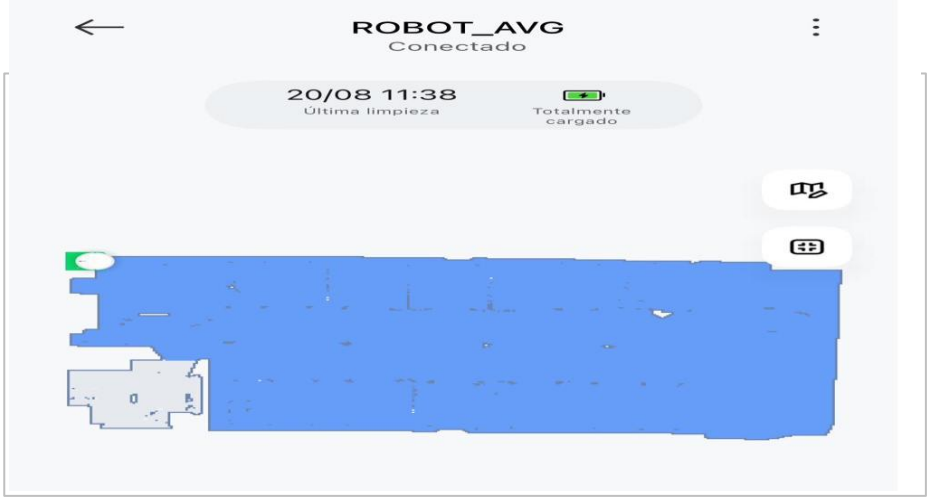


HMI del sistema AGV-01

Introducción

La automatización y la robótica móvil, pilares de la Industria 4.0, permiten que tareas manuales repetitivas pasen a sistemas autónomos. Los AGV comerciales ya no son exclusivos de la logística industrial: se integran en ámbitos académicos y de servicios.

El problema de ingeniería ha cambiado: la dificultad ya no está en construir el vehículo, sino en integrar un equipo comercial cerrado dentro de una arquitectura de supervisión abierta que permita programarlo, monitorearlo y auditarlo — un escenario típico de integración brownfield en la industria real.



Mapeo del laboratorio de Circuitos Eléctricos (LDS)

Planteamiento del problema

- Ineficiencia temporal: se estima ~1 hora diaria de personal dedicada casi en exclusiva a la limpieza del laboratorio.
- Limitaciones de acceso: anaqueles y mesas a nivel de piso impiden el aseo convencional; el polvo acumulado favorece corrientes de fuga en los circuitos.
- Falta de trazabilidad: no existe registro de cuándo, cuánto tiempo ni qué superficie se limpió, impidiendo verificar cumplimiento y costo operativo.

Pregunta de investigación: *¿De qué manera un AGV con mapeo básico, integrado a una capa de adquisición y supervisión, optimiza el tiempo operativo, el acceso a espacios reducidos y la trazabilidad del proceso de limpieza en el laboratorio de Circuitos Eléctricos de la ESPE, sede Latacunga?*

Justificación

- Práctica y operativa: automatiza la limpieza y reduce el tiempo de dedicación del personal de servicios generales; el AGV accede a espacios confinados de difícil alcance humano.
- Tecnológica y académica: consolida los conocimientos de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación.
- El núcleo de ingeniería reside en la capa de supervisión: acondicionamiento de la estación de carga, programación del ESP32, lógica de enclavamiento por ocupación, red aislada y HMI.
- Refleja un escenario típico de la industria: integración de equipos comerciales cerrados en arquitecturas abiertas (brownfield).

Antecedentes

Los AGV en la robótica de servicios han avanzado gracias a la creciente accesibilidad de plataformas comerciales con percepción espacial y a la consolidación de arquitecturas abiertas de supervisión.

Zhang y Singh (2014)	LOAM: odometría y mapeo LiDAR de alta fidelidad en tiempo real.
Isaacson et al. (2023)	LONER: localización y mapeo (SLAM) con baja latencia y alta fiabilidad.
Hess et al. (2016); Paden et al. (2016)	Separación entre planificación de alto nivel y control reactivo de bajo nivel.
Rayes y Salam (2019)	Integración brownfield: envolver equipos legacy con una capa externa de sensado y conectividad IIoT.

Aporte del presente proyecto

Los robots de limpieza comerciales operan como sistemas cerrados, gobernados por una app propietaria que no expone información de proceso. Este proyecto añade una capa externa de instrumentación y supervisión que convierte al equipo en un activo monitoreado y auditable.

- Instrumentación de la estación de carga (INA219): energía por misión, duración del ciclo y estado real de acople.
- Lógica de enclavamiento por ocupación: condiciona el arranque de misiones a la disponibilidad real del espacio.
- Rutina de limpieza programada: combina criterio temporal y de ocupación para ejecución autónoma.
- HMI industrial propia: sustituye la app comercial; autocontenida y sin dependencia de la nube.

Alcance del trabajo

Hardware

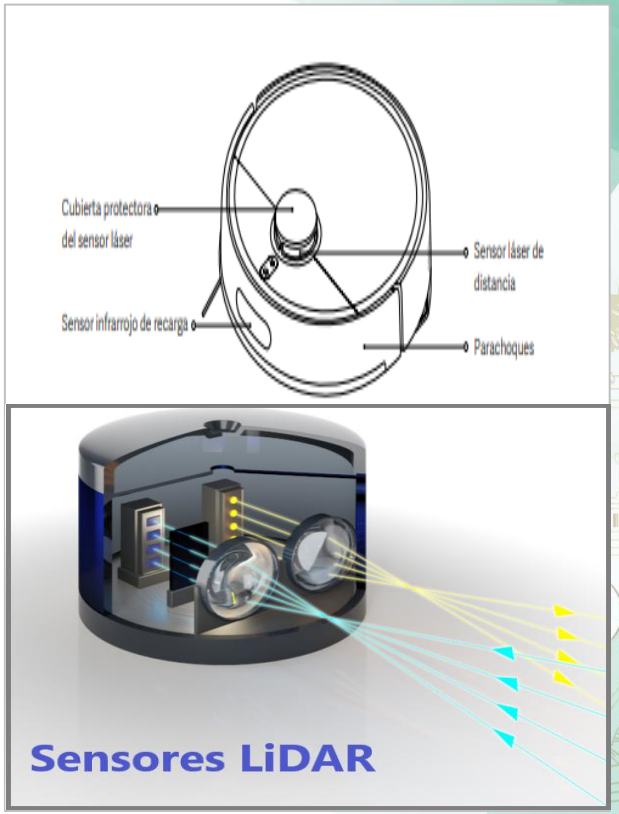
- AGV comercial con sensor de distancia láser
- Microcontrolador ESP32
- Instrumentación de corriente y tensión (INA219)
- Sensado de ocupación del laboratorio
- Servomotor de arranque de misión
- Red inalámbrica aislada

Software y límites

- Firmware de adquisición periódica y máquina de estados
- Enclavamiento por ocupación y rutina de viernes
- Registro histórico en memoria no volátil (LittleFS)
- HMI web autocontenida, sin dependencia externa
- No se interviene el firmware del AGV comercial
- No se integra a domótica ni nube de terceros

Marco teórico: AGV y sensor LDS

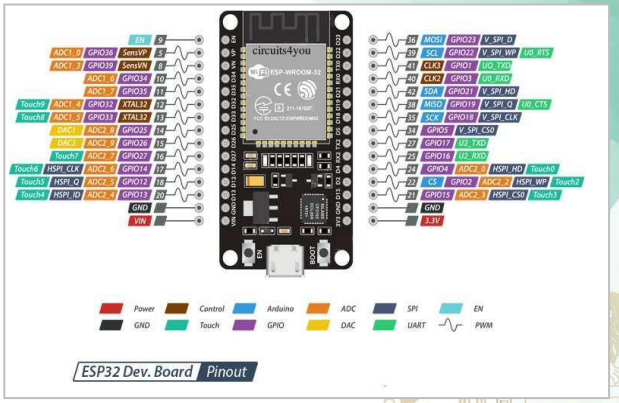
- AGV: vehículo capaz de desplazarse autónomamente siguiendo un método de guiado, sin intervención directa del operador.
- Cinemática de tracción diferencial: dos ruedas motrices independientes; la diferencia de velocidad entre ellas define la trayectoria.
- Sensor LDS (Laser Distance Sensor): torreta láser rotativa que aplica el principio de tiempo de vuelo (ToF): $d = (c \cdot \Delta t) / 2$.



Composicion externa del AGV y funcionamiento del sensor

Odometría y microcontrolador ESP32

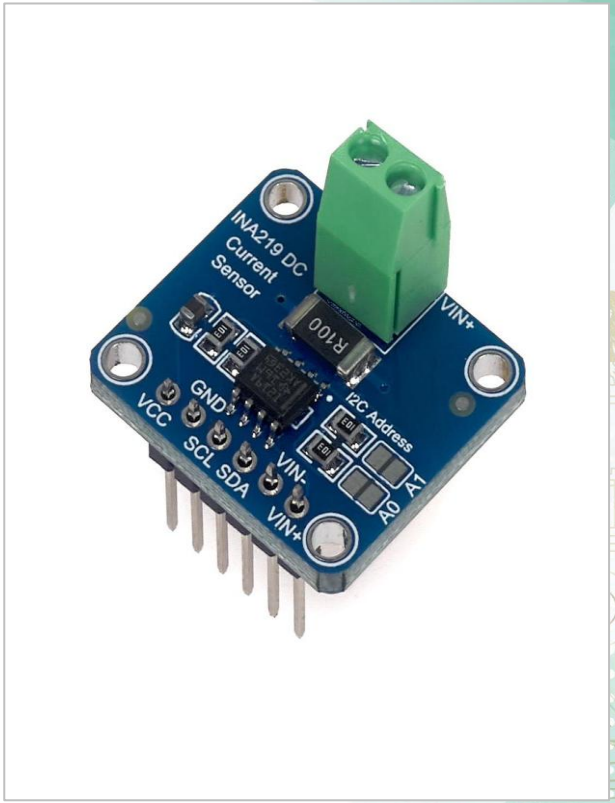
- Odometría: estimación de posición por integración incremental del movimiento de los actuadores, corregida con las lecturas del LDS.
- Arquitecturas distribuidas: separan la planificación de alto nivel (misiones) del control reactivo de bajo nivel (navegación).
- El ESP32 centraliza la lógica de enclavamiento, el registro de datos y el servicio de la interfaz: doble núcleo, Wi-Fi/Bluetooth integrado, periféricos ADC, I²C, SPI y PWM.



Selección justificada por bajo consumo, costo reducido, radio integrada y suficiencia de recursos para la tarea de supervisión.

Instrumentación: el circuito INA219

- La estación de carga es la única interfaz física accesible para caracterizar el proceso interno del AGV.
- Medición indirecta de corriente mediante resistencia de derivación (shunt): Vsh = I · Rsh.
- Configuración de lado alto: preserva la referencia de tierra de la carga y permite detectar fallas a tierra.
- Integra amplificador de derivación, amplificador de ganancia programable, ADC y bus I²C en un solo encapsulado.



Módulo INA219 — sensor de corriente/voltaje DC

Características técnicas del INA219

Parámetro	Especificación
Tensión de bus	0 a 26 V, canal independiente del diferencial
Ganancia programable	÷1, ÷2, ÷4, ÷8 → rangos de ±40 a ±320 mV
Resolución ADC	Configurable de 9 a 12 bits, con promediado
Exactitud	0,5 % máx. sobre el rango de temperatura (grado B)
Direccionamiento	16 direcciones I²C programables (A0, A1)
Alimentación	3 a 5,5 V, consumo máximo de 1 mA

I²C, red aislada y HMI embebida

- Bus I²C: enlace serie maestro–esclavo de dos hilos (SDA/SCL) entre el ESP32 y el INA219, dirección 0x40.
- El aislamiento de punto de acceso (AP Isolation) de la red institucional impide la comunicación directa entre clientes.
- Solución: subred inalámbrica propia (SoftAP servida por el ESP32), sin dependencia de servicios en la nube.
- HMI web: servidor asíncrono con WebSocket (/ws) para comunicación bidireccional en tiempo real, sin sondeo HTTP.
- Diseño bajo estándar visual ANSI/ISA-101.01-2015.

Energía, potencia y disponibilidad operativa

- Potencia instantánea: $p(t) = v(t) \cdot i(t)$.
- Energía del ciclo: $E = \int p(t)\, dt$, aproximada como suma de rectángulos: $E \approx \Sigma\, pk \cdot \Delta t$.
- Disponibilidad operativa: cociente entre el tiempo operativo real y el tiempo programado — factor central del sistema de supervisión.
- Variables derivadas registradas: duración de misión, energía por misión, ciclos de carga y ventanas de ocupación aprovechadas.

Enfoque y modalidad de la investigación

Cuantitativo

El desempeño se evalúa mediante variables numéricas — tensión, corriente, potencia, energía — adquiridas automáticamente.

Tecnológico

El propósito no es explicar un fenómeno, sino diseñar, implementar y validar un artefacto que resuelve el problema planteado.

De campo

El sistema se instala y valida en el entorno real del laboratorio, no en un banco de pruebas aislado.

Experimental

Se manipula la integración de la capa de supervisión y se observa su efecto sobre energía, duración y disponibilidad.

Bloques funcionales de la comunicación sistema

1

Adquisición eléctrica

INA219 sobre la estación de carga

→

2

Nodo de procesamiento

ESP32: enclavamiento, registro, servidor

→

3

Interfaz HMI

Web servida localmente, ISA-101

→

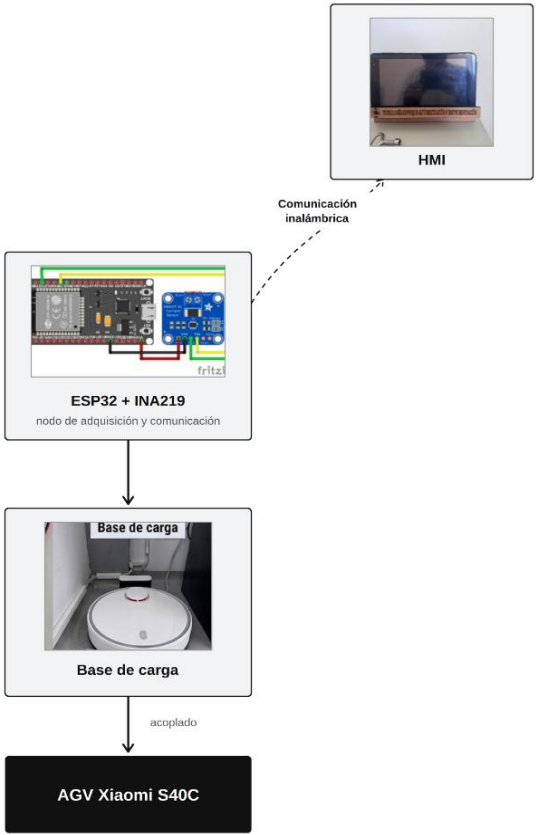
4

AGV comercial

Xiaomi S40C — equipo de campo cerrado

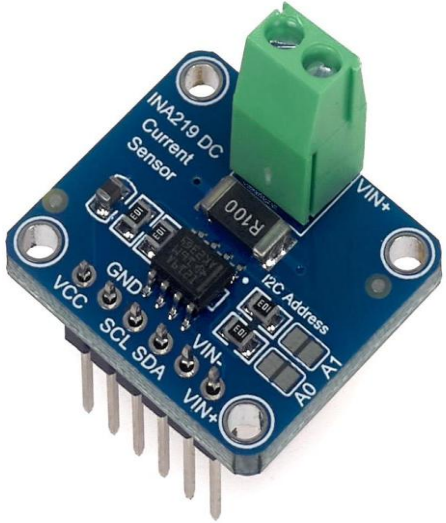
Los tres primeros bloques constituyen el aporte de diseño propio del proyecto; el cuarto corresponde a la plataforma comercial, integrada en su condición original de fábrica.

COMUNICACIÓN DEL SISTEMA



Bloque 1 — Adquisición y medición de parámetros

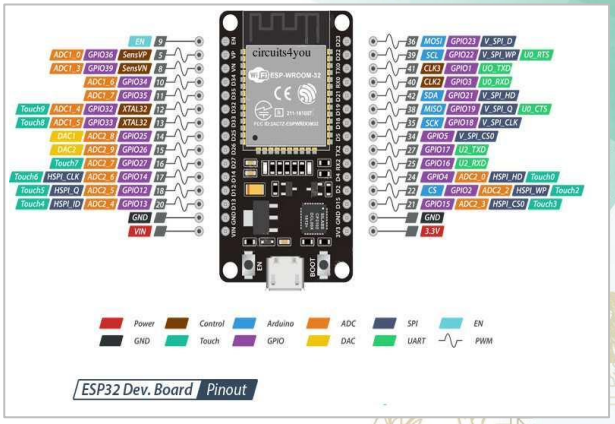
- INA219 direccionado por I²C en 0x40; SDA y SCL en GPIO21 y GPIO22 del ESP32.
- Ganancia programable en ±80 mV — cuadruplica la resolución frente al rango por defecto de ±320 mV.
- Shunt de 0,1 Ω en configuración de lado alto, entre la fuente y el vehículo.
- Promediado de 240 muestras consecutivas, reduciendo el ruido a costa del tiempo de conversión.
- Entrega tensión, corriente y potencia, base para el cálculo de energía por ciclo.



Módulo de adquisición INA219

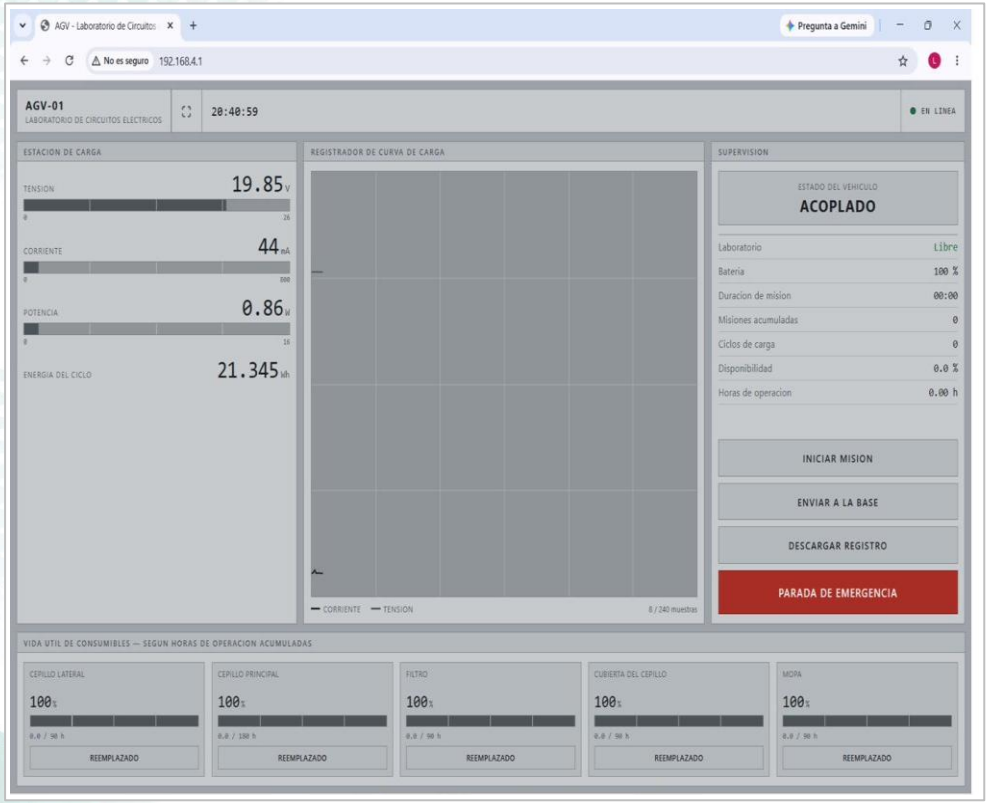
Bloque 2 — Nodo de procesamiento y comunicación

- El ESP32 centraliza la lógica de enclavamiento, el registro de datos y el servicio de la interfaz.
- Servidor asíncrono con WebSocket (AsyncWebSocket, ruta /ws) para transmisión en tiempo real.
- Registro histórico en LittleFS, archivo registro.csv separado por punto y coma.
- Modo punto de acceso (SoftAP) para evitar restricciones de la red institucional.
- Máquina de estados de seis pasos, con rutina programada los viernes a las 17:00 h.



Librerías: ESP32Async v3.12.0 + AsyncTCP v3.5.0 · INA219_WE v1.4.1 · NVS para reloj de software (sin NTP en red aislada).

Bloque 3 — Diseño de la Interfaz Humano-Máquina

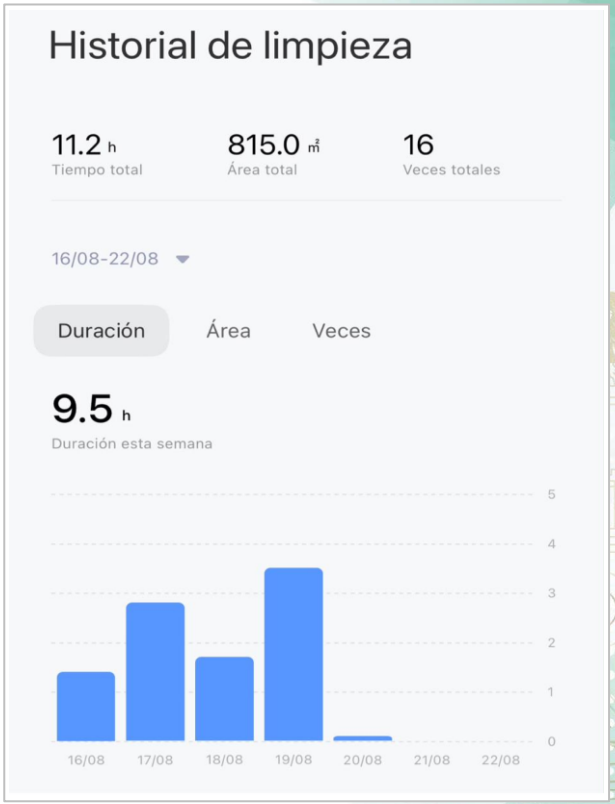


Panel principal del HMI: AGV-01, Laboratorio de Circuitos Eléctricos

- Tres columnas: Estación de carga, Registrador de curva de carga y Supervisión.
- Variables eléctricas con barra de proporción respecto al rango esperado.
- Gráfico en tiempo real de corriente y tensión sobre 240 muestras.
- Panel de estado del vehículo, disponibilidad, ciclos y misiones.
- Controles: iniciar misión, enviar a la base, descargar registro, parada de emergencia.

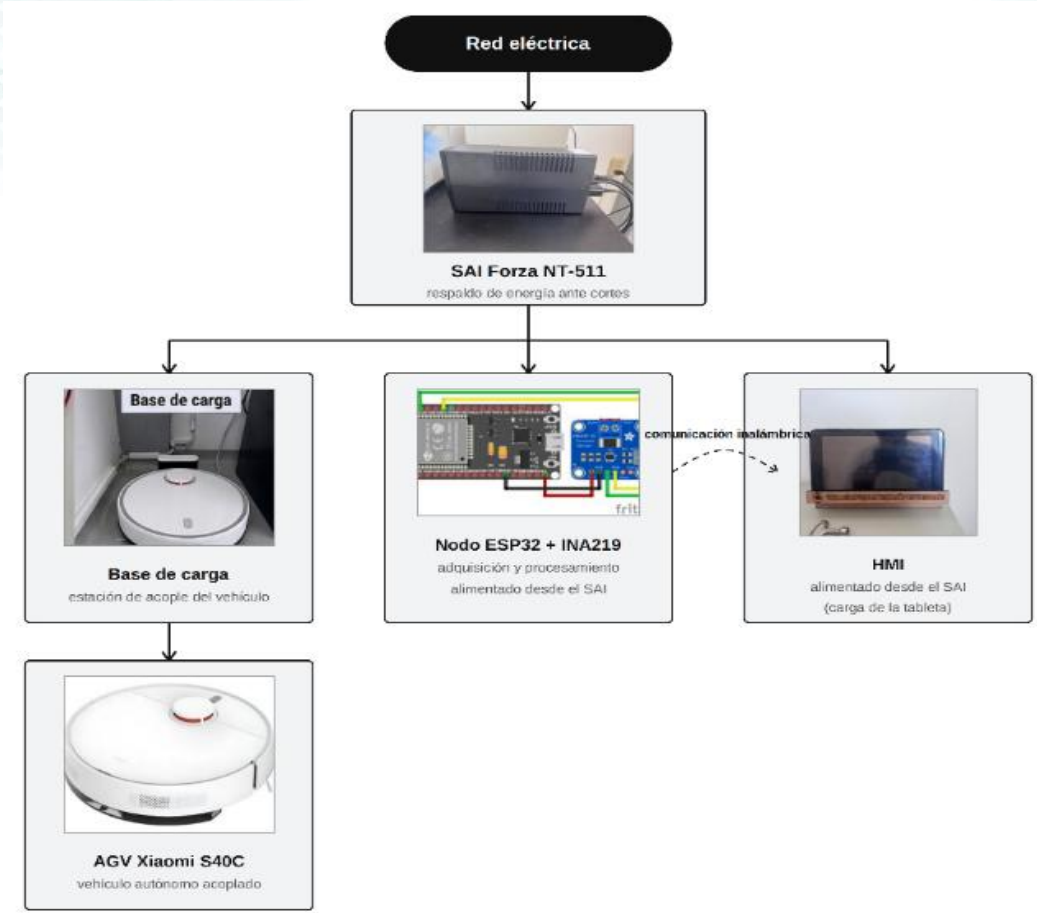
Bloque 4 — Plataforma AGV comercial: Xiaomi S40C

- Tratado como equipo de campo cerrado: no se modifica, interviene ni reprograma su firmware original.
- Ejecuta de forma autónoma la navegación, el mapeo LDS y la limpieza mediante su propia lógica de fábrica.
- Se configuran rutinas de limpieza profunda: succión Turbo, flujo de agua nivel 3, patrón en profundidad con doble pasada.
- Rutina programada los viernes a las 17:00 h, coordinada con la ventana de menor concurrencia.
- El sistema propio complementa la navegación: añade instrumentación, enclavamiento y trazabilidad.



Historial de limpieza — app del fabricante

Implementación fisica en Gabinete y respaldo de energía



Gabinete industrial y respaldo de energía

- La arquitectura física se dividió para proteger el hardware y la persistencia de datos ante perturbaciones eléctricas.
- Gabinete metálico industrial Beaucoup (30×30×20 cm) aloja la fuente de alimentación y el nodo de adquisición.
- UPS Forza NT-511 (500 VA) entra en operación automática ante cortes de energía.
- Previene la corrupción del archivo de registro en la memoria flash durante apagones.



Gabinete Beaucoup



Unidad de Respaldo de Energía

500 VA de nivel de protección: interruptor, supresor de sobretensión, protector y regulador de voltaje, respaldo de batería (~18 min de autonomía).

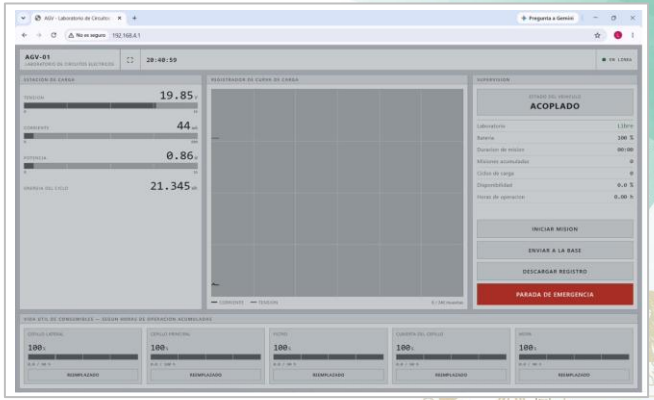
Calibración frente al instrumento de medición

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

- Tensión y corriente en carga activa: diferencias inferiores al 1,5 %, dentro del margen de exactitud del fabricante (0,5 %).
- La diferencia del 18,3 % en mantenimiento corresponde a una magnitud absoluta reducida (0,42 mA), cerca de la resolución del multímetro.
- Factor de corrección obtenido: 0,988 (aplicable a trabajos futuros; no se aplicó a los datos ya registrados).

Estadística descriptiva de la carga activa

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



Registrador de curva de carga en el HMI

– Registro de 143 muestras a intervalos de 1 minuto — 142 minutos totales (2 h 22 min).

– Tramo de carga activa: minuto 29 al 142 (79,7 % de la duración total, n = 114 muestras).

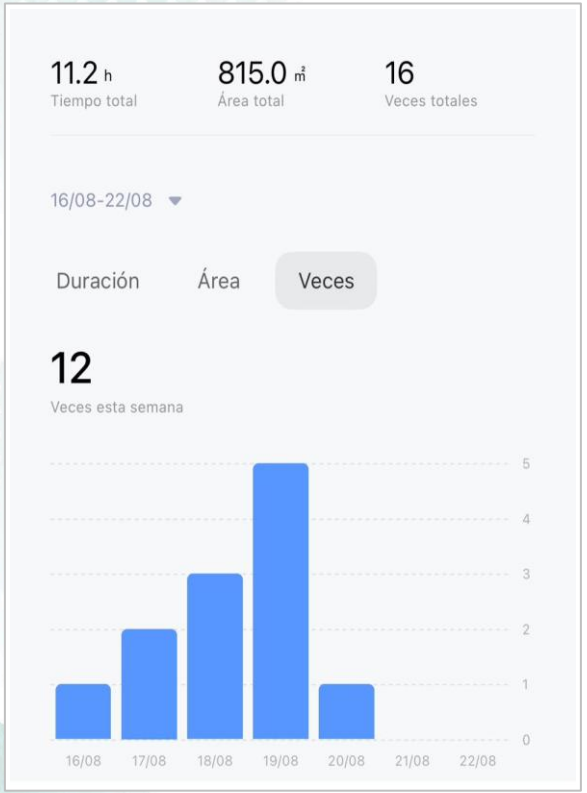
– Tensión prácticamente constante (σ = 0,002 V), impuesta por la fuente y no por la batería.

Energía consumida frente a la capacidad teórica

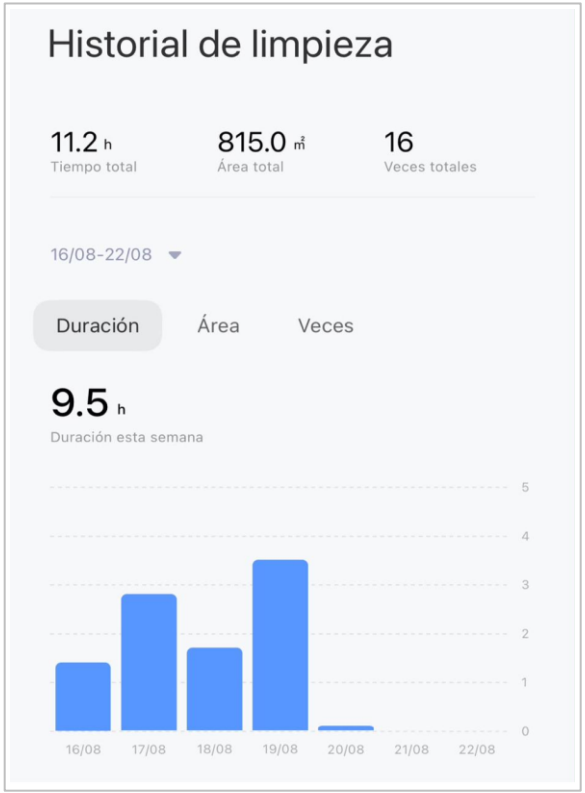
16,09 Wh	16,19 Wh	34,56 Wh	46,9 %
Energía en el tramo de carga activa	Energía total registrada	Capacidad teórica nominal	Proporción capturada del ciclo

- La energía se obtiene por integración numérica de la potencia instantánea ($E \approx \Sigma\, p_k \cdot \Delta t$), evaluada incrementalmente por el firmware.
- El 46,9 % es consistente: el ensayo no partió del 0 % absoluto, sino del umbral en que el propio robot retorna a la base.
- En los primeros 28 minutos, tensión constante con corriente residual casi nula (media 1,88 mA): el sistema distingue el acople físico del inicio real de la carga.

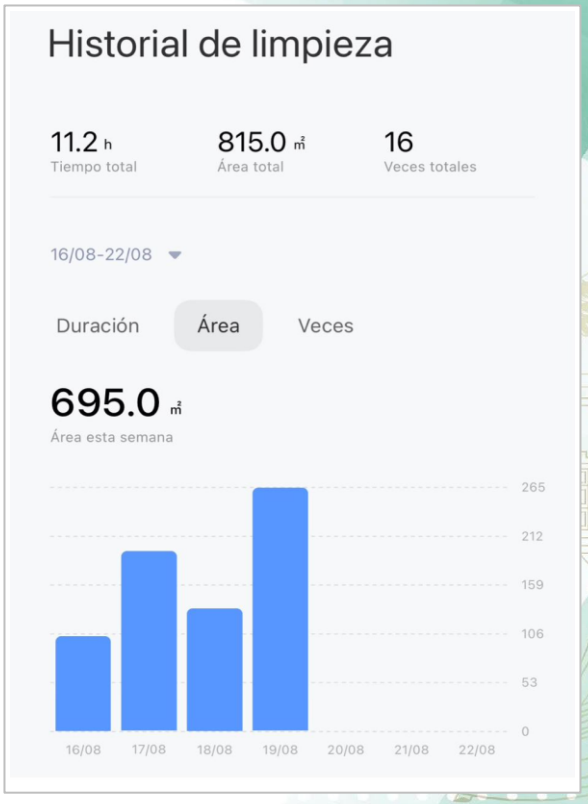
Registro operativo semanal (16/08 – 22/08)



Veces de limpieza por día

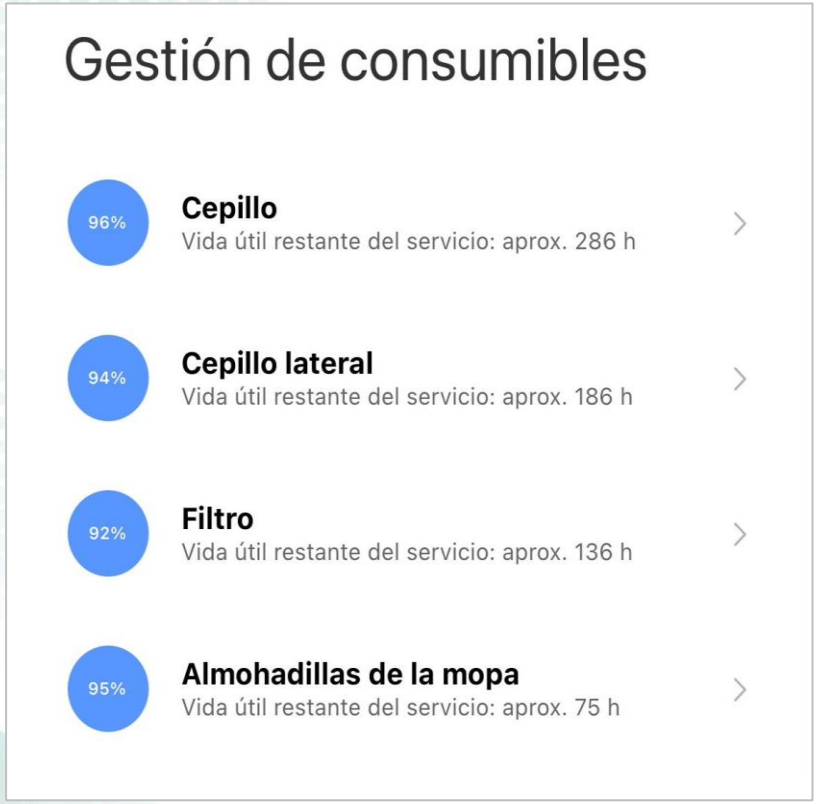


Duración de limpieza por día



Área cubierta por día

Gestión de consumibles y disponibilidad

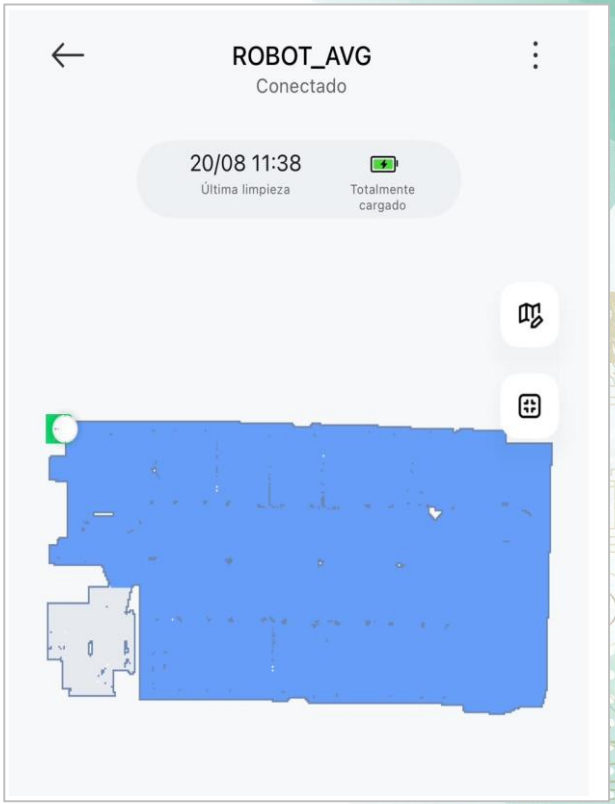


Vida útil restante de consumibles (app del fabricante)

- Total semanal: 16 misiones, 11,2 horas de operación acumuladas y 815,0 m² de superficie cubierta.
- Pico de actividad el 19/08: 5 misiones y 265 m² cubiertos, coincidente con la automatización de órdenes de limpieza.
- La HMI propia implementa un cálculo análogo, basado en horas acumuladas, para anticipar el reemplazo de cepillos, filtro y mopa.
- La disponibilidad operativa se sostiene sin intervención manual adicional una vez configuradas las misiones.

Configuración de la rutina de limpieza automatizada

- Recorrido inicial de reconocimiento: el LDS genera el mapa 2D completo, segmentado en Zona 1, Zona 2, Zona 3, Zona 4 y Oficina.
- Secuencia configurada: succión Turbo, flujo de agua nivel 3, patrón en profundidad con doble pasada.
- Ejecución automática programada los viernes a las 17:00 h, ventana de menor concurrencia.
- Al finalizar todas las zonas, la aplicación notifica el estado y el vehículo retorna de forma autónoma a la base.



Seccionamiento y mapeo por zonas del laboratorio

Acoplamiento final: tres niveles jerárquicos

Ejecución (piso)

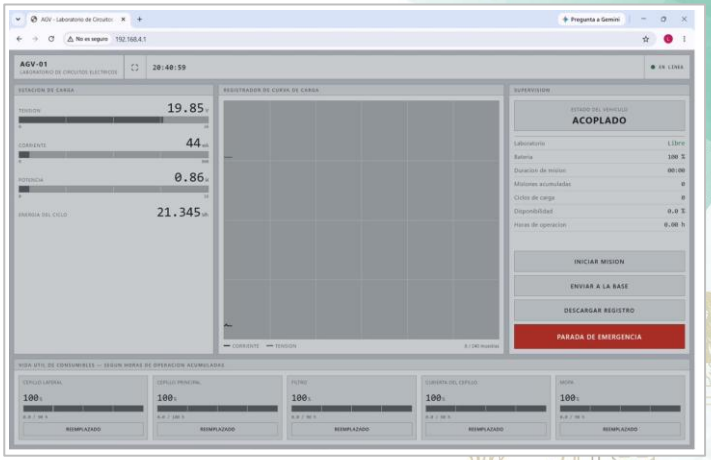
AGV Xiaomi S40C acoplado a su base de carga — navegación, mapeo y limpieza autónomos.

Respaldo energético

UPS Forza NT-511 — continuidad ante cortes de energía.

Control y supervisión

Gabinete Beaucoup: ESP32 + INA219; tablet como terminal del HMI.



HMI final — AGV-01



UPS de respaldo



Gabinete de control

Conclusiones

- Se implementó un sistema de limpieza autónoma supervisada que integra el AGV Xiaomi S40C con una capa externa de adquisición y supervisión sobre ESP32.
- El nodo INA219 + shunt de 0,1 Ω validó una exactitud alta: error relativo inferior al 1,2 % en carga activa frente al instrumento patrón.
- El sistema distingue autónomamente el acople físico del inicio real de la carga química.
- La semana de validación registró 16 misiones, 11,2 horas de operación y 815,0 m² cubiertos.
- La HMI web (WebSocket, tramas JSON cada segundo) reemplazó con éxito la dependencia de servicios en la nube de terceros.
- Se demostró que un equipo comercial cerrado puede convertirse en un activo monitoreado y auditable sin intervenir su firmware ni hardware original.

Recomendaciones

- Repetir el ensayo de recarga drenando la batería por completo, para validar el 100 % de la capacidad teórica (34,56 Wh).
- Incorporar en el firmware el factor de corrección de 0,988 obtenido en la calibración.
- Migrar el nodo de comunicaciones de modo SoftAP a modo estación (STA), habilitando el acceso concurrente de varios terminales.
- Evaluar un sensor de ocupación mmWave para añadir enclavamiento de seguridad por hardware.
- Ampliar el período de registro histórico en LittleFS para caracterizar el desgaste mecánico a largo plazo.
- Como línea futura: integrar una Mini PC con Home Assistant y MQTT para control bidireccional centralizado.
- Publicar el firmware y la estructura del HMI en repositorios institucionales, para replicar la arquitectura en otros laboratorios.

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Gracias por su atención