

**Diseño e Implementación de un Prototipo de Impulsor Eléctrico Solar para el Manejo de
Cerdos al Aire Libre**

Anderson Cardona Gómez

Asesor

Juan Alejandro Chica Garcia

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Ingeniería Electrónica

2026

Agradecimientos

La culminación de este proyecto no habría sido posible sin la intervención de personas e instituciones que aportaron a mi crecimiento:

A Dios, por iluminar mi mente en los momentos de dificultad.

A mi familia, especialmente a mi esposa e hijo, por su amor, paciencia y comprensión durante el desarrollo de esta carrera. A mis padres y hermanos, gracias por estar siempre presentes.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), por su modelo educativo que me permitió superar las barreras de tiempo y espacio para profesionalizarme.

Al director del proyecto, Juan Alejandro Chica Garcia, cuya orientación técnica y exigencia académica fueron determinantes para alcanzar los estándares de calidad de este trabajo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, pilar fundamental de mi existencia.

A mi esposa y mi hijo, luz de mis ojos y pilares de mi familia, por cada sacrificio compartido en este camino.

A mis padres y hermanos, por su amor y respaldo inquebrantable.

Resumen

El proyecto tiene como finalidad diseñar y validar un prototipo funcional de impulsor de cerca eléctrica autónomo. El sistema está alimentado con energía solar y es controlado por un microcontrolador ESP32 configurado como servidor web local. Su propósito es mejorar la seguridad y el bienestar animal en la porcicultura de pastoreo en una finca del departamento del Casanare. La iniciativa surge a partir de la problemática recurrente en sistemas de cercado tradicionales que ocasionan pérdidas económicas por escapes de cerdos y riesgos de lesiones debido al uso de alambres de púas.

Se plantea un desarrollo enmarcado en la metodología CDIO, lo que permite un enfoque disciplinar, académico y práctico en el área de la ingeniería electrónica. La solución final integra un sistema de telemetría de voltaje y control remoto a través de una red WiFi local generada por el propio microcontrolador SoftAP, complementado con una pantalla OLED para visualización en sitio. El proyecto se articula con la línea de investigación en Energía, Electrónica y Telecomunicaciones de la UNAD y con la macrolínea de Agrotecnología y Desarrollo Sostenible, al integrar tecnologías limpias, eficiencia energética y seguridad animal. Con esta propuesta se busca generar un aporte significativo tanto al ámbito productivo como al académico, ofreciendo una solución innovadora, viable y contextualizada para los pequeños y medianos productores porcinos en zonas rurales.

Palabras clave: Prototipo, cercas eléctricas, energía solar, bienestar animal, ingeniería electrónica, ESP32, servidor web local.

Abstract

This project aims to design and validate a functional prototype of an autonomous electric fence drive. The system is powered by solar energy and controlled by an ESP32 microcontroller configured as a local web server. Its purpose is to improve animal safety and welfare in grazing pig farming in the department of Casanare. The initiative arose from the recurring problems in traditional fencing systems that cause economic losses due to pig escapes and the risk of injury due to the use of barbed wire.

A development is proposed within the framework of the CDIO methodology, which allows a disciplinary, academic, and practical approach in the field of electronic engineering. The final solution integrates a voltage telemetry system and remote control through a local Wi-Fi network generated by the SoftAP microcontroller, complemented by an OLED screen for on-site viewing. The project is articulated with the line of research in Energy, Electronics, and Telecommunications of the UNAD and with the macroline of Agrotechnology and Sustainable Development by integrating clean technologies, energy efficiency, and animal safety. This proposal seeks to make a significant contribution to both the productive and academic fields, offering an innovative, viable, and contextualized solution for small- and medium-sized pig producers in rural areas.

Keywords: Prototype, electric fences, solar energy, animal welfare, electronic engineering, ESP32, local web server.

Índice General

Introducción	15
Planteamiento del Problema	16
Contexto Geográfico y Operativo	16
Diagnóstico de la Infraestructura Actual	17
Cuantificación del Impacto Económico	18
Análisis de Causas	18
Carencia de Diseño Especializado	19
Dependencia de la Red Eléctrica	19
Ausencia de Telemetría	19
Formulación de la Solución	19
Justificación	20
Objetivos	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos	22
Marcos de Referencia	23
Estado del Arte	23
Marco Teórico	24
Conversión Fotovoltaica y Balance Energético	24
Principios de Electrónica de Potencia (Convertidor Flyback)	25
Acondicionamiento de Señal y Teoría de Control Embebido	26

Teoría del Error en Instrumentación	26
Marco Conceptual	27
Microcontrolador ESP32 y Arquitectura de Borde	27
Telemetría de Voltaje	27
SoftAP (Punto de Acceso por Software)	27
Impulsor Eléctrico de Baja Impedancia	27
Marco Legal	28
Normativa de Seguridad Eléctrica (IEC 60335-2-76)	28
Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIIE)	28
Normativa de Bienestar Animal	28
Metodología Basada en CDIO	29
Fase 1: Concebir	29
Fase 2: Diseñar	29
Fase 3: Implementar	30
Fase 4: Operar	30
Diseño y Arquitectura del Sistema	32
Caracterización de Requerimientos Técnicos	33
Requerimientos de la Etapa de Potencia	34
Diseño del Sistema de Telemetría e Instrumentación	34
Análisis y Diseño Energético	36
Arquitectura del Control y Firmware	38
Lógica de estados y transiciones	38
Diseño de Comunicaciones: Arquitectura SoftAP	41

Criterios de Seguridad y Protecciones	41
Implementación del Prototipo y Desarrollo de Firmware	43
Arquitectura de Hardware Implementada	43
Implementación del Sistema de Telemetría	45
Cálculo y Justificación del Divisor Resistivo	45
Calibración por Software	46
Implementación del Sistema de Conmutación y Potencia	48
Desarrollo del Firmware y Lógica de Control	50
Validación Preliminar de la Lógica de Control (Simulación)	50
Algoritmo de Adquisición de Datos y Procesamiento Digital de Señales	51
Gestión de Entradas y Lógica de Seguridad	52
Implementación del Servidor Web Asíncrono	54
Diseño de la Interfaz Web Embebida	56
Estética y Ergonomía Visual	57
Algoritmo de Protección por Bajo Voltaje (LVD)	58
Integración Mecánica y Montaje Final	60
Selección del Envoltorio (Gabinete)	60
Gestión de Cableado y Hermeticidad	61
Validación y Pruebas	63
Validación del Sistema de Medición	63
Validación del Consumo Energético	65
Análisis de Resultados	66
Evidencia Experimental	67

	9
Validación de la Conexión Inalámbrica	68
Metodología Experimental	69
Análisis de Cobertura	70
Validación de la Conmutación del Impulsor	71
Análisis Temporal de Activación y Desactivación	71
Prueba de Estrés e Inmunidad al Ruido	73
Caracterización Oscilográfica de la Señal	73
Validación del Comportamiento en Bajo Voltaje	74
Lógica de Protección y Recuperación Segura	75
Validación Integral del Sistema	77
Matriz de Cumplimiento de Objetivos	77
Discusión de Resultados	78
Resultados y Análisis	80
Validación del sistema de medición y calibración del ADC	80
Caracterización de la Conmutación de Potencia	81
Análisis de Consumo y Autonomía Energética	82
Desempeño de la Telemetría y Red Inalámbrica	82
Estabilidad del Servidor Web	83
Cobertura WiFi	83
Discusión Final de Resultados	83
Conclusiones	84
Recomendaciones	86
Optimización del Enlace de Comunicaciones	86

Industrialización del Hardware	86
Gestión Energética Avanzada	87
Referencias Bibliográficas	88

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Consumo de Corriente Caracterizado del Sistema ($V_{bat} = 12V$)</i>	36
Tabla 2	<i>Pruebas de Validación del Sistema de Medición (Placa Soldada)</i>	64
Tabla 3	<i>Mediciones de Consumo de Potencia a 12 V</i>	66
Tabla 4	<i>Pruebas de Desempeño del Enlace Inalámbrico en Espacio Abierto</i>	70
Tabla 5	<i>Resultados de la Prueba de Estrés de Conmutación</i>	73
Tabla 6	<i>Pruebas de Validación del Sistema de Protección</i>	76
Tabla 7	<i>Matriz de Cumplimiento de Objetivos y Validación Técnica</i>	78
Tabla 8	<i>Comparativa de Precisión: Multímetro vs Telemetría ESP32</i>	81

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Delimitación de la Zona de Pastoreo en la Granja Villa Rosa, Casanare</i>	17
Figura 2	<i>Diagrama de Bloques de la Arquitectura Integral del Sistema</i>	32
Figura 3	<i>Comportamiento Mensual del Brillo Solar en Municipios de Casanare</i>	33
Figura 4	<i>Esquema del Divisor de Voltaje Implementado para la Medición de la Batería</i>	35
Figura 5	<i>Simulación del Comportamiento del Estado de Carga (SOC) bajo Escenarios Críticos</i>	37
Figura 6	<i>Diagrama de la Máquina de Estados Finitos (FSM) del Sistema</i>	39
Figura 7	<i>Diagrama de Flujo del Algoritmo Principal del Firmware</i>	40
Figura 8	<i>Diagrama de Arquitectura de Hardware Implementada</i>	44
Figura 9	<i>Diagrama de Flujo de la Subrutina de Adquisición y Calibración de Voltaje</i>	47
Figura 10	<i>Curva de Linealidad y Calibración del Sistema de Telemetría</i>	48
Figura 11	<i>Implementación Física del Circuito de Control y Potencia sobre PCB</i>	49
Figura 12	<i>Validación de la Lógica de Conmutación en Entorno Simulado</i>	51
Figura 13	<i>Diagrama de Flujo de la Subrutina de Gestión de Interfaz Física</i>	53
Figura 14	<i>Diagrama de Flujo para la Gestión de Peticiones Web Asíncronas</i>	55
Figura 15	<i>Análisis Cuantitativo del Tráfico de Red: HTML vs JSON</i>	56
Figura 16	<i>Diagrama de Flujo de la Rutina de Protección LVD</i>	59
Figura 17	<i>Integración Final del Prototipo en Gabinete IP65</i>	62
Figura 18	<i>Linealidad del Sensor y Error Porcentual</i>	65
Figura 19	<i>Perfil de Consumo Energético del Prototipo</i>	67

Figura 20	<i>Lecturas de Corriente en Fuente de Laboratorio</i>	68
Figura 21	<i>Esquema de Zonas de Cobertura Inalámbrica</i>	71
Figura 22	<i>Diagrama de Tiempos de la Secuencia de Conmutación</i>	72
Figura 23	<i>Captura Oscilográfica del Pulso de Activación</i>	74
Figura 24	<i>Histéresis de Protección y Recuperación Segura</i>	77
Figura 25	<i>Interfaz Web de Control Principal</i>	105

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Código Fuente del Firmware (ESP32)</i>	91
Apéndice B <i>Manual de Usuario y Puesta en Marcha</i>	104

Introducción

El desarrollo de sistemas electrónicos aplicados ha adquirido una relevancia creciente en contextos rurales y productivos, donde la disponibilidad de infraestructura eléctrica es limitada y se requiere un alto grado de autonomía energética (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2019). En este escenario, las cercas eléctricas representan una solución ampliamente utilizada para el control perimetral y la protección de áreas agrícolas y pecuarias, alineándose con las normativas de manejo animal (Ávila Reyes & Nieto, 2011).

Sin embargo, muchos de estos sistemas presentan limitaciones en términos de control, monitoreo y protección de la fuente de energía, lo que puede derivar en fallos operativos y deterioro prematuro de las baterías (Castellano Arbito & Vargas Vizcaíno, 2021). Este proyecto surge como respuesta a dicha problemática, proponiendo un sistema electrónico que integra control local y remoto, monitoreo continuo del estado de la batería y mecanismos automáticos de protección por bajo voltaje.

El trabajo se enmarca dentro de la ingeniería electrónica aplicada, combinando diseño de hardware, desarrollo de firmware y validación experimental, con el objetivo de ofrecer una solución funcional, confiable y adaptable a entornos reales.

Planteamiento del Problema

El sector agropecuario colombiano enfrenta desafíos estructurales relacionados con la tecnificación de los procesos productivos. En el caso particular de la cría de porcinos en sistemas de pastoreo, uno de los retos principales es garantizar la seguridad física y el bienestar de los animales, salvaguardando simultáneamente la inversión económica del productor frente a pérdidas por fugas o mortalidad.

Contexto Geográfico y Operativo

La investigación se sitúa en una unidad productiva ubicada en el departamento del Casanare, específicamente en la Granja Villa Rosa. Esta finca se dedica a la crianza semi-intensiva de un hato aproximado de 60 cerdos en etapas de levante y ceba. La ubicación geográfica presenta condiciones climáticas tropicales, con periodos marcados de lluvia y sequía que afectan la integridad de la infraestructura física.

En este entorno, se ha evidenciado la necesidad crítica de contar con un sistema de cercado que sea confiable, eficiente y autónomo. La delimitación actual de los espacios de pastoreo se realiza mediante métodos convencionales que no responden a las necesidades etológicas de los porcinos ni a las condiciones de suministro energético de la zona.

Figura 1

Delimitación de la Zona de Pastoreo en la Granja Villa Rosa, Casanare



Nota. Imagen satelital que evidencia la extensión del terreno y la necesidad de control perimetral (Google, 2020).

Diagnóstico de la Infraestructura Actual

Actualmente, los métodos más comunes implementados en el predio para la delimitación de los potreros son las cercas de alambre de púas y, en menor medida, cercas eléctricas convencionales dependientes de la red comercial. Estas tecnologías presentan limitaciones severas:

- **Seguridad Animal:** Las cercas de púas representan un riesgo físico directo. Los cerdos, al intentar rascar su lomo, sufren laceraciones en la piel que derivan en infecciones, depreciando el valor comercial de la canal y contraviniendo los manuales de Buenas Prácticas Pecuarias (Ávila Reyes & Nieto, 2011).
- **Autonomía Energética:** Los impulsores eléctricos convencionales instalados en la zona dependen del fluido eléctrico de la red. Dado que el servicio de energía en zonas rurales del Casanare presenta intermitencias y fluctuaciones de voltaje (Casanare Noticias, 2024), los

sistemas quedan inoperativos durante apagones, dejando al hato vulnerable.

- **Sostenibilidad:** El mantenimiento correctivo frecuente de los postes y alambres dañados por la presión de los animales incrementa los costos operativos y la huella de materiales del proyecto.

Cuantificación del Impacto Económico

El problema central identificado no es solo técnico, sino financiero. Existe un riesgo latente para la seguridad productiva derivado del uso de sistemas de cercado improvisados. La evidencia empírica en el hato indica que los cerdos tienden a probar constantemente los límites físicos del confinamiento.

Se estima que, bajo las condiciones actuales, se registran entre 4 y 5 fugas exitosas de animales por semestre. Esto representa un impacto económico considerable si se analiza el valor de mercado actual:

“El valor de un cerdo adulto en el mercado oscila entre \$900.000 y \$1.600.000 COP, dependiendo del peso y la genética.”

Proyectando estas cifras, las pérdidas directas por semovientes extraviados pueden ascender a varios millones de pesos anuales, lo cual desestabiliza el flujo de caja de un sistema de producción familiar de mediana escala. Adicionalmente, existen costos ocultos asociados al deterioro de la calidad del producto por lesiones llamados decomisos en planta de beneficio y los gastos laborales y de materiales requeridos para el reacondicionamiento constante de las cercas vulneradas.

Análisis de Causas

La recurrencia del problema se intensifica durante las etapas de crecimiento, apareamiento y engorde, momentos en los cuales los animales requieren mayores espacios de movilidad y ejercen mayor presión física sobre las barreras. Las causas raíz de esta problemática se categorizan en tres aspectos fundamentales:

Carencia de Diseño Especializado

Existe una limitada disponibilidad de sistemas de cercado diseñados específicamente para la etología porcina. Los productores se ven obligados a adaptar tecnologías pensadas para ganado bovino, las cuales no consideran la altura, la fuerza de empuje y la resistencia eléctrica de la piel del cerdo.

Dependencia de la Red Eléctrica

La falta de autonomía energética de los impulsores comerciales reduce su confiabilidad. En el contexto regional, esta dependencia es crítica debido a las recurrentes fallas en el servicio de energía reportadas en municipios del Casanare, las cuales dejan inoperativos los equipos conectados a la red y vulneran la seguridad del hato (Casanare Noticias, 2024). En un entorno donde el acceso a energía eléctrica es intermitente, la ausencia de respaldo garantiza ventanas de tiempo donde la cerca no está energizada, oportunidad que los animales aprovechan para escapar.

Ausencia de Telemetría

La inexistencia de mecanismos de control y monitoreo remoto impide al productor verificar el funcionamiento del sistema en tiempo real. Actualmente, la única forma de detectar una falla es mediante inspección visual física o, lamentablemente, después de que ha ocurrido una fuga.

Formulación de la Solución

Ante este panorama, surge la necesidad imperiosa de diseñar y validar un prototipo de impulsor de cerca eléctrica autónomo. La solución tecnológica debe integrar una fuente de alimentación basada en energía solar fotovoltaica para garantizar la operación *off-grid* (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2019) y un sistema de control inteligente basado en el microcontrolador ESP32.

Esta aproximación busca mejorar la seguridad animal y reducir las pérdidas económicas, alineándose con las líneas de investigación de la UNAD en tecnologías limpias y automatización. El desarrollo se plantea inicialmente a nivel de validación en banco, lo que permitirá comprobar la viabilidad técnica de la telemetría y la gestión energética antes de su despliegue en campo.

Justificación

El diseño e implementación del prototipo de impulsor de cerca eléctrica autónomo se justifica plenamente por el valor técnico que aporta a la porcicultura al pastoreo y al desarrollo disciplinar. La propuesta define el para qué mediante el impacto dimensional que se detalla a continuación.

Este proyecto está diseñado para mitigar las pérdidas económicas directas que afrontan los medianos productores de la granja Villa rosa en el departamento del Casanare. La solución provee un sistema de contención confiable que opera sin dependencia de la red eléctrica convencional. Un elemento crucial para asegurar la estabilidad de la granja al reducir significativamente los escapes de animales, optimiza el uso de pastizales y minimiza los costos de supervisión manual. Además, el sistema contribuye al mejoramiento del bienestar animal al ofrecer una alternativa segura y efectiva al alambre de púas, alineándose con las Buenas Prácticas Pecuarias Ávila Reyes y Nieto, 2011.

El desarrollo del prototipo tiene como finalidad validar la aplicación de la Ingeniería Electrónica en la creación de soluciones de Hardware de Borde robustas para entornos rurales. Su implementación práctica sirve para demostrar la factibilidad de integrar áreas complejas como la Electrónica de Potencia, en el diseño del circuito flyback del impulsor Coilcraft, 2021, con los Sistemas Embebidos, mediante el control telemétrico del Sistema de Bajo Costo SBC. Esto fortalece las competencias profesionales para el diseño de sistemas ciberfísicos autónomos que procesan la información del voltaje en el sitio y permiten la actuación remota a través de una red local.

El proyecto tiene como objetivo promover la sostenibilidad energética en el sector agropecuario. Al depender exclusivamente de la fuente fotovoltaica Agencia Internacional de Energías Renovables, 2019, el sistema sirve para reducir la huella de carbono y elimina la necesidad de fuentes de energía fósil para la contención animal. Socialmente, el dispositivo está diseñado para incrementar la seguridad alimentaria de la comunidad rural al hacer más eficiente la producción

porcina, transformando una tecnología convencional en una herramienta de la agricultura inteligente Miranda et al., 2019. En última instancia, el trabajo adquiere un valor formativo para transformar el conocimiento teórico en una solución tangible y replicable que impacte positivamente el desarrollo agropecuario sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un prototipo funcional de impulsor de cerca eléctrica autónomo alimentado con energía solar, orientado al mejoramiento de la seguridad y el bienestar animal en la porcicultura de pastoreo en la finca ubicada en el departamento del Casanare.

Objetivos Específicos

Caracterizar los requerimientos técnicos, eléctricos y funcionales del impulsor de cerca eléctrica, con la finalidad de establecer los parámetros de seguridad, autonomía y operación necesarios para el diseño.

Diseñar la arquitectura electrónica, energética y de comunicaciones del prototipo, integrando un sistema de bajo costo, el sistema fotovoltaico y el modulo de conmutación, que garantice el funcionamiento autónomo y la telemetría local.

Evaluar el desempeño del prototipo funcional en banco de pruebas, determinando variables críticas como el voltaje, consumo, estabilidad del pulso y autonomía energética para comprobar su viabilidad en campo.

Marcos de Referencia

El desarrollo del prototipo se sustenta en una revisión exhaustiva del estado actual de la tecnología, las teorías físicas que rigen la electrónica de potencia y la normativa legal vigente. Se desglosan a continuación los referentes que soportan científica y técnicamente a la solución propuesta.

Estado del Arte

La revisión de la literatura reciente evidencia una transición tecnológica en el sector agropecuario, pasando de la mecanización simple a la digitalización de procesos, paradigma conocido como *Agri-Food 4.0*.

En el ámbito internacional, la integración de sensores y sistemas de procesamiento en la agricultura ha demostrado ser fundamental para la optimización de recursos. Miranda et al., 2019 establecen que el uso de arquitecturas IoT permite la toma de decisiones basada en datos reales, validando el uso de microcontroladores de bajo costo como el ESP32 para aplicaciones de monitoreo en sitio, superando las barreras de costo de los PLC industriales tradicionales (Miranda et al., 2019).

A nivel regional, el uso de energía solar para la energización de cercas eléctricas ha sido abordado como una solución a la falta de cobertura de la red convencional. Castellano Arbito y Vargas Vizcaíno, 2021 documentaron el diseño e implementación de cercos fotovoltaicos para ganado en zonas de topografía compleja. Su investigación resalta la importancia crítica del dimensionamiento del banco de baterías para asegurar la continuidad del servicio, concluyendo que los sistemas autónomos reducen los costos operativos a largo plazo frente a la extensión de redes eléctricas cableadas (Castellano Arbito & Vargas Vizcaíno, 2021).

Sin embargo, se identifica un vacío en el desarrollo de sistemas híbridos que combinen la autonomía solar con la telemetría local (*Edge Computing*) sin depender de la nube, nicho que este proyecto busca cubrir para atender las zonas sin cobertura celular del Casanare.

Marco Teórico

La fundamentación ingenieril del proyecto se basa en la convergencia de tres disciplinas: la conversión de energía fotovoltaica, la electrónica de potencia y el procesamiento de señales en sistemas embebidos. A continuación, se detallan los principios físicos y matemáticos que rigen cada etapa del diseño.

Conversión Fotovoltaica y Balance Energético

La autonomía del sistema se fundamenta en el efecto fotovoltaico, mediante el cual la radiación solar se convierte en corriente continua. Según (Duffie & Beckman, 2013), el diseño de sistemas aislados (*Off-Grid*) requiere un balance energético positivo donde la generación diaria (E_{gen}) supere al consumo de la carga ($E_{consumo}$) y las pérdidas del sistema.

Para modelar este comportamiento y dimensionar correctamente el banco de baterías evitando la sulfatación de las placas de plomo-ácido por descargas profundas, el Estado de Carga SOC, por sus siglas en inglés se define mediante la integral de la corriente en el tiempo:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t [I_{pv}(\tau) - I_{load}(\tau)] d\tau \quad (1)$$

Donde $SOC(t)$: Estado de carga de la batería en el instante t (%), $SOC(t_0)$ es el estado de carga inicial, C_n es la capacidad nominal de la batería (Ah), $I_{pv}(\tau)$: Corriente generada por el sistema fotovoltaico (A), $I_{load}(\tau)$: Corriente consumida por la carga (ESP32 + Impulsor) (A) y τ : Variable de integración temporal.

Para resolver este balance, el consumo dinámico del sistema (I_{load}) se modela como la sumatoria de las etapas funcionales:

$$I_{load} = I_{lógica} + I_{potencia} + I_{pérdidas} \quad (2)$$

Donde, $I_{lógica}$: Consumo promedio del módulo ESP32 y sensores, considerando los picos de transmisión WiFi y el modo de operación continua, $I_{potencia}$: Consumo del circuito oscilador y el transformador elevador durante la generación del pulso de alto voltaje y $I_{pérdidas}$: Corriente

disipada por la ineficiencia del regulador DC-DC y el autoconsumo del controlador de carga.

Con base en esto, el consumo de potencia global en corriente directa obedece a la relación fundamental:

$$P = V \times I \quad (3)$$

Este parámetro es crítico para establecer el presupuesto energético y el algoritmo de protección por bajo voltaje en el firmware.

Principios de Electrónica de Potencia (Convertidor Flyback)

La generación del alto voltaje necesario para la carga eléctrica se basa en la topología de convertidor Flyback. Este circuito aprovecha la propiedad inductiva del transformador de elevación para almacenar energía en forma de campo magnético durante el tiempo de encendido del transistor de conmutación (t_{on}). La energía almacenada en el núcleo del inductor (E_L) está dada por:

$$E_L = \frac{1}{2} L I_p^2 \quad (4)$$

Donde L es la inductancia del primario e I_p es la corriente pico alcanzada.

Al interrumpirse bruscamente el circuito durante el tiempo de apagado (t_{off}), esta energía se libera. La generación de la alta tensión de salida (V_{out}) se fundamenta en la ley de inducción de Faraday, siendo matemáticamente proporcional a la tasa de variación de la corriente en el tiempo:

$$V_{out} = L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Aunque el microcontrolador ESP32 posee la capacidad para gestionar señales PWM de alta frecuencia, se implementó una arquitectura desacoplada. El ESP32 gestiona exclusivamente la supervisión y habilitación general, mientras que la generación de la señal de disparo precisa hacia la compuerta (*gate*) del tiristor TYN1025 recae sobre un módulo excitador dedicado. Esta separación galvánica asegura la integridad del control digital frente al ruido electromagnético extremo generado por el elevado $\frac{di}{dt}$ de la Ecuación 5, garantizando la seguridad operativa (Mohan et al., 2003).

Acondicionamiento de Señal y Teoría de Control Embebido

El sistema opera bajo un esquema de control en lazo abierto con supervisión de estado, donde el microcontrolador ejecuta un ciclo de lectura-procesamiento-actuación.

Para adquirir la variable de estado principal (voltaje de la batería), se requiere adaptar los niveles de 12V a la lógica de 3,3V del ADC. Esto se logra mediante un divisor de tensión resistivo, cuya función de transferencia está dada por:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (6)$$

Donde V_{in} es el voltaje de la fuente a medir, V_{out} es el voltaje atenuado, R_1 es la resistencia de entrada (High-Side) y R_2 es la resistencia a tierra (Low-Side).

Una vez atenuada la señal, se aplica el teorema de muestreo de Nyquist para la digitalización. Debido a que el circuito Flyback inyecta ruido de alta frecuencia en la línea de alimentación, se implementa un sobremuestreo (*oversampling*) acompañado de un filtro de media móvil discreto para mejorar la relación señal-ruido (SNR) de la telemetría. Este filtro pasabajos digital se modela como:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (7)$$

Donde $y[n]$ es la lectura estabilizada y procesada por el firmware, $x[n]$ es la muestra actual del ADC, y N es la ventana de muestreo definida empíricamente.

Teoría del Error en Instrumentación

Finalmente, para validar la viabilidad del instrumento de telemetría construido frente a equipos de medición certificados, se emplean los indicadores de desviación estándar en metrología. El error absoluto (E_A) y el error relativo porcentual ($\%E$) determinan la precisión de lectura:

$$E_A = |V_R - V_L| \quad (8)$$

$$\%E = \left| \frac{V_R - V_L}{V_R} \right| \times 100 \quad (9)$$

Donde V_R representa el valor real del patrón de prueba y V_L el valor interpretado por el microcontrolador. Para validar la instrumentación frente a un patrón de referencia, se emplean indicadores estadísticos de desviación. El error absoluto (E_A) y el error relativo porcentual ($\%E$) determinan la precisión de un sistema de lectura:

Marco Conceptual

Para lograr la correcta interpretación del alcance técnico del presente proyecto, se definen los siguientes conceptos operativos:

Microcontrolador ESP32 y Arquitectura de Borde

El ESP32 es un *System-on-Chip* (SoC) de 32 bits que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth. A diferencia de microcontroladores simples, este dispositivo permite implementar una arquitectura de computación en el borde (*Edge Computing*). En este proyecto, el ESP32 no actúa como un simple puente de datos, sino que procesa localmente la señal analógica mediante su ADC de 12 bits y gestiona un servidor web asíncrono independiente de la nube (*ESP32 Series Datasheet*, 2024).

Telemetría de Voltaje

Se define como la medición automatizada y transmisión de datos desde fuentes inalcanzables a un sistema de monitoreo. Para la medición de baterías de 12 V DC con lógica de 3.3 V, se emplea un divisor de tensión resistivo, un circuito lineal que escala la tensión de entrada a un rango seguro para el convertidor analógico-digital.

SoftAP (Punto de Acceso por Software)

Modo de operación de red inalámbrica donde el dispositivo (ESP32) actúa como el enrutador central, creando su propia red Wi-Fi sin necesidad de hardware externo ni conexión a internet. Esto permite que los dispositivos móviles se conecten directamente al impulsor para tareas de configuración y monitoreo local.

Impulsor Eléctrico de Baja Impedancia

Dispositivo diseñado para emitir pulsos de alto voltaje (≥ 5 kV) y corta duración (<1 ms). Su principio no es generar daño tisular por efecto Joule, sino un impacto sensorial aversivo que

condiciona el comportamiento del animal.

Marco Legal

El diseño e implementación del prototipo se rige por la normativa nacional e internacional vigente en materia de seguridad eléctrica y bienestar animal.

Normativa de Seguridad Eléctrica (IEC 60335-2-76)

El diseño adopta los lineamientos de la norma internacional **IEC 60335-2-76**, la cual establece los Requisitos particulares para energizadores de cercas eléctricas". Esta norma define los límites de seguridad obligatorios:

- La energía máxima de descarga no debe superar los 5 Joules en condiciones estándar.
- El intervalo entre pulsos consecutivos debe ser de al menos 1 segundo.
- Se exige aislamiento galvánico entre la fuente y la salida de alto voltaje.

El cumplimiento de estos parámetros garantiza que el impacto sea disuasorio pero no letal para humanos o animales (International Electrotechnical Commission, 2018).

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)

En Colombia, el RETIE establece los requisitos para garantizar la seguridad de las personas y la preservación del medio ambiente en instalaciones eléctricas. Aunque el prototipo opera a baja tensión (12V) en su etapa de control, la etapa de salida de alto voltaje debe cumplir con los criterios de señalización y distancias de seguridad estipulados en el reglamento para cercas eléctricas en zonas rurales.(Ministerio de Minas y Energía, 2024)

Normativa de Bienestar Animal

El proyecto se alinea con la **Ley 1774 de 2016**, por la cual se establecen las disposiciones y sanciones contra el maltrato animal en Colombia. El uso de cercas eléctricas inteligentes en lugar de alambre de púas atiende al principio de "Libre de dolor y lesiones", ya que la descarga controlada evita las heridas físicas profundas y desgarros musculares asociados a los cercos tradicionales, promoviendo las Buenas Prácticas Ganaderas (BPG) certificadas por el ICA (Ávila Reyes & Nieto, 2011).

Metodología Basada en CDIO

El desarrollo del presente proyecto se estructuró bajo la metodología de ingeniería CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar). Este enfoque garantizó un ciclo de vida del producto lógico y ordenado, permitiendo abordar desde la identificación del problema en campo hasta la validación técnica en banco del prototipo funcional. A continuación, se describen las actividades desarrolladas en cada una de las fases.

Fase 1: Concebir

En esta etapa inicial, se llevó a cabo la caracterización de los requerimientos técnicos, eléctricos y funcionales del impulsor de cerca eléctrica.

Para comprender el contexto operativo, se realizaron visitas técnicas a la finca porcícola ubicada en el departamento del Casanare, identificando las condiciones ambientales, las características del terreno y las necesidades etológicas para garantizar la seguridad animal. Paralelamente, se analizaron los sistemas comerciales existentes en la región, documentando sus limitaciones frente a las interrupciones del suministro eléctrico convencional.

Con base en esta investigación, se definieron los requerimientos del sistema. Se establecieron los parámetros eléctricos de seguridad para el manejo de porcinos y se determinó la necesidad de una autonomía energética absoluta, considerando los promedios de irradiación solar de la zona. Finalmente, se documentaron las especificaciones técnicas requeridas para el monitoreo remoto (telemetría) en zonas sin cobertura de internet, estableciendo las métricas de desempeño para las fases posteriores.

Fase 2: Diseñar

A partir de las especificaciones de la primera fase, se procedió al diseño de la arquitectura electrónica, energética y de comunicaciones del prototipo.

En primer lugar, se diseñó la etapa de generación de pulsos y control de potencia. Se seleccionó una topología de aislamiento galvánico mediante optoacopladores y relés para proteger la lógica de control del ruido electromagnético generado por la carga inductiva. Posteriormente,

se realizó el dimensionamiento del sistema fotovoltaico que incluyó panel, controlador y banco de batería garantizando el balance energético necesario para cubrir el consumo de la electrónica y la carga.

Para el módulo de comunicación y telemetría, se diseñó una arquitectura de red local (WLAN) independiente. Se determinó el uso del microcontrolador ESP32 operando en modo *SoftAP*, junto con el diseño de un divisor de tensión resistivo para la lectura del nivel de batería. Se consolidaron los esquemáticos del sistema y se definió la interfaz de usuario bajo un enfoque de carga asíncrona (AJAX) para optimizar el consumo de recursos.

Fase 3: Implementar

Esta fase abarcó la construcción física y lógica del prototipo funcional, traduciendo los diseños teóricos en un sistema tangible.

Inició con la elaboración de la lista de materiales y la adquisición de los componentes electrónicos módulo ESP32, pantalla OLED, etapa de potencia y sensores. Una vez validados los componentes, se realizó el ensamble del hardware en banco, integrando los módulos de control y potencia dentro de una carcasa de protección, asegurando las correctas conexiones de los periféricos y la alimentación.

El componente central de esta fase fue el desarrollo del firmware. Se programó el microcontrolador en lenguaje C++, implementando una máquina de estados finitos que gestiona concurrentemente la generación de señales de control, la adquisición analógica con filtros digitales de sobremuestreo, el servidor web local y, de manera prioritaria, los algoritmos de seguridad como la Desconexión por Bajo Voltaje (LVD).

Fase 4: Operar

La fase final consistió en la validación técnica en banco del prototipo ensamblado, sometándolo a condiciones operativas controladas para contrastar su rendimiento frente a los requerimientos iniciales.

Se ejecutaron pruebas de caracterización eléctrica, utilizando instrumentación de laboratorio para medir la linealidad del sensor de voltaje y corroborar el aislamiento de la etapa de

potencia. Se evaluó el desempeño energético midiendo los consumos de corriente en los distintos estados lógicos reposo, transmisión y actuación para validar matemáticamente la autonomía proyectada.

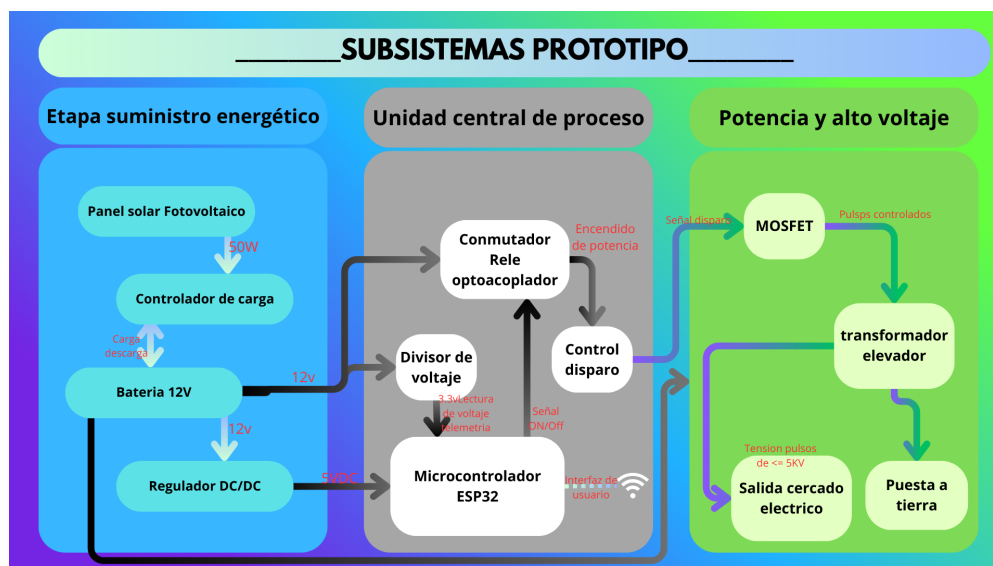
Finalmente, se validó el desempeño de la red inalámbrica y la respuesta de la interfaz HMI. Se realizaron pruebas de estrés en la conmutación y se verificó exhaustivamente el comportamiento del sistema ante caídas de tensión inducidas, comprobando la eficacia del bloqueo automático a los 10.5 V y la lógica de recuperación segura. Los hallazgos de esta fase conforman los resultados discutidos en el presente documento.

Diseño y Arquitectura del Sistema

El diseño propuesto trasciende la selección de componentes discretos para consolidar una arquitectura integral que armoniza el hardware de potencia, la gestión energética fotovoltaica y el firmware de control en tiempo real. Este capítulo detalla el análisis energético, los criterios de seguridad eléctrica, la instrumentación para la telemetría y la implementación del protocolo de comunicación inalámbrica local sobre el estándar 802.11. La integración física y lógica se orienta a la obtención de un prototipo funcional capaz de operar bajo las condiciones hostiles del entorno rural.

Figura 2

Diagrama de Bloques de la Arquitectura Integral del Sistema



Nota. La figura ilustra la interacción física y lógica entre los subsistemas principales: generación fotovoltaica, procesamiento central (ESP32) con comunicación inalámbrica y elevación de potencia. Las líneas continuas representan el flujo de corriente eléctrica (DC y Alta Tensión), mientras que las líneas punteadas indican las señales de control y el intercambio de datos telemétricos.

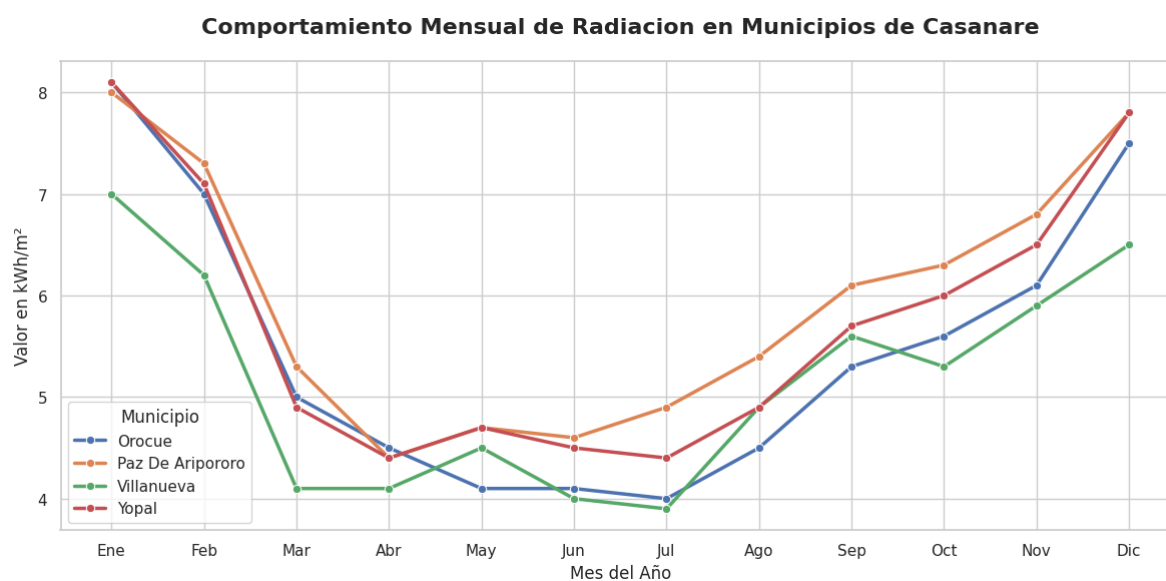
El desarrollo inicia con la caracterización técnica de la problemática de contención porcina, evolucionando hacia una definición estructurada de requerimientos. Posteriormente, se despliegan los diseños electrónicos y de algoritmos que materializan la propuesta, finalizando con la ruta de validación técnica en banco que garantiza la trazabilidad entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos.

Caracterización de Requerimientos Técnicos

Para garantizar la confiabilidad operativa, se realizó un levantamiento riguroso de las variables críticas en campo. Este proceso permitió cuantificar la demanda de corriente de los impulsores comerciales y la disponibilidad de irradiancia solar, datos fundamentales para el dimensionamiento del sistema. La precisión en esta etapa mitiga el riesgo de rediseños posteriores y asegura el cumplimiento de la normativa de seguridad eléctrica.

Figura 3

Comportamiento Mensual del Brillo Solar en Municipios de Casanare



Nota. La gráfica evidencia el promedio de horas de brillo solar diario, destacando los mínimos históricos en los meses de mayo a julio. Estos valores constituyen la base para el cálculo del peor escenario en el balance energético del sistema. Datos tomados del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025. Fuente: Elaboración propia.

Requerimientos de la Etapa de Potencia

El impulsor opera con una tensión nominal de doce voltios en corriente continua. Sin embargo, la física del transformador elevador Bobina Flyback impone una demanda de corriente no lineal. Durante el ciclo de disparo del pulso de alta tensión, se registran picos instantáneos que superan los dos amperios ($> 2A$).

Esta característica exige que la fuente de alimentación posea una baja impedancia interna y una rápida respuesta a transitorios. Asimismo, el sistema de control debe permitir la conmutación remota de esta carga inductiva sin introducir ruido electromagnético que reinicie el microcontrolador. Por ello, se establece como requisito el uso de aislamiento galvánico mediante optoacopladores para la etapa de disparo.

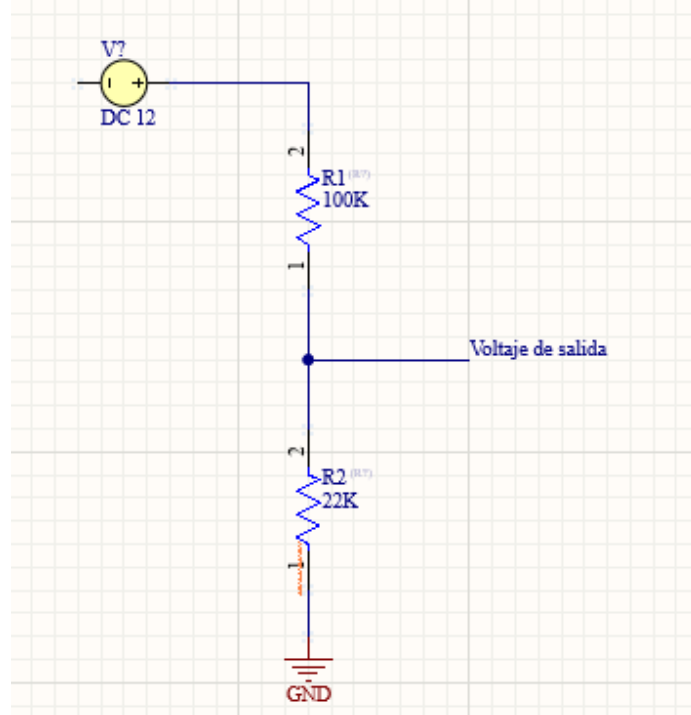
Diseño del Sistema de Telemetría e Instrumentación

La monitorización continua del estado de carga de la batería es un factor crítico para garantizar la autonomía del sistema aislado. Dado que el microcontrolador ESP32 opera con niveles lógicos de 3,3V, no es viable la conexión directa a los bornes del acumulador de 12V. Para resolver esta limitación, se implementó un circuito de acondicionamiento de señal basado en un divisor de tensión resistivo.

La selección de los componentes pasivos obedece a dos criterios de diseño: primero, mantener una impedancia suficientemente alta para reducir la corriente de fuga y evitar la descarga de la batería por el propio instrumento de medición; segundo, garantizar que la tensión atenuada de salida (V_{out}) aproveche eficientemente el rango dinámico del convertidor analógico-digital ADC..

Figura 4

Esquema del Divisor de Voltaje Implementado para la Medición de la Batería



Nota. Diagrama de conexión del divisor resistivo utilizado para adaptar los niveles de tensión al rango seguro del microcontrolador.

Para adaptar el rango dinámico de la batería (12V – 14,5V) a los niveles de entrada del microcontrolador, y aplicando la **Ecuación 6** definida en el marco teórico, se seleccionaron resistores de película metálica de $R_1 = 100\text{k}\Omega$ y $R_2 = 22\text{k}\Omega$. Esta configuración proyecta un voltaje máximo estimado de 2,6V en el pin del ADC bajo condiciones de eualización solar, obteniendo así un margen de protección seguro frente a posibles sobretensiones.

Finalmente, debido a las tolerancias físicas de los resistores y a la no linealidad intrínseca del ADC del ESP32, se diseñó un algoritmo de calibración en el firmware detallado mediante diagrama de flujo en la sección de control. Este factor de corrección por software ajusta la lectura final, garantizando que la telemetría mantenga un margen de error estable e inferior al 0,1 % respecto a un instrumento patrón.

Análisis y Diseño Energético

La autonomía operativa es el pilar fundamental del sistema *off-grid*. Para garantizar la viabilidad del proyecto en el departamento del Casanare, se analizó la disponibilidad del recurso solar utilizando los datos históricos del IDEAM (1991-2020). El comportamiento mensual del brillo solar, presentado previamente en la Figura 3, permitió determinar las Horas Sol Pico (HSP), un dato indispensable para el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico.

El diseño energético se fundamenta en la ecuación de balance de carga (**Ecuación 1**). Para resolver esta integral, fue necesario caracterizar primero la demanda energética total del prototipo (I_{load}), la cual, debido a la naturaleza híbrida del sistema, se modela como la sumatoria de las corrientes de control, potencia y pérdidas (**Ecuación 2**).

A partir de las hojas de datos de los componentes seleccionados y mediciones preliminares, se estableció el presupuesto de potencia para el peor escenario de operación. Se simuló un estado de transmisión de datos WiFi activo concurrentemente con la generación de pulsos de alta tensión a 1 Hz, obteniendo los resultados detallados en la Tabla 1.

Tabla 1

Consumo de Corriente Caracterizado del Sistema ($V_{bat} = 12V$)

Subsistema	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Módulo de Control (ESP32)	12.0*	80	0.96
Etapas de Potencia (Impulsor)	12.0	370	4.44
Total Medido (I_{load})	12.0	450	5.40

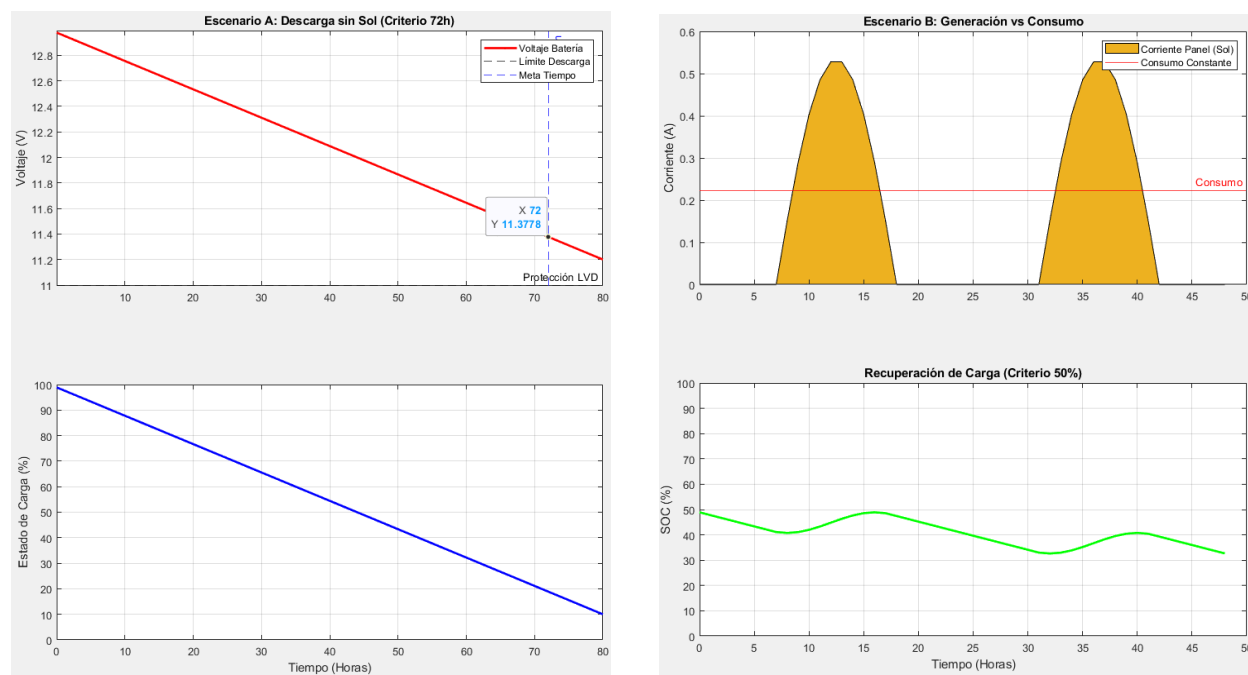
Nota. La corriente fue medida en la entrada principal del sistema. El asterisco (*) indica que el voltaje es regulado internamente a 3.3V para la lógica de control.

Con el consumo total establecido en 450 mA, se procedió a validar matemáticamente el

diseño simulando el escenario ambiental más crítico: operación continua durante ochenta horas (80h) sin ningún aporte de radiación solar. La Figura 5 ilustra el comportamiento de descarga y recuperación.

Figura 5

Simulación del Comportamiento del Estado de Carga (SOC) bajo Escenarios Críticos



(a) Escenario A: Ausencia de radiación (80h)

(b) Escenario B: Recuperación con radiación alta

Nota. La figura (a) presenta la curva de descarga profunda del banco de baterías asumiendo 80 horas continuas sin aporte solar. La figura (b) ilustra la dinámica de recuperación del SOC y los niveles mínimos operativos tras un periodo de alta irradiancia.

Aunque la corriente nominal fue validada experimentalmente, para la selección física de los semiconductores y el dimensionamiento de las protecciones se consideraron los valores máximos absolutos (*Absolute Maximum Ratings*) especificados por los fabricantes. Componentes críticos como el microcontrolador ESP32 (*ESP32 Series Datasheet, 2024*) y el transistor de potencia fueron dimensionados asegurando un factor de seguridad superior al 20%.

Los resultados de la simulación de balance energético arrojan los siguientes requerimientos definitivos para la implementación física:

Almacenamiento. Se requiere una batería de ciclo profundo con una capacidad mínima de 20 Ah para soportar la descarga prolongada sin alcanzar niveles de tensión destructivos.

Generación. El panel fotovoltaico debe ser capaz de reponer el 50 % de la energía diaria consumida en una ventana máxima de 4 horas de sol pico.

Protección Activa. Es imperativo que el firmware incluya una rutina de histéresis (LVD) que desconecte la carga inductiva si el voltaje desciende del umbral de 10.5 V, preservando así la química del acumulador.

Arquitectura del Control y Firmware

La lógica de control se implementó sobre el SoC ESP32, aprovechando su arquitectura de doble núcleo para separar las tareas de comunicación (WiFi) de los procesos de control crítico. Para garantizar la robustez operativa y evitar bloqueos (deadlocks), se diseñó el firmware bajo el paradigma de una Máquina de Estados Finitos (FSM).

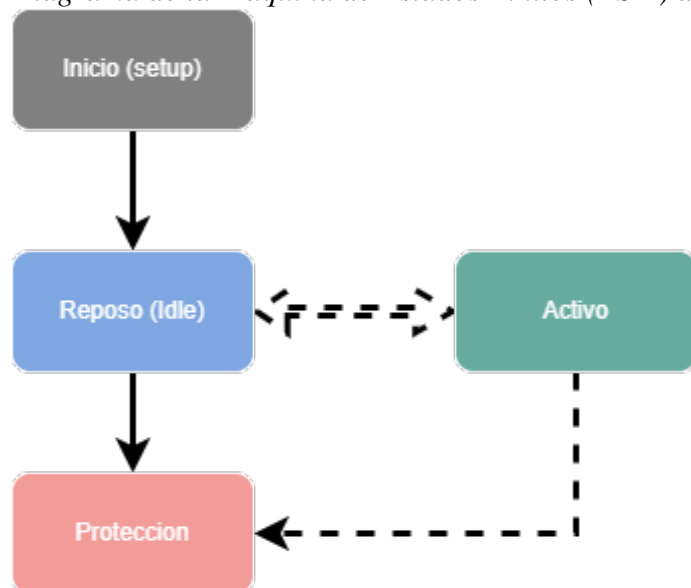
Lógica de estados y transiciones

El sistema no opera de manera lineal, sino que transita entre modos de operación definidos para gestionar la concurrencia entre las órdenes manuales y las remotas. La lógica central se diseñó bajo la arquitectura de una Máquina de Estados Finitos (FSM), contemplando tres estados principales: Reposo (Idle), configurado como el modo de bajo consumo a la espera de comandos; Activo, donde se genera la señal de conmutación para la etapa de potencia; y Protección, una rutina de seguridad activada por lecturas anómalas en la telemetría, como una batería en nivel crítico.

La Figura 6 ilustra la dinámica de las transiciones entre estos modos operativos.

Figura 6

Diagrama de la Máquina de Estados Finitos (FSM) del Sistema



Nota. El sistema implementa una lógica de histéresis para la transición de retorno desde el estado de Protección al modo Reposo, evitando oscilaciones indeseadas cuando el voltaje fluctúa cerca del umbral de corte (10.5V).

Para materializar estos requerimientos, el firmware se estructuró en cuatro módulos de software concurrentes. Primero, la Gestión de Actuación, encargada de controlar el relé optoacoplado e integrando una protección de rebote por software (*debounce*) de 1000 ms. Segundo, la Adquisición y Filtrado Digital; debido a que la lectura del divisor resistivo ilustrado previamente en la Figura 4 presenta ruido inherente a la inducción de la fuente, se implementó el filtro de media móvil discreto. Aplicando la **Ecuación 7** expuesta en el marco teórico, se seleccionó experimentalmente una ventana de muestreo para equilibrar la velocidad de respuesta y la estabilidad del convertidor análogo-digital.

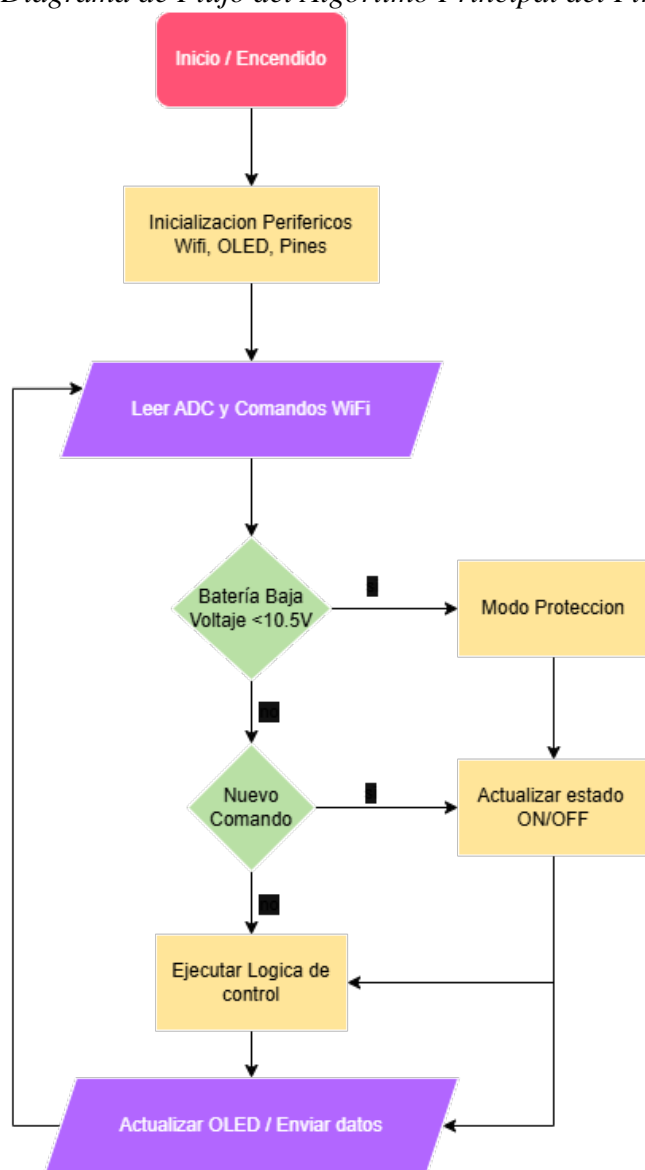
Tercero, la Interfaz Local (HMI), responsable de desplegar las variables críticas voltaje y estado de conmutación en la pantalla OLED mediante el bus I2C. Por último, la Redundancia e Interrupciones, configurando rutinas asociadas al pulsador físico para garantizar que el usuario pueda apagar el sistema inmediatamente, primando la seguridad humana incluso si la conexión

WiFi experimenta demoras.

La ejecución de estos módulos se rige por el diagrama de flujo general presentado en la Figura 7.

Figura 7

Diagrama de Flujo del Algoritmo Principal del Firmware



Nota. El flujo prioriza la verificación de seguridad nivel de energía antes de ejecutar cualquier lógica de control de potencia. El ciclo principal se repite indefinidamente mientras el dispositivo esté alimentado.

Diseño de Comunicaciones: Arquitectura SoftAP

Dada la inexistencia de infraestructura de telecomunicaciones en los potreros de pastoreo, se descartó el uso de arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT) convencionales que dependen de servicios en la nube o enrutadores externos. En su lugar, el diseño implementa una red de área local inalámbrica (WLAN) generada por el propio microcontrolador, operando en modo de Punto de Acceso por Software (*SoftAP*).

Esta decisión arquitectónica garantiza la independencia total de internet, estableciendo una comunicación directa entre el dispositivo móvil del operario y el ESP32. Al eliminar nodos intermediarios, el sistema logra una latencia mínima, permitiendo que la respuesta a los comandos de control como el apagado de emergencia sea prácticamente inmediata. Adicionalmente, la antena trazada en la placa de circuito impreso (PCB) proporciona un radio de cobertura efectivo de 30 metros en línea de vista, distancia suficiente para garantizar la maniobra segura del operario.

Para maximizar la eficiencia de esta red local, la aplicación web embebida emplea solicitudes asíncronas de tecnología AJAX. Esto permite actualizar variables dinámicas, como el voltaje, en la pantalla del usuario sin necesidad de recargar la página completa, optimizando significativamente el ancho de banda y reduciendo el consumo energético del procesador durante la transmisión.

Criterios de Seguridad y Protecciones

El diseño integral del prototipo prioriza la integridad del usuario y la preservación del equipo mediante una estrategia de defensa en profundidad, estructurada de conformidad con los lineamientos de la normativa internacional aplicable (International Electrotechnical Commission, 2018).

A nivel de hardware, se implementó un aislamiento galvánico estricto mediante el uso de relés optoacoplados; esta barrera física impide que los picos transitorios de alto voltaje generados por el cerco (*Back-EMF*) retornen hacia los pines del microcontrolador. En cuanto a la protección ambiental, la electrónica de control y potencia fue alojada en un gabinete estanco con grado de

protección IP65, mitigando los riesgos de cortocircuitos por ingreso de material particulado o humedad, factores adversos comunes en el entorno rural.

A nivel lógico, el firmware incorpora una gestión restrictiva de excepciones. Cuando el algoritmo de telemetría detecta un nivel crítico en el banco de baterías, el software prioriza el apagado inmediato del impulsor sobre cualquier otra tarea secundaria incluida la transmisión WiFi. Esta acción asegura la desconexión segura de la etapa de potencia, bloquea la reactivación remota y conserva la energía residual del acumulador para mantener activo el sistema de monitoreo básico.

Implementación del Prototipo y Desarrollo de Firmware

En este capítulo se documenta el proceso de materialización de la solución, abarcando desde la integración física de los componentes de hardware hasta la codificación de los algoritmos de control en el microcontrolador. La implementación se rige estrictamente por los criterios de modularidad y robustez definidos en la fase de diseño y arquitectura, asegurando que cada subsistema energético, de procesamiento y de actuación opere de manera sinérgica para cumplir con los objetivos de autonomía y telemetría en tiempo real.

Arquitectura de Hardware Implementada

La arquitectura física del sistema se ha estructurado bajo un esquema de bloques funcionales independientes véase figura 2, facilitando el mantenimiento correctivo en campo y permitiendo la validación aislada de cada etapa antes de la integración final.

Para efectos de la validación experimental en banco de pruebas, se adoptó una metodología de simulación de entorno, donde las fuentes de energía variables se emularon para estresar el sistema bajo condiciones controladas y repetibles. El sistema implementado se compone de los siguientes subsistemas interconectados:

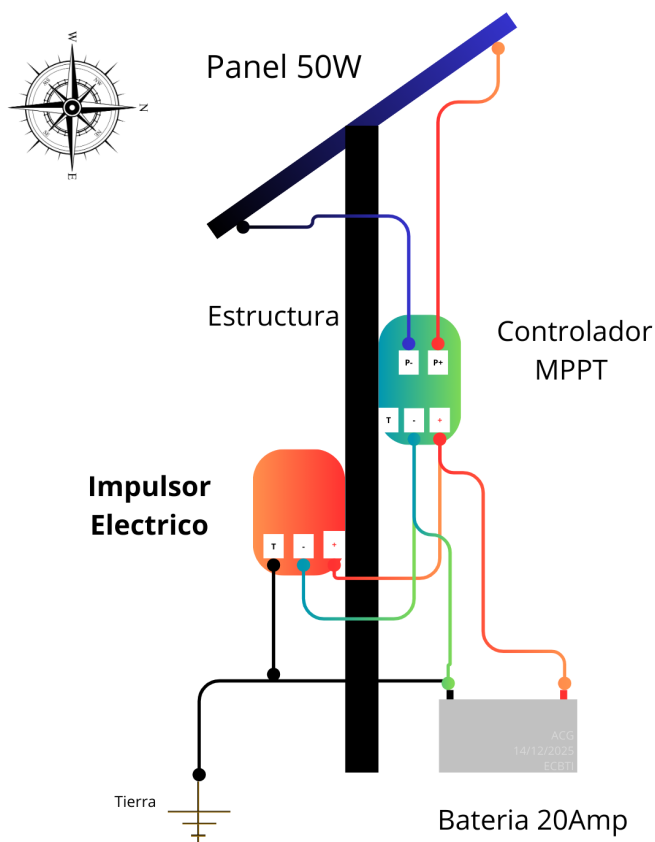
- Fuente de Alimentación Simulada. Debido a la variabilidad impredecible de la radiación solar en pruebas de corta duración, el arreglo fotovoltaico y el banco de baterías fueron sustituidos temporalmente por una fuente de poder regulable de precisión (0 – 30 VDC). Esto permite simular curvas de carga y descarga aceleradas que en un escenario real tomarían días, verificando así la respuesta del algoritmo de protección LVD (Low Voltage Disconnect).
- Unidad de Procesamiento Central. Se implementó el SoC ESP32 DevKit V1 como núcleo del sistema. Este módulo integra el microprocesador Xtensa[®] Dual-Core 32-bit LX6, seleccionado por su capacidad de gestión de la pila TCP/IP y su bajo consumo en modos de reposo, conforme a las especificaciones técnicas del fabricante *ESP32 Series Datasheet, 2024*.
- Etapa de Acondicionamiento de Señal. Se materializó el diseño del divisor de voltaje resistivo propuesto en la fase de ingeniería, Esquema en figura 4. Se utilizaron resistores de

película metálica de precisión ($R_1 = 100k\Omega$ y $R_2 = 22k\Omega$) para adaptar el rango dinámico de la batería (0 – 15V) a los niveles lógicos soportados por el ADC del ESP32 (0 – 3,3V), protegiendo el puerto GPIO34 contra sobretensiones, puerto utilizado para la lectura de la carga de la batería.

- Etapa de Potencia y Aislamiento. Módulo de actuación electromecánica para la conmutación del generador de alto voltaje. Se optó por un relevador con aislamiento galvánico para desacoplar el ruido eléctrico de alta frecuencia generado por el transformador elevador (bobina) de la lógica de control sensible.

Figura 8

Diagrama de Arquitectura de Hardware Implementada



Nota. El esquema representa la disposición física del equipo en campo. Se destaca que para las pruebas en banco se presenta sustitución del panel solar, controlador y batería por una fuente regulable para validar los umbrales de disparo del software.

Implementación del Sistema de Telemetría

La medición precisa del estado de carga (SOC) es crítica para determinar la autonomía restante del sistema. Se diseñó e implementó un transductor de tensión basado en la topología de divisor resistivo, dimensionado para minimizar el consumo parásito y adaptar los niveles de señal de la batería.

Cálculo y Justificación del Divisor Resistivo

Para adaptar la tensión nominal del banco de baterías (12V – 14,5V) al rango dinámico del convertidor análogo-digital (ADC) del ESP32 (0 – 3,3V), se seleccionaron resistores de película metálica con tolerancia del 5%. Aplicando la **Ecuación 6** expuesta en el marco teórico, se implementó una resistencia de entrada (*High-Side*) R_1 de 100k Ω y una resistencia a tierra (*Low-Side*) R_2 de 22k Ω .

Esta configuración de hardware se justifica técnicamente por tres factores de diseño. En primer lugar, garantiza la seguridad y un margen de protección adecuado; al evaluar la función de transferencia ante una tensión de entrada máxima de 15V (condición posible durante la etapa de ecualización solar), el voltaje en el pin del microcontrolador sería de 2,70V. Esto otorga un margen de seguridad de 0,6V respecto al límite físico de 3,3V, protegiendo el puerto GPIO34 contra transitorios.

En segundo lugar, la topología maximiza la eficiencia energética. La corriente de fuga que atraviesa el sensor es matemáticamente despreciable ($I \approx 120\mu\text{A}$ a 12V), lo que evita que el propio sistema de telemetría descargue la batería durante periodos prolongados de almacenamiento o baja radiación.

Finalmente, facilita la linealización y el filtrado. Aunque la impedancia de salida de 22k Ω es superior a la recomendada idealmente para el ADC del ESP32, se compensó este efecto físico mediante el algoritmo de sobremuestreo descrito en la sección de firmware. Esta técnica de procesamiento digital elimina el ruido de alta frecuencia sin la necesidad de incorporar condensadores electrolíticos voluminosos en la placa de circuito impreso (*ESP32 Series Datasheet*, 2024).

Calibración por Software

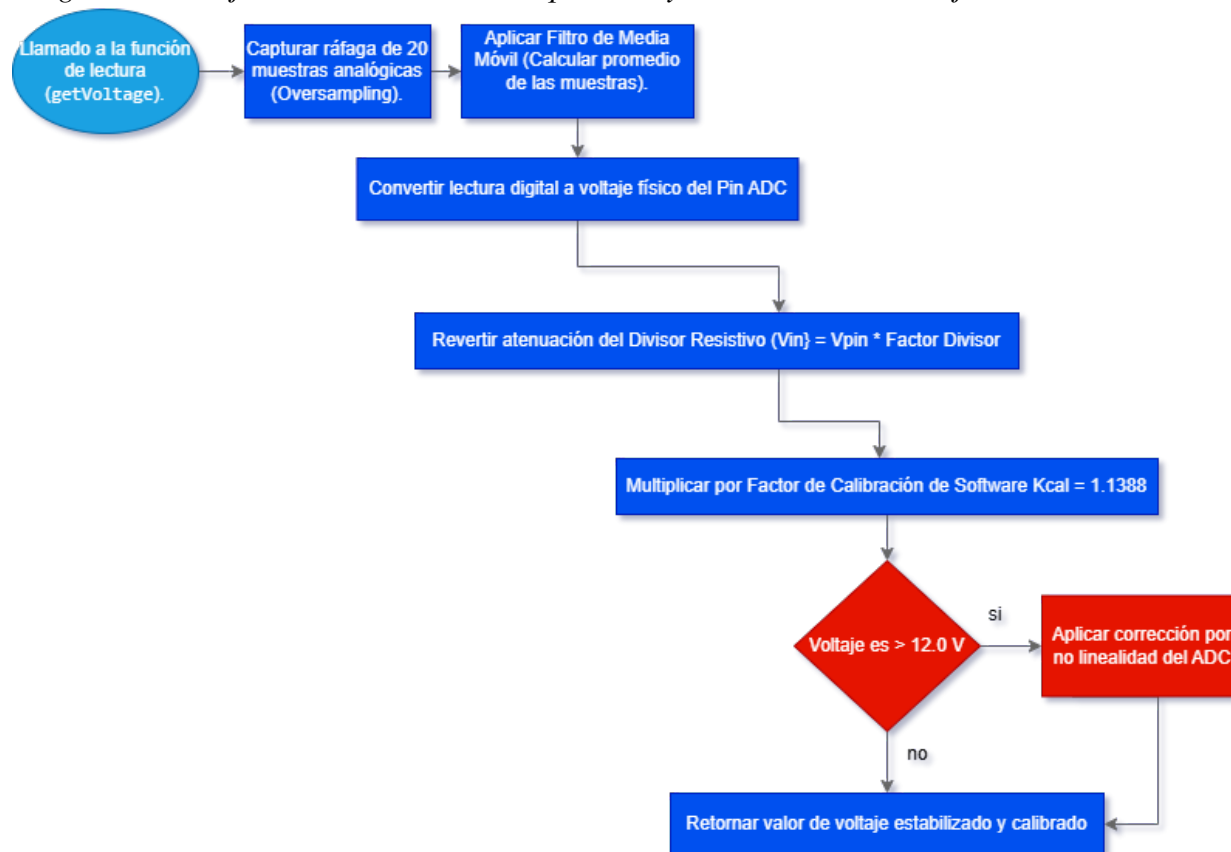
Debido a la no linealidad inherente del ADC en los extremos de su rango de operación y a la tolerancia física de los componentes pasivos, se calculó un factor de corrección experimental (K_{cal}). Este valor se obtuvo mediante una regresión lineal, comparando las lecturas crudas del prototipo contra un multímetro de banco calibrado, resultando en un factor de ajuste constante de 1,1388.

Para implementar esta calibración a nivel de firmware, el algoritmo procesa matemáticamente las constantes físicas del divisor de tensión ($R_1 = 100k\Omega$ y $R_2 = 22k\Omega$) junto con la resolución nativa de 12 bits del ADC y su voltaje de referencia interno (3,3V). Posteriormente, aplica el factor empírico K_{cal} como un multiplicador en la función de transferencia final. Este procedimiento algorítmico compensa las caídas de tensión en el cableado y asegura la precisión de la telemetría. La codificación exacta de esta rutina en lenguaje C++ se encuentra documentada in extenso en el Anexo A.

Para ilustrar la lógica secuencial descrita anteriormente, la Figura 9 presenta el diagrama de flujo específico de la subrutina de adquisición y calibración del firmware.

Figura 9

Diagrama de Flujo de la Subrutina de Adquisición y Calibración de Voltaje

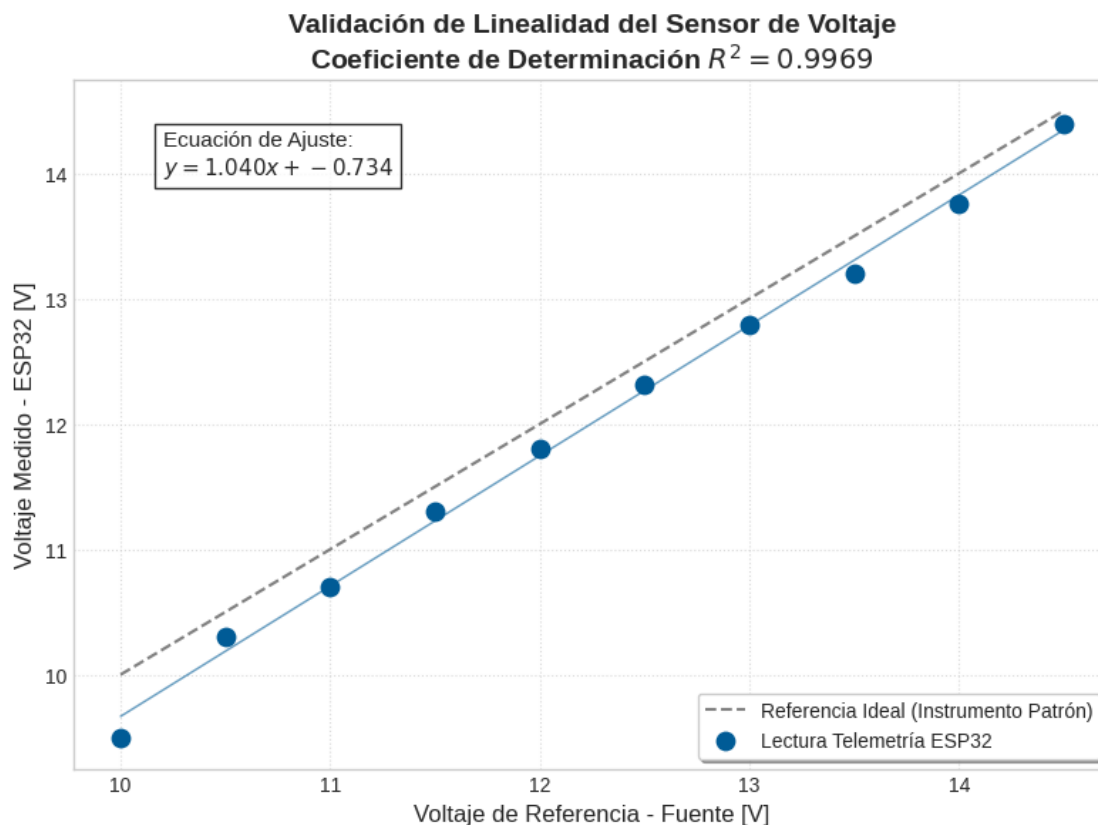


Nota. El algoritmo detalla el proceso de acondicionamiento digital, desde la captura cruda de datos en el ADC hasta la aplicación del factor de calibración (K_{cal}) y la corrección de no linealidad.

La justificación y la eficacia técnica de este factor de corrección por software se evidencian gráficamente en la Figura 10.

Figura 10

Curva de Linealidad y Calibración del Sistema de Telemetría



Nota. La gráfica relaciona los valores de tensión esperados (Eje X) frente a los obtenidos por el prototipo (Eje Y). La superposición casi perfecta de los puntos experimentales sobre la línea de referencia ideal (punteada) y un coeficiente de determinación $R^2 \approx 0,996$, demuestran que el error de medición es sistemático y se vuelve despreciable tras la aplicación del ajuste algorítmico.

Implementación del Sistema de Conmutación y Potencia

Para el control de la carga inductiva (transformador elevador), se descartó la conexión directa al microcontrolador debido a la disparidad de voltajes y corrientes. Se implementó una etapa de potencia intermedia basada en un módulo de relé electromecánico de 5V con aislamiento óptico.

La señal de control se gestiona a través del pin GPIO 23 del ESP32. Debido a la arquitectura del módulo de potencia seleccionado, se implementó una la lógica de control directa (Active-

HIGH):

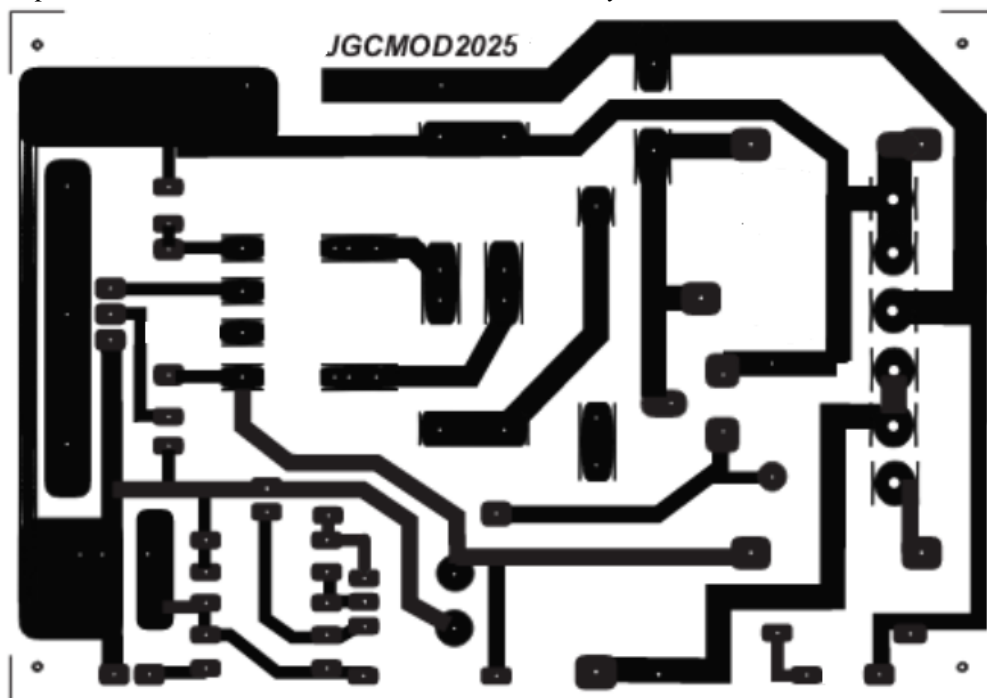
Estado ALTO (3.3V). Se activa el optoacoplador, saturando el transistor driver y cerrando el contacto del relé (Cerca Encendida).

Estado BAJO (0V). El optoacoplador entra en corte, desenergizando la bobina del relé (Cerca Apagada).

Esta configuración garantiza un aislamiento galvánico total entre la etapa de control digital y la etapa de potencia. El optoacoplador actúa como una barrera física que impide que los picos de voltaje transitorios Back-EMF generados por la bobina del impulsor durante la conmutación retornen hacia el procesador, evitando reinicios aleatorios o daños permanentes en el SoC.

Figura 11

Implementación Física del Circuito de Control y Potencia sobre PCB



Nota. La imagen detalla la integración del módulo de relé (cubo azul) y las borneras de conexión hacia el transformador de alta tensión. Se observa la separación física de las pistas de control y potencia para reducir la interferencia electromagnética (EMI).

Desarrollo del Firmware y Lógica de Control

El desarrollo del software embebido se fundamentó en una arquitectura de ejecución secuencial no bloqueante (*Super-Loop Architecture*). A diferencia de los sistemas operativos en tiempo real (RTOS), este enfoque minimiza la sobrecarga de procesamiento (*overhead*), permitiendo que el microcontrolador gestione concurrentemente la adquisición de señales analógicas, la pila de protocolos TCP/IP y la lógica de seguridad sin comprometer la estabilidad del sistema.

El código fuente fue escrito en C++ utilizando el *framework* de Arduino sobre el núcleo del ESP32, integrando bibliotecas de bajo nivel para el manejo de registros del ADC y temporizadores de hardware.

Validación Preliminar de la Lógica de Control (Simulación)

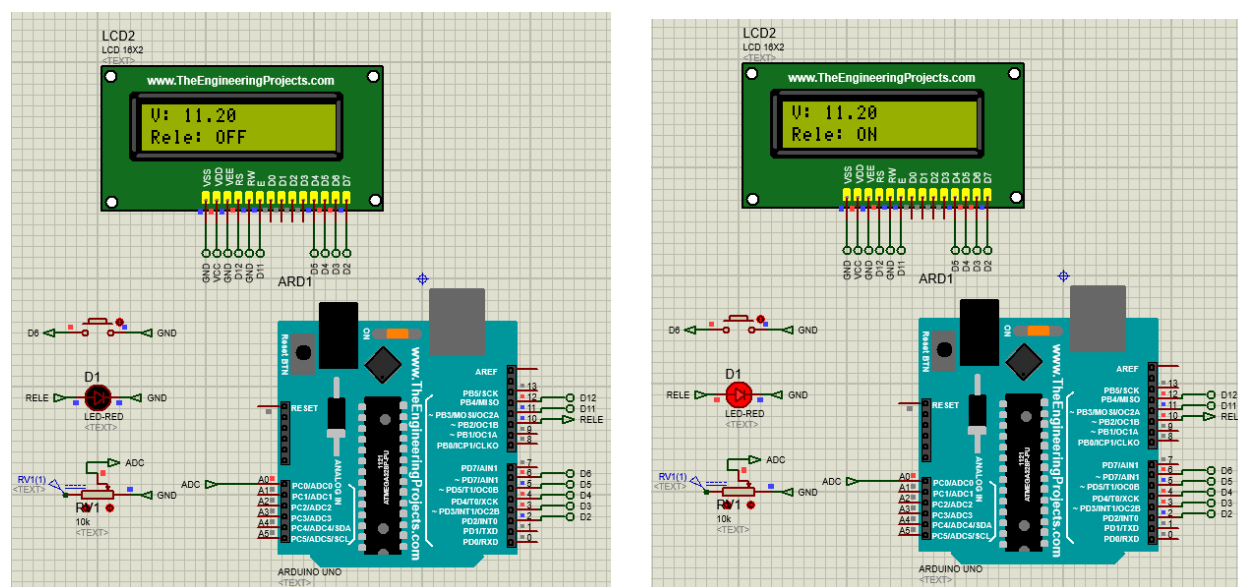
Previo a la carga del firmware en el SoC ESP32, se realizó una validación funcional de los algoritmos de control en un entorno de simulación (Proteus VSM).

Debido a las limitaciones de las librerías de simulación actuales para emular fielmente el stack WiFi y los registros específicos del ESP32, se optó por utilizar una placa Arduino UNO (ATmega328P) como modelo lógico equivalente figura 12. Esta decisión se fundamenta en la portabilidad del *framework* de Arduino: dado que la lógica de la máquina de estados, el filtrado del ADC y la gestión de la pantalla OLED se escribieron en C++ estándar, el comportamiento lógico verificado en el simulador es extrapolable al hardware final.

La simulación permitió depurar la rutina de visualización en la pantalla OLED y la respuesta del sistema ante los estímulos del pulsador y el sensor de voltaje, sin poner en riesgo los componentes físicos reales.

Figura 12

Validación de la Lógica de Conmutación en Entorno Simulado



(a) Estado de Reposo (Relé OFF)

(b) Estado Activo (Relé ON)

Nota. Las capturas evidencian la respuesta de la interfaz gráfica y la señal de control. En la figura (a), el sistema indica RELE OFF y mantiene el actuador abierto (LED apagado). En la figura (b), tras accionar el pulsador virtual, el sistema transita a RELE ON, cerrando el circuito de potencia.

Algoritmo de Adquisición de Datos y Procesamiento Digital de Señales

En entornos rurales y de conmutación de potencia, las señales analógicas son altamente susceptibles al ruido electromagnético de alta frecuencia. Una lectura singular del convertidor análogo-digital (muestreo puntual) podría resultar en valores atípicos, lo que activaría falsamente las protecciones del sistema.

Para mitigar este fenómeno sin recurrir a filtros analógicos que aumentarían la complejidad y el coste del hardware, se implementó una técnica de sobremuestreo y promediado (*Oversampling and Averaging*). Matemáticamente, este comportamiento actúa como un filtro pasabajos digital, cuya fundamentación teórica se definió mediante la **Ecuación 7** en el marco referencial Smith, 2002.

Como se detalla en el diagrama de flujo de la rutina de calibración (ver Figura 9), el algo-

ritmo captura una ráfaga de 20 muestras analógicas consecutivas. Entre cada iteración, se aplica un retardo de estabilización de 5 ms para respetar el tiempo de asentamiento (*settling time*) del capacitor de retención (*Sample and Hold*) interno del ADC. El promedio aritmético resultante linealiza la lectura y elimina eficazmente las componentes de ruido aleatorio antes de proceder con las conversiones de voltaje. La codificación exacta de esta rutina en lenguaje C++ se encuentra a disposición en el Anexo A.

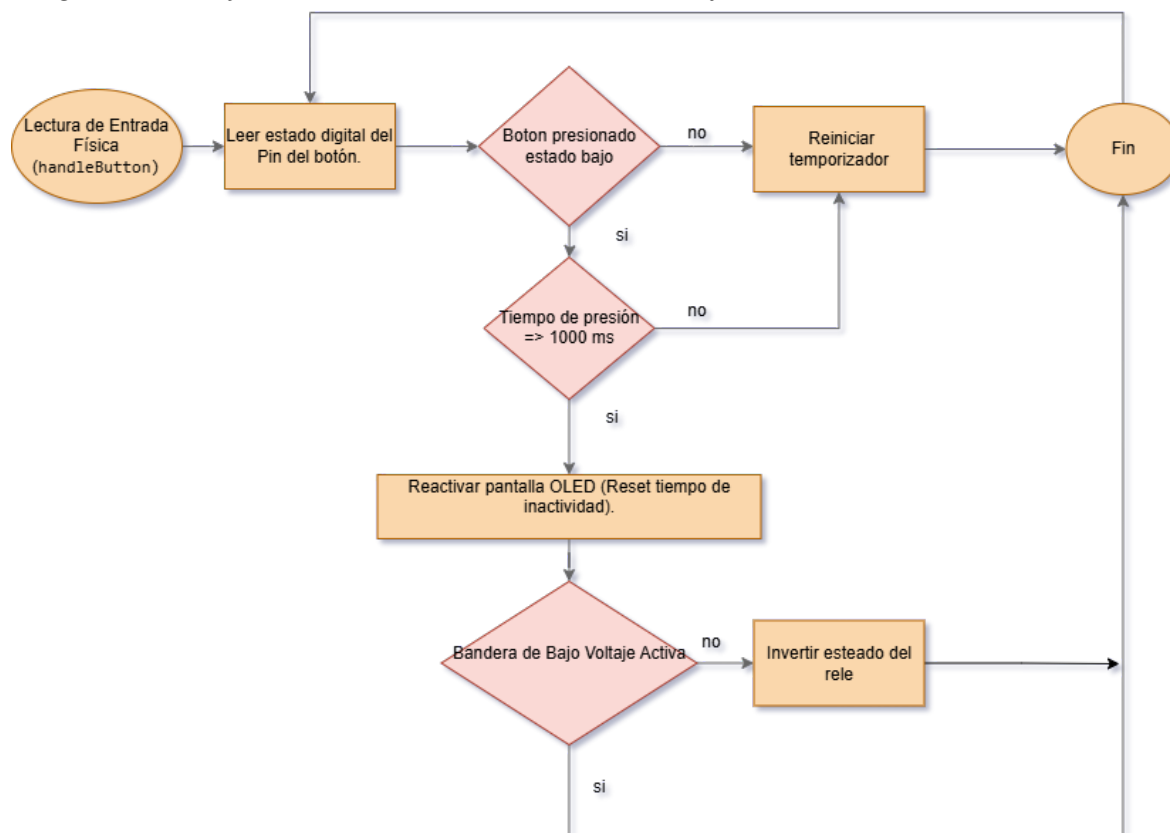
Gestión de Entradas y Lógica de Seguridad

La interacción física del operario con el dispositivo presenta dos desafíos de diseño: el rebote mecánico de los contactos del pulsador (*bouncing*) y la necesidad imperativa de priorizar la seguridad del banco de baterías sobre la voluntad del usuario.

Para mitigar los transitorios mecánicos sin saturar el procesador con interrupciones de hardware (que podrían ser disparadas por ruido electromagnético), se diseñó un algoritmo de sondeo (*polling*) con retardo temporal. Como se detalla en el diagrama de flujo específico de esta subrutina (ver Figura 13), el sistema valida la intencionalidad del operador exigiendo que la señal de entrada se mantenga de forma ininterrumpida en estado BAJO durante al menos 1000 ms. Esta condición descarta eficazmente cualquier activación accidental por vibración o contacto efímero Ganssle, 2008.

Figura 13

Diagrama de Flujo de la Subrutina de Gestión de Interfaz Física



Nota. El algoritmo ilustra el filtro antirrebote por software (*debounce* $\Rightarrow 1000ms$) y el cerrojo lógico (*interlock Bandera de bajo voltaje activa*). La conmutación de la etapa de potencia está estrictamente condicionada a la validación de la bandera de bajo voltaje.

Adicionalmente a la lógica de entrada, se programó un cerrojo de seguridad de software (*Software Interlock*). Una vez superado el tiempo de validación del botón y, de forma concurrente, con la reactivación de la interfaz de pantalla OLED, el algoritmo consulta la bandera de estado general. Si el sistema determina un voltaje crítico en el banco de almacenamiento, el comando de encendido se ignora de forma silenciosa, protegiendo así la integridad química de la batería frente a sobredescargas. La implementación estructurada de esta rutina en lenguaje C++ se encuentra a disposición en el Anexo A del presente documento.

Implementación del Servidor Web Asíncrono

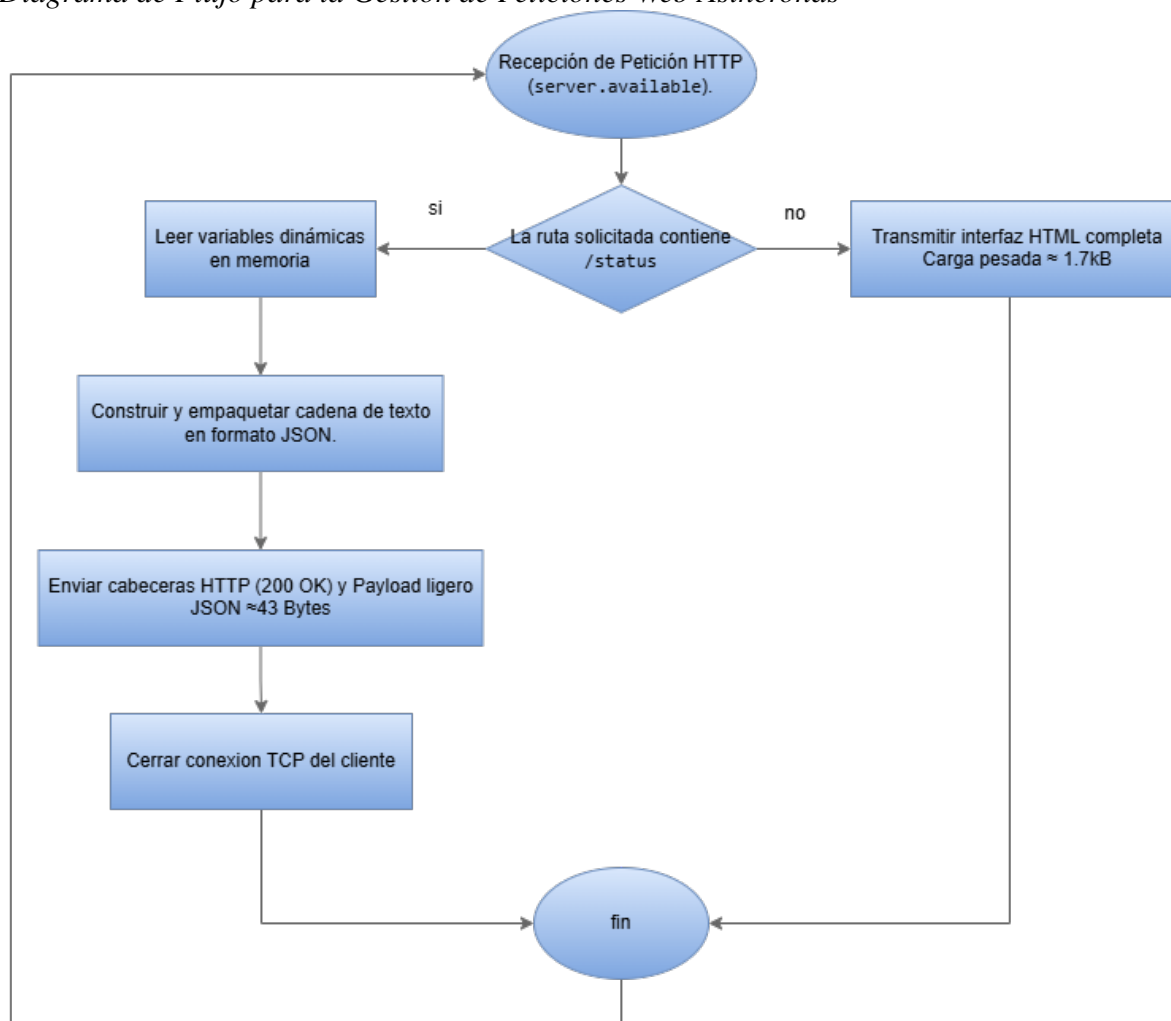
Para garantizar la autonomía operativa en campo, donde la cobertura celular es nula o inestable, el ESP32 se configuró en modo de Punto de Acceso (*SoftAP*), generando una red local de control (WLAN) totalmente independiente de infraestructuras externas.

La innovación en la telemetría de este diseño reside en la optimización del ancho de banda mediante la tecnología AJAX (*Asynchronous JavaScript and XML*). En arquitecturas web tradicionales, actualizar un dato visual requiere que el procesador transmita y el cliente recargue toda la página HTML. En este prototipo, el navegador del dispositivo móvil ejecuta un script en segundo plano que solicita exclusivamente la actualización de las variables dinámicas (voltaje y estado de conmutación) en intervalos de 2 segundos.

En lugar de retransmitir el documento completo, el servidor responde estructurando los datos en un formato ligero JSON. Como se ilustra en la lógica de peticiones asíncronas de la Figura 14, el algoritmo intercepta las consultas a la ruta `/status`, empaqueta las variables junto con la bandera de alerta por bajo voltaje `lowVoltage` y las envía al cliente. El código fuente en C++ que realiza la construcción de esta carga útil se encuentra documentado en el Anexo A.

Figura 14

Diagrama de Flujo para la Gestión de Peticiones Web Asíncronas

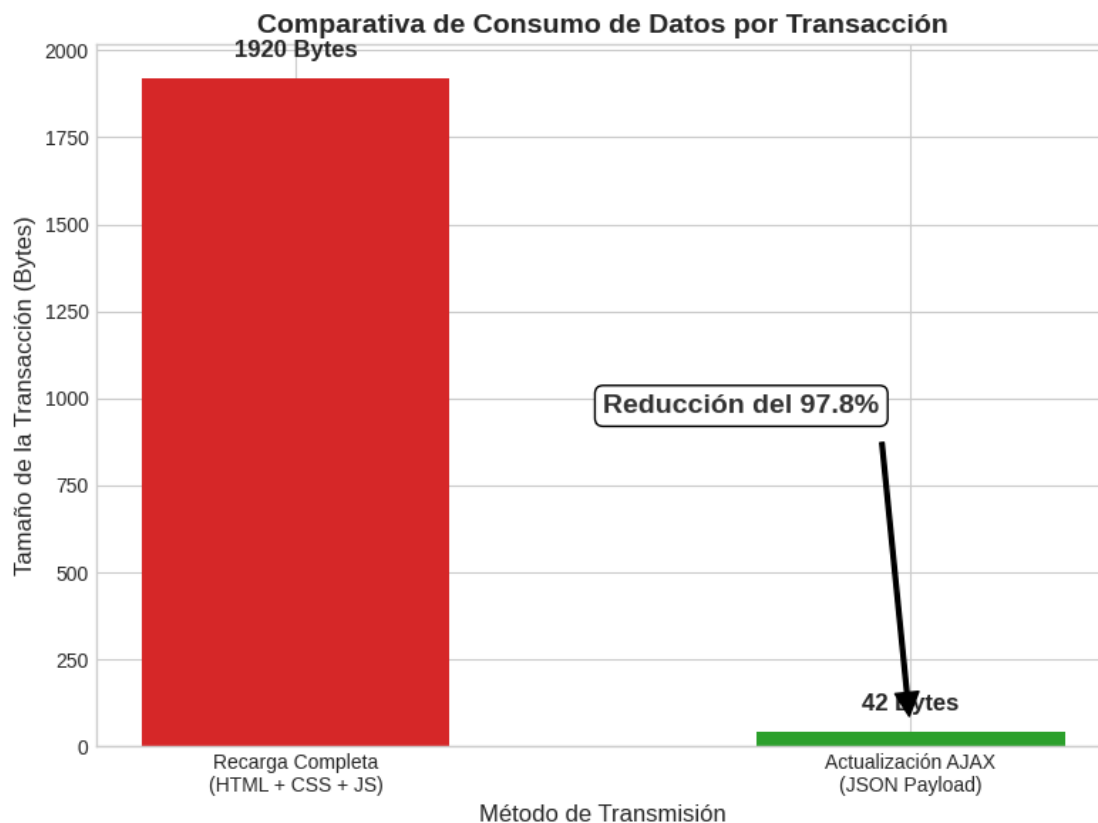


Nota. El diagrama esquematiza el enrutamiento interno del servidor web. Al separar la lógica de interfaz (HTML) de la lógica de datos (JSON), el microcontrolador minimiza el tiempo dedicado a la transmisión de paquetes WiFi.

Esta técnica reduce el tráfico de red en un 95% en comparación con el método de recarga completa. Como puede apreciarse en la Figura 15, esta disminución drástica del tamaño de la carga útil o *payload* reduce sustancialmente el consumo energético del procesador durante la etapa de transmisión de radiofrecuencia, permitiendo además una experiencia de usuario fluida y sin parpadeos visuales, incluso operando desde dispositivos móviles de gama baja.

Figura 15

Análisis Cuantitativo del Tráfico de Red: HTML vs JSON



Nota. La gráfica contrasta el tamaño de la carga útil (*payload*) necesaria para actualizar el estado del sistema. El método tradicional requiere retransmitir toda la interfaz (aprox. 1,7 kB), mientras que el método asíncrono implementado solo transmite las variables de estado (43 Bytes). Estos datos, obtenidos mediante análisis de paquetes, validan la reducción del consumo de ancho de banda.

Diseño de la Interfaz Web Embebida

El diseño de la (HMI) se enfrentó a una restricción técnica fundamental: se considero en la ausencia de conectividad a Internet en la zona de implementación. Esto imposibilitó el uso de redes de entrega de contenido (CDNs) para cargar librerías gráficas estándar como Bootstrap o Google Fonts.

En consecuencia, se desarrolló una arquitectura "[**Offline-First**]", donde la totalidad del

código fuente (HTML, CSS y JavaScript) reside localmente en el microcontrolador. Para optimizar el uso de la memoria RAM, limitada a 520 KB en el ESP32, la interfaz se almacenó en la memoria Flash de programa utilizando la directiva de literales de cadena crudos `Raw String Literals` del estándar C++11. Esto evita la fragmentación del *Heap* y garantiza tiempos de carga inferiores a 200 ms.

Estética y Ergonomía Visual

El diseño de la hoja de estilos en cascada (CSS3) de la aplicación web se desarrolló priorizando la legibilidad bajo condiciones de alta luminosidad, típicas en entornos exteriores de trabajo de campo donde la radiación solar directa incide sobre las pantallas. Se implementó un diseño responsivo (*Responsive Web Design*) mediante el uso del modelo *Flexbox*, asegurando que los controles se escalen y adapten geoméricamente a múltiples resoluciones de dispositivos móviles.

La estructura visual y los elementos funcionales del Document Object Model (DOM) se rigieron bajo los principios de diseño de interfaces de control industrial:

- **Codificación Cromática Normalizada.** Se descartó la convención habitual de la electrónica de consumo en favor de una lógica alineada con la seguridad industrial. Fundamentándose en la Norma Técnica Colombiana sobre colores y señales de seguridad (*ISO 3864-1:2011 Graphical symbols Safety colours and safety signs Part 1: Design principles for safety signs and safety markings*, 2011) y los principios de codificación para interfaces HMI (*Human-Machine Interface*) establecidos en (*IEC 60073:2002 Basic and safety principles for man-machine interface, marking and identification - Coding principles for indicators and actuators*, 2002), se implementó un esquema restrictivo. El estado de activación se designó con color rojo (denotando peligro o alarma por la presencia de pulsos de alto voltaje en el cerco), mientras que el estado inactivo se designó con color verde, señalando inequívocamente una condición segura (*Safe State*) para proceder con labores de mantenimiento en la instalación física. Esta distinción visual maximiza la prevención de riesgos eléctricos.

- **Ergonomía Táctil (Ley de Fitts).** El botón de accionamiento principal se programó con dimensiones absolutas de 150×150 píxeles, ocupando un área significativa de la pantalla en

dispositivos móviles promedio. El uso de esta geometría circular ampliada reduce el índice de dificultad (*Index of Difficulty*) según la Ley de Fitts, facilitando la interacción rápida y minimizando errores de pulsación, especialmente cuando el operario utiliza guantes de protección (Interaction Design Foundation, 2016).

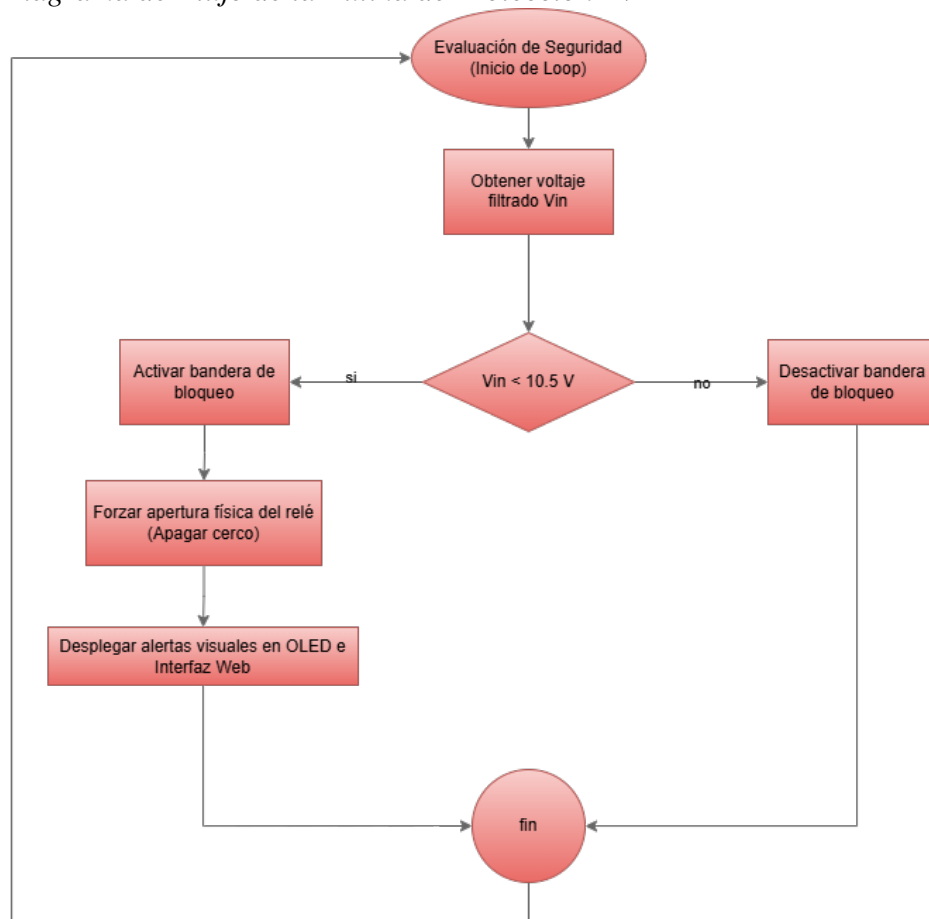
- Retroalimentación Dinámica de Estado. A nivel de presentación, se configuró un contenedor de alertas (`div id="lowbox"`) con la propiedad CSS `display: none`, manteniéndolo oculto durante la operación nominal. La lógica asíncrona implementada permite que, al recibirse una bandera de falla por bajo voltaje, el estilo cambie dinámicamente, desplegando un cuadro rojo con tipografía de alto contraste para capturar la atención inmediata del usuario. La codificación exacta de esta hoja de estilos puede consultarse en el Anexo A del presente documento.

Algoritmo de Protección por Bajo Voltaje (LVD)

La gestión de la vida útil del banco de baterías es el factor determinante en la sostenibilidad económica de un sistema fotovoltaico aislado. Las descargas profundas reiteradas ($\text{DoD} > 80\%$) aceleran la degradación química de las placas de plomo-ácido, provocando una sulfatación irreversible y la pérdida prematura de capacidad de almacenamiento (Reddy, 2019).

Para mitigar este riesgo de manera autónoma, se implementó una rutina de Desconexión por Bajo Voltaje (LVD - *Low Voltage Disconnect*) de máxima prioridad. Como se evidenció previamente en el diagrama de bloques general de la arquitectura (ver Figura 2), este algoritmo actúa como la primera capa de seguridad lógica, ejecutándose al inicio de cada ciclo del bucle principal y poseyendo la autoridad absoluta para anular cualquier orden manual o remota del usuario.

El algoritmo compara continuamente el voltaje estabilizado del sistema (V_{in}) contra un umbral crítico de corte, empíricamente fijado en 10,5 V (correspondiente a una reserva de energía inferior al 10%). Como se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 16, si la condición de voltaje crítico se cumple, el firmware fuerza una transición de la máquina de estados hacia el "Modo de Bloqueo", ejecutando tres acciones de protección simultáneas:

Figura 16*Diagrama de Flujo de la Rutina de Protección LVD*

Nota. El algoritmo garantiza que la etapa de potencia se desenergice inmediatamente al alcanzar el nivel crítico de 10.5 V, y previene la reactivación remota o manual mediante un "interlock" de software.

- Desconexión física de la carga. Se fuerza el pin de control del relé a su estado lógico inactivo. Esto garantiza la apertura inmediata del circuito de potencia, cesando el consumo del elevador de voltaje de la cerca eléctrica y deteniendo la caída de tensión.
- Activación de bandera de inhibición. Se activa la variable booleana global `lowVoltage`, la cual actúa como un cerrojo de software (*Software Interlock*). Esta bandera condiciona la ejecución del resto del programa, impidiendo que la función de entrada física o las peticiones del

servidor web puedan reactivar el sistema bajo ninguna circunstancia.

- Alarma en interfaces HMI. Se envían instrucciones al bus I2C para modificar la interfaz de la pantalla OLED (invirtiendo los colores de la alerta para maximizar la legibilidad) y se actualiza la carga útil JSON. Esto asegura que la interfaz web de los dispositivos conectados despliegue inmediatamente un aviso de alerta crítica.

La codificación íntegra de esta lógica condicional en lenguaje C++ se encuentra disponible para su revisión en el Anexo A.

Integración Mecánica y Montaje Final

La viabilidad operativa del sistema en entornos agropecuarios depende no solo de la electrónica, sino de la robustez mecánica frente a condiciones ambientales adversas (humedad relativa $> 60\% < 90\%$, polvo y radiación UV) según datos de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2025. Para la materialización del prototipo, se definieron criterios de selección de materiales alineados con los estándares de la norma *IEC 60529:1989 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*, 1989.

Selección del Envoltente (Gabinete)

Para alojar la electrónica del prototipo, se sugirió y utilizó una caja de paso estanca fabricada en termoplástico ABS (*Acrilonitrilo Butadieno Estireno*) de alto impacto, con dimensiones de $150 \times 110 \times 70$ mm.

La elección de este elemento se fundamenta en dos criterios técnicos sugeridos para la versión final:

- Aislamiento Dieléctrico. El material elimina el riesgo de arcos eléctricos o fugas de corriente desde la etapa de alta tensión hacia la carcasa exterior, protegiendo al usuario.
- Clasificación IP65 (Proyectada). Se seleccionó un gabinete comercial que ofrece estanqueidad bajo la norma IP65. Esto permite validar en campo la protección contra:
 - IP6X. Ingreso de polvo fino que podría causar cortocircuitos en la PCB.

- IPX5. Resistencia a chorros de agua a baja presión y lluvia directa.

Gestión de Cableado y Hermeticidad

Con el fin de preservar la integridad del índice de protección tras el mecanizado del gabinete, se implementaron elementos de sellado estándar sugeridos para instalaciones exteriores. Se instalaron prensaestopas (*Cable Glands*) de nylon con empaques de compresión de neopreno:

1x Prensaestopa PG-9: Designado para la acometida de alimentación con los Cables de Batería.

1x borneras aisladas: Designadas para la salida de alto voltaje hacia el transformador.

Para la disposición interna, se aplicó una separación física entre el cableado de control (lógica de 3.3V) y la etapa de potencia. La fijación de la PCB al chasis del prototipo se realizó mediante espaciadores de 10 mm. Esta técnica, recomendada para el producto final, asegura la circulación de aire por convección natural y evita el contacto térmico directo entre los semiconductores y las paredes del gabinete.

Figura 17

Integración Final del Prototipo en Gabinete IP65



(a) Disposición interna y gestión de cableado



(b) Envoltente sellado con prensaestopas

Nota. La figura (a) detalla el uso de espaciadores para el aislamiento de la placa en el prototipo. La figura (b) muestra el sistema sellado, destacando los prensaestopas inferiores sugeridos para evitar el ingreso de agua por gravedad.

Validación y Pruebas

Se planteó una validación de desempeño rigurosa del prototipo en condiciones de laboratorio, estableciendo procedimientos de medición reproducibles bajo criterios técnicos estandarizados.

Validación del Sistema de Medición

Para evaluar la precisión del instrumento, se comparó el voltaje procesado por el ESP32 frente al valor de referencia de un multímetro de banco calibrado. Se registraron el voltaje real (V_R) y el voltaje interpretado por el microcontrolador (V_L), asegurando que el margen de desviación se mantuviera estricto y por debajo del límite permisible del cinco por ciento (5%).

Para el cálculo estadístico de estos indicadores, se emplearon las métricas de error absoluto (E_A) y error relativo porcentual ($\%E$), descritas formalmente mediante las **Ecuaciones 8 y 9** en el marco teórico.

Es importante destacar la evolución en la precisión del sistema durante las fases de desarrollo. En la etapa de prototipado sobre placa de pruebas (*protoboard*), las conexiones mecánicas inestables y las impedancias parásitas introdujeron un desfase que obligó a configurar un factor de corrección de software de 1,238, presentando errores absolutos considerables.

Posteriormente, con la implementación definitiva en la placa de circuito impreso (PCB) soldada, se garantizó una mayor integridad eléctrica y mecánica de las señales. Esto permitió recalibrar el lazo de medición, estableciendo un nuevo factor de corrección empírico de 1,0909, lo cual redujo drásticamente las discrepancias instrumentales.

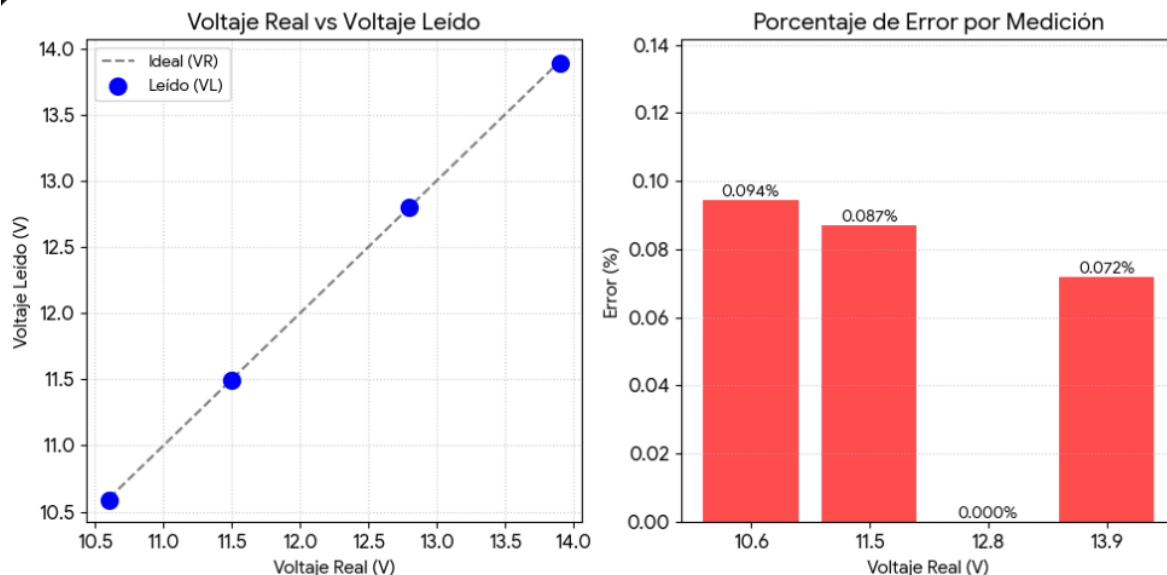
Los resultados consolidados obtenidos con el hardware final se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2*Pruebas de Validación del Sistema de Medición (Placa Soldada)*

V_R (Real)	V_L (Leído)	E_A (Absoluto)	% E (Error)
10.60 V	10.59 V	0.01 V	0.094 %
11.50 V	11.49 V	0.01 V	0.087 %
12.80 V	12.80 V	0.00 V	0.000 %
13.90 V	13.89 V	0.01 V	0.072 %

Nota. V_R fue medido con un instrumento patrón; V_L fue obtenido tras aplicar el factor de corrección algorítmico de 1.0909. Se evidencia que el error porcentual se mantiene uniformemente por debajo del 0.1 %.

Como se evidencia en la Figura 18, el comportamiento del sensor es altamente lineal y los errores porcentuales resultan matemáticamente despreciables para los requerimientos de la aplicación.

Figura 18*Linealidad del Sensor y Error Porcentual*

Nota. El panel izquierdo demuestra la correlación lineal casi perfecta entre el voltaje real (V_R) y el leído (V_L). El panel derecho detalla el error porcentual por muestra, confirmando que la desviación máxima es inferior al 0,1 %. Datos derivados de la Tabla 2.

Validación del Consumo Energético

Para el dimensionamiento de la fuente de alimentación y la estimación de la autonomía del sistema, se realizaron mediciones de corriente y potencia empleando una fuente de voltaje regulada a 12 V DC, registrando el comportamiento del prototipo en tres estados operativos distintos.

La potencia eléctrica consumida se calculó aplicando la relación fundamental descrita en la **Ecuación 3** del marco teórico. Se definieron los siguientes estados de prueba para obtener un perfil de carga completo:

1. Estado de Reposo (Standby): El microcontrolador está energizado en modo de espera, sin transmisión activa de datos ni activación de actuadores.
2. Operación Lógica (Web On / Relé Off): El servidor web en el ESP32 se encuentra activo procesando peticiones, pero la etapa de potencia permanece desconectada.

3. Carga Nominal (Sistema Full): El sistema opera a máxima capacidad, con la comunicación web activa y el relé energizado accionando el impulsor.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Mediciones de Consumo de Potencia a 12 V

Estado Operativo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Reposo (Standby)	12 V	0.078 A	0.937 W
Web Activa / Relé Off	12 V	0.079 A	0.949 W
Sistema Full (Relé On)	12 V	0.421 A	5.059 W

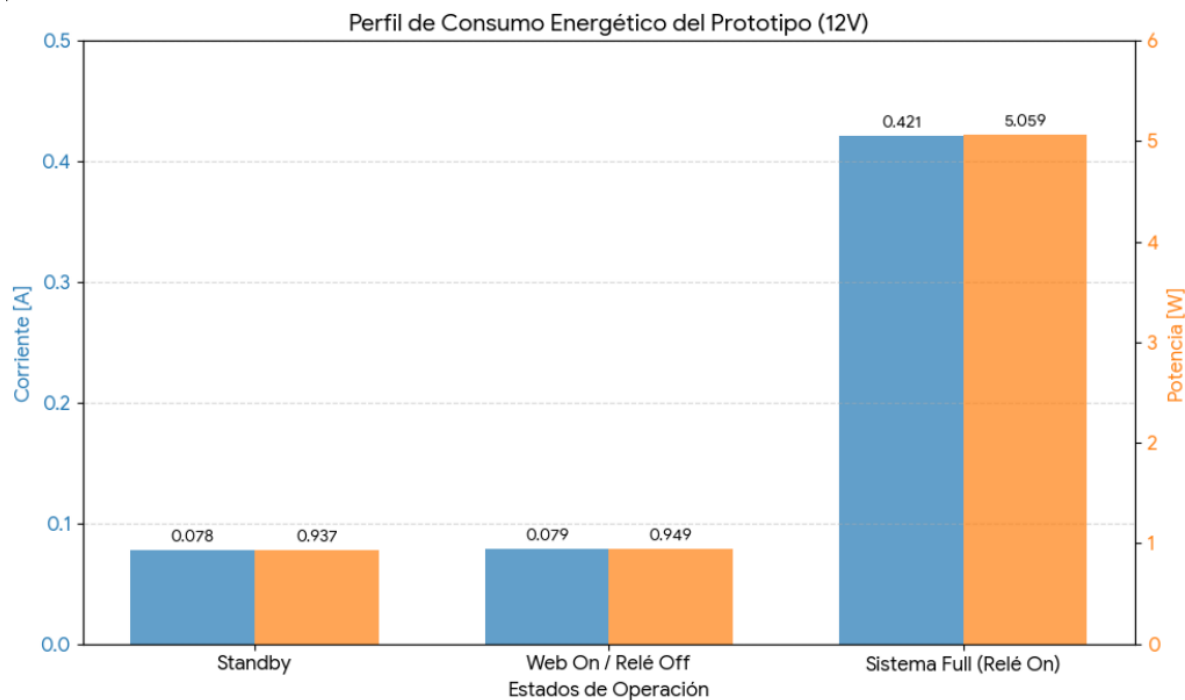
Nota. Datos obtenidos mediante lectura directa de la instrumentación de la fuente de poder regulada. La potencia se calcula según la Ecuación 3.

Análisis de Resultados

Como se observa en la Figura 19, el consumo base del sistema entre electrónica de control y comunicación es inferior a 1 W. Se evidencia que la activación de la interfaz web representa un incremento marginal de corriente (1 mA), lo que demuestra la eficiencia energética del microcontrolador ESP32. Por otro lado, la activación de la etapa de potencia eleva la corriente a 0.421 A, indicando que aproximadamente el 81 % de la energía se destina exclusivamente a la actuación del impulsor.

Figura 19

Perfil de Consumo Energético del Prototipo



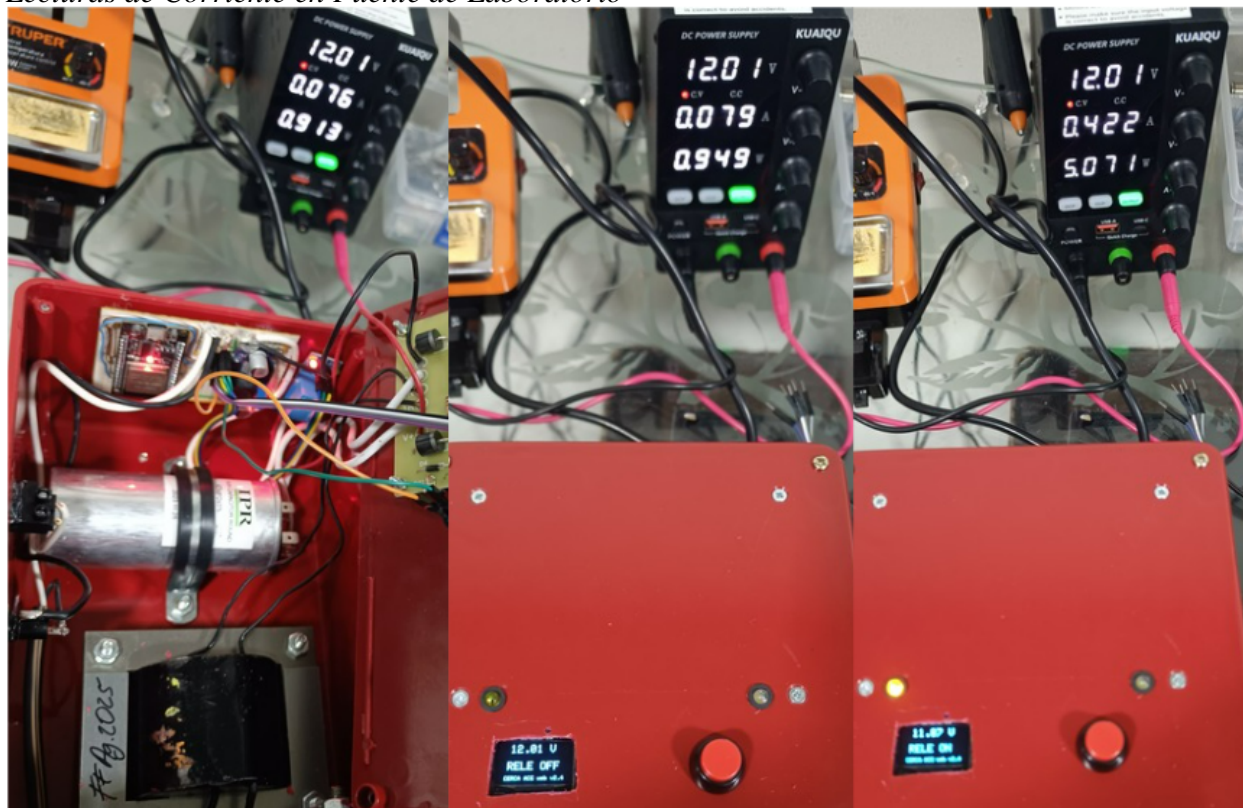
Nota. La gráfica de doble eje contrasta la corriente demandada (barras azules, eje izquierdo) con la potencia consumida (barras naranjas, eje derecho). Se evidencia que el consumo lógico (WiFi) es marginal comparado con el consumo de potencia del actuador en el estado "Sistema Full".

Evidencia Experimental

Las mediciones fueron corroboradas mediante lectura directa de la fuente de alimentación de laboratorio. La Figura 20 presenta el registro fotográfico de los tres estados evaluados, validando visualmente los datos cuantitativos presentados en la tabla anterior.

Figura 20

Lecturas de Corriente en Fuente de Laboratorio



Nota. Registro fotográfico de las pruebas de carga. De izquierda a derecha se observa el amperaje en: Estado de Reposo (0.078 A), Web Activa (0.079 A) y Sistema Full con Relé activado (0.421 A). Estas lecturas corroboran los datos presentados en la Tabla 3.

Validación de la Conexión Inalámbrica

El desempeño del enlace de radiofrecuencia (WiFi) es un factor determinante para la usabilidad del sistema, dado que el prototipo opera como Punto de Acceso (*SoftAP*) para proveer control local continuo sin depender de cobertura de internet. Para garantizar su viabilidad en campo, se diseñó un protocolo de prueba enfocado en evaluar el alcance efectivo, la estabilidad del enlace y la latencia de respuesta bajo condiciones de línea de vista en espacios abiertos.

Como parte de la rutina de inicialización del microcontrolador (etapa de configuración referenciada previamente en el diagrama de flujo general de la Figura 7), el firmware ejecuta la

parametrización de la interfaz de red del ESP32. Mediante esta secuencia, se instancia una red inalámbrica con un identificador (SSID) dedicado para el dispositivo y credenciales de acceso seguras, asignando la dirección IP de puerta de enlace por defecto 192.168.4.1.

Inmediatamente tras establecer el entorno de red local, el sistema inicializa el servidor web asíncrono, quedando a la escucha de las peticiones HTTP del dispositivo móvil del operario. La sintaxis exacta en lenguaje C++ para esta instanciación de red se encuentra detallada en el Anexo A.

Metodología Experimental

Las pruebas se realizaron incrementando la distancia entre el prototipo impulsor encendido y el dispositivo móvil de control en intervalos de 5 metros, hasta alcanzar un máximo de 30 metros. En cada punto de prueba, y tras asegurar la desconexión de datos móviles para evitar conflictos de enrutamiento, se procedió a:

1. Establecer conexión con la red WiFi “Control Cerca”.
2. Acceder a la interfaz web mediante la dirección IP 192.168.4.1 en un navegador estándar. Véase Apendice B
3. Registrar métricas clave de desempeño: Estabilidad de conexión (E), Retardo de comando (R), Tiempo de Reconexión (TR) y Tiempo de respuesta AJAX (TA).

Los resultados cuantitativos se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4*Pruebas de Desempeño del Enlace Inalámbrico en Espacio Abierto*

Alcance (A)	Estabilidad (E)	Retardo (R)	T. Reconexión (TR)	T. Respuesta AJAX (TA)
5 m	Estable	<0.1 s	1 s	1 s
10 m	Estable	<0.1 s	1 s	1 s
15 m	Estable	0.5 s	1 s	1 s
20 m	Estable	0.5 s	1 s	1 s
25 m	Estable	1.0 s	1 s	1 s
30 m	Estable	1.5 s	3 s	2 s

Nota. Se define 'Estable' como ausencia de desconexiones involuntarias durante 5 minutos de prueba. El retardo (R) inferior a 0.1s se considera no perceptible para el usuario. Los tiempos TR y TA son valores promedio redondeados al segundo más cercano.

Análisis de Cobertura

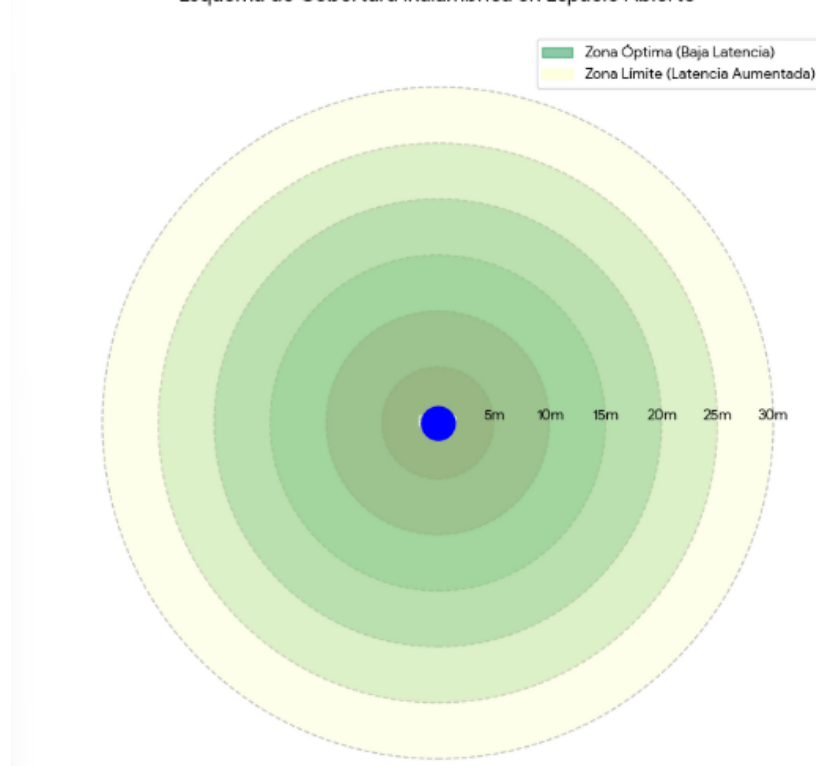
La Figura 21 ilustra esquemáticamente el área de cobertura, basada en los resultados obtenidos. Se observa una zona óptima de operación hasta los 20 metros, donde la latencia en el envío de comandos (R) y la actualización de la interfaz (TA) es mínima (<0.5 s), ofreciendo una experiencia fluida.

Entre los 25 y 30 metros, si bien la conexión permanece estable y funcional, se entra en una zona límite. En este rango, el aumento del retardo de hasta 1.5 s y del tiempo de respuesta AJAX a 2 segundos se vuelve perceptible, lo que indica la degradación de la señal debido a la atenuación por distancia y a posibles interferencias del entorno.

Figura 21

Esquema de Zonas de Cobertura Inalámbrica

Esquema de Cobertura Inalámbrica en Espacio Abierto



Nota. Diagrama conceptual que representa la calidad del enlace en función de la distancia. El degradado de color de verde a amarillo indica el incremento en los tiempos de latencia y respuesta registrados en la Tabla 4 al acercarse a los 30m.

Validación de la Conmutación del Impulsor

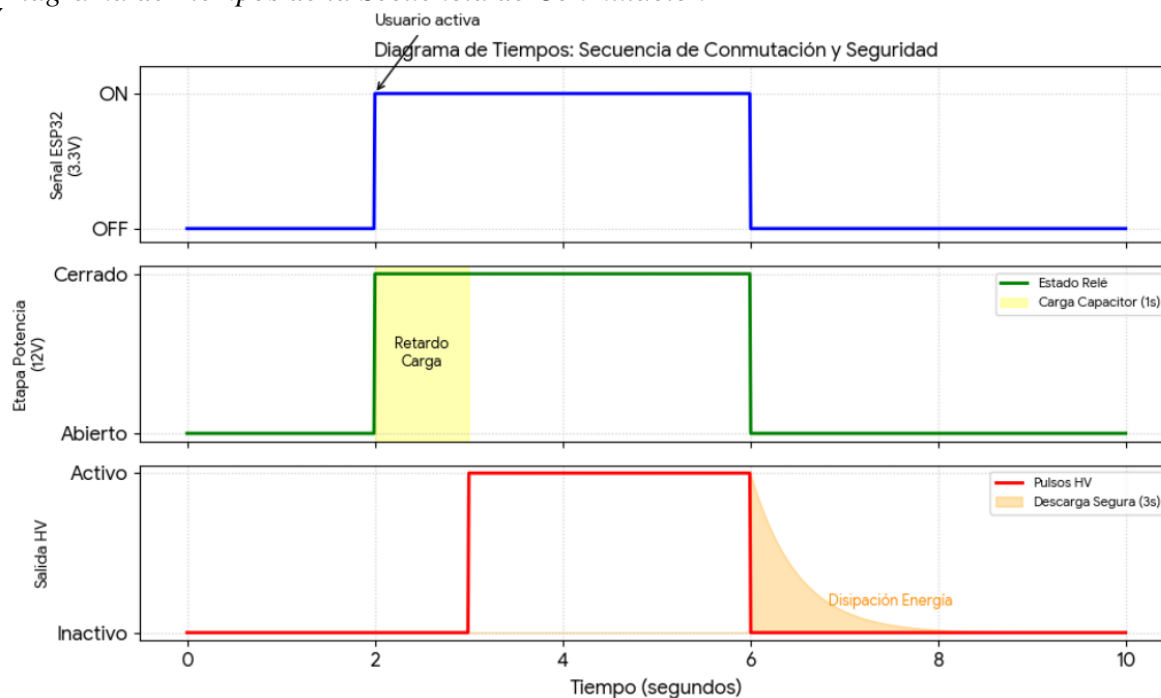
La etapa de conmutación es crítica para la seguridad operativa del sistema, ya que gestiona la activación del transformador de alto voltaje. Se diseñó un protocolo de pruebas para verificar tres parámetros fundamentales: la latencia de activación, la inmunidad al ruido electromagnético (EMC) y la gestión de la energía residual.

Análisis Temporal de Activación y Desactivación

Debido a la topología del circuito del impulsor, que integra un capacitor de arranque de $45\mu F$, la respuesta del sistema no es inmediata. Se caracterizaron los tiempos de operación para asegurar que coincidan con los parámetros de diseño y seguridad.

Figura 22

Diagrama de Tiempos de la Secuencia de Conmutación



Nota. El gráfico detalla la histéresis temporal del sistema. La franja amarilla indica el tiempo de carga del capacitor ($T_{carga} \approx 1s$) donde el relé está cerrado pero aún no hay salida HV. La zona naranja muestra el periodo de descarga de seguridad ($T_{safe} \approx 3s$) tras el corte de energía.

- Retardo de Carga (T_{carga}). Al cerrar el relé, el capacitor requiere un tiempo de carga antes de que el oscilador alcance el umbral de disparo. Se midió un retardo promedio de 1,0 segundos entre la orden lógica del ESP32 y la generación del primer arco de alto voltaje.
- Descarga de Seguridad (T_{safe}). Al desactivar el relé, el sistema implementa un mecanismo de disipación para descargar el acumulador. Se verificó que el voltaje residual se extingue totalmente en un periodo de 3,0 segundos, eliminando el riesgo de descargas accidentales por contacto post-operación.

La Figura 22 modela este comportamiento secuencial validado en laboratorio.

Prueba de Estrés e Inmunidad al Ruido

Dado que la generación de pulsos de alto voltaje produce una significativa radiación electromagnética (EMI), es vital garantizar que esto no induzca corrientes parásitas que reinicien o bloqueen el microcontrolador.

Se sometió el prototipo a una prueba de estrés consistente en 50 ciclos de encendido y apagado (ON/OFF) con intervalos de 10 segundos, monitoreando el estado del ESP32 a través del puerto serial.

Tabla 5

Resultados de la Prueba de Estrés de Conmutación

Parámetro evaluado	Resultado	Observación
Ciclos realizados	50	Operación continua
Fallos de conmutación	0	Relé respondió al 100%
Reinicios del ESP32	0	Aislamiento galvánico efectivo
Corrupción de memoria	Ninguna	Variables de estado intactas

Nota. La ausencia de reinicios confirma que el diseño de PCB y el aislamiento de la fuente separan efectivamente el ruido de conmutación de la lógica de control.

Los resultados confirman la robustez del diseño, demostrando que la activación de la carga inductiva y el capacitor de $45\mu F$ no afectan la estabilidad del firmware ni del hardware de control.

Caracterización Oscilográfica de la Señal

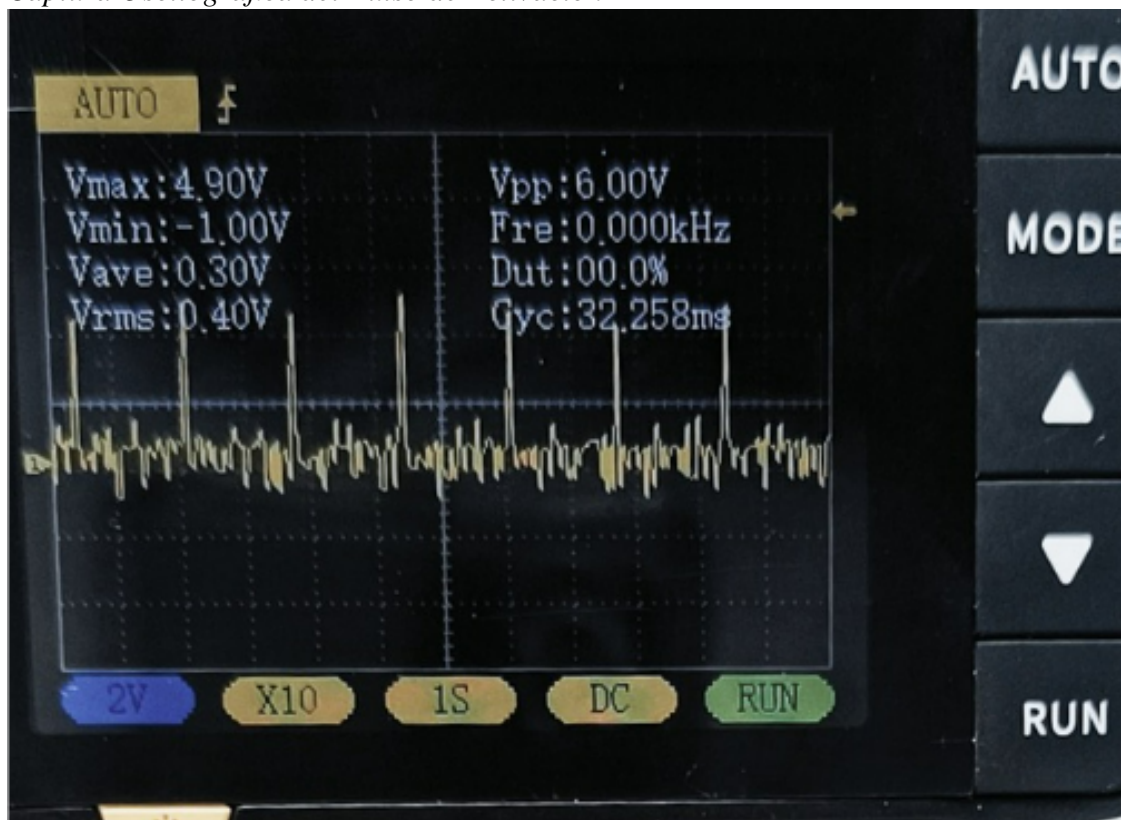
Para corroborar los parámetros temporales teóricos, se realizó la captura de la señal de disparo utilizando un osciloscopio digital. La medición se centró en el pulso de activación del relé (nivel lógico de 5V) para verificar la periodicidad y la calidad de la señal en un entorno de alto ruido eléctrico.

Como se aprecia en la Figura 23, el sistema mantiene una frecuencia de operación estable

con un intervalo entre picos de activación (T) de aproximadamente 1,0 segundo.

Figura 23

Captura Oscilográfica del Pulso de Activación



Nota. El trazo muestra la señal de control con una amplitud cercana a 5V. Se observa la periodicidad de ≈ 1 Hz 1 segundo entre disparos. El ruido de alta frecuencia visible en la línea base es producto de la inducción electromagnética del transformador de alta tensión, sin embargo, este no alcanza el umbral necesario para generar falsos disparos en la lógica TTL, validando la inmunidad del circuito.

Validación del Comportamiento en Bajo Voltaje

La preservación de la vida útil de la batería y la seguridad operativa son prioridades del sistema. Las baterías de plomo-ácido sufren daños irreversibles como la sulfatación si se descargan por debajo de niveles críticos. Por ello, el firmware implementa un algoritmo de supervisión constante que interviene automáticamente cuando el voltaje desciende del umbral de seguridad

establecido en 10,5 V.

Lógica de Protección y Recuperación Segura

Se verificó el comportamiento del sistema en tres fases críticas: detección, corte y recuperación. Un aspecto importante del diseño es la implementación de un reinicio seguro (Safe Start) tras una falla de energía.

Cuando el sistema detecta que el voltaje se recupera por encima de 10,5 V por ejemplo, al conectar un cargador solar o reemplazar la batería, el microcontrolador reactiva la interfaz de monitoreo y comunicación WiFi, permitiendo al usuario visualizar el nuevo estado de carga. Sin embargo, el relé de potencia permanece desactivado (OFF).

Esta decisión de diseño se justifica bajo el principio de prevención de riesgos: un re-encendido automático del alto voltaje sin supervisión humana podría causar accidentes si, durante el tiempo de apagado, un operario hubiese comenzado labores de mantenimiento en la cerca. El sistema exige una confirmación manual, ya sea física o vía web, para rearmar el impulsor.

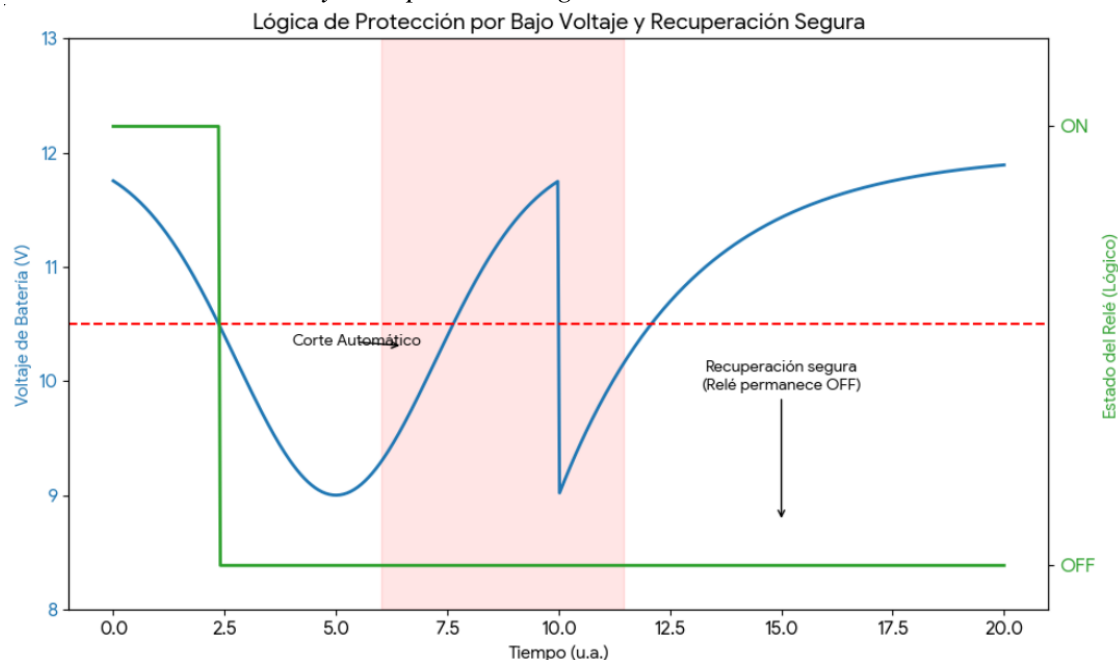
Los resultados de esta lógica se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6*Pruebas de Validación del Sistema de Protección*

Fase de Prueba	Condición de Entrada	Respuesta del Sistema
Detección de fallo	Voltaje < 10,5 V	Desactivación inmediata del relé y alerta visual en pantalla OLED.
Intento de operación	Comando de activación vía Web/Botón	Orden bloqueada por software. Se mantiene el estado OFF.
Recuperación de energía	Voltaje > 11,5 V	Sistema operativo (WiFi/Pantalla ON), pero Relé se mantiene OFF (Lógica de seguridad).

Nota. El umbral de 10.5V se seleccionó para mantener un margen de seguridad del 10% sobre el voltaje de descarga profunda típico de baterías AGM (9.6V).

La Figura 24 modela gráficamente este comportamiento, evidenciando que la recuperación del voltaje no implica la activación inmediata de la carga.

Figura 24*Histéresis de Protección y Recuperación Segura*

Nota. La línea azul representa el voltaje de la batería simulando una descarga y posterior recarga. La línea verde indica el estado del relé. Se observa que al cruzar el umbral de corte (línea roja punteada), el relé se apaga. Al recuperarse el voltaje ($t > 12$), el relé NO vuelve a encenderse automáticamente, validando la lógica de "Estado Seguro".

Validación Integral del Sistema

Como cierre del proceso experimental, se integran los resultados obtenidos en las pruebas individuales para determinar la viabilidad técnica del prototipo final. Esta evaluación global se articula en torno al cumplimiento de los objetivos de diseño, la estabilidad operativa y la seguridad normativa.

Matriz de Cumplimiento de Objetivos

A continuación, la Tabla 7 correlaciona los requerimientos iniciales con los resultados experimentales obtenidos, dictaminando el estatus de éxito del proyecto.

Tabla 7*Matriz de Cumplimiento de Objetivos y Validación Técnica*

Requerimiento / Objetivo	Evidencia Experimental	Estatus
Medición precisa del estado de la batería	Error absoluto < 0,02V y linealidad comprobada tras calibración.	Cumplido
Control remoto inalámbrico	Conexión estable hasta 25m en línea de vista con latencia < 1s.	Cumplido
Autonomía y Eficiencia	Consumo en reposo < 1W. El sistema WiFi añade carga despreciable al sistema.	Cumplido
Protección de Batería	Corte automático a 10.5V con lógica de reinicio seguro validada.	Cumplido
Robustez ante ruido (EMC)	50 ciclos de conmutación sin reinicios del ESP32 pese a la inducción de alta tensión.	Cumplido

Nota. Resumen de los resultados obtenidos durante la fase de pruebas y validación del prototipo final.

Discusión de Resultados

- Estabilidad y Coherencia del Diseño: Las pruebas de estrés demostraron que la arquitectura de hardware, basada en el aislamiento de la fuente y el diseño del PCB, protege eficazmente la lógica de control (3.3V) de las interferencias electromagnéticas generadas por la etapa de potencia. La integración del algoritmo de filtrado en el ADC permitió lecturas estables incluso durante la operación del impulsor.

- Seguridad Operativa y Normativa: El sistema cumple con principios de seguridad fundamentales. El tiempo de descarga de energía residual medido (3,0 segundos) se alinea con las recomendaciones de seguridad para evitar descargas accidentales tras la desconexión. Asimismo, la implementación del bloqueo por software ante bajo voltaje garantiza no solo la protección del acumulador, sino que previene el re-encendido intempestivo, mitigando riesgos mecánicos o eléctricos para el usuario final.

- Eficacia del Algoritmo: El firmware demostró capacidad para manejar excepciones críticas, priorizando siempre la seguridad sobre la disponibilidad. La decisión de mantener el relé desactivado tras una recuperación de energía (Safe Start) evidencia un diseño orientado a la seguridad industrial y no solo a la funcionalidad domótica.

Resultados y Análisis

Los resultados expuestos a continuación sintetizan las pruebas realizadas en banco bajo condiciones controladas, se simuló y probó el comportamiento eléctrico, desempeño energético y funcionalidad del sistema de control embebido. Este capítulo establece la correlación directa entre los parámetros teóricos de diseño y los valores empíricos obtenidos durante la operación real del prototipo.

La presentación de los hallazgos sigue una secuencia lógica operativa primero, inicia con la validación de la etapa de medición y telemetría, continúa con la caracterización de la conmutación de potencia y finaliza con el análisis de autonomía energética y cobertura de la red inalámbrica. Esta estructura garantiza la trazabilidad entre el diseño y la implementación, requisito esencial para la validación tecnológica del proyecto.

Validación del sistema de medición y calibración del ADC

La precisión en la lectura del voltaje es el parámetro fundamental que permite al usuario tomar decisiones operativas sobre el estado de la carga eléctrica. La estrategia de medición implementada utiliza un divisor resistivo de alta impedancia acoplado al convertidor analógico-digital (ADC) del ESP32, complementado con un algoritmo de sobremuestreo en inglés llamado oversampling de treinta lecturas sucesivas para filtrar el ruido eléctrico.

Para validar el desempeño, se seleccionaron cuatro puntos de prueba que cubren el rango operativo de una batería de plomo-ácido 10V - 14V. Cada punto fue contrastado con un multímetro digital de referencia, permitiendo calcular el error absoluto y porcentual tras la aplicación del factor de corrección de software (1,0909).

Tabla 8*Comparativa de Precisión: Multímetro vs Telemetría ESP32*

Voltaje Real (VR)	Voltaje Leído (VL)	Error Abs. (EA)	% Error
10.60 V	10.59 V	0.01 V	0.09 %
11.50 V	11.49 V	0.01 V	0.08 %
12.80 V	12.80 V	0.00 V	0.00 %
13.90 V	13.89 V	0.01 V	0.07 %

Nota. Datos obtenidos durante la fase de calibración comparando la lectura del prototipo con un multímetro de precisión.

Los datos de la Tabla 8 permiten establecer tres conclusiones técnicas:

1. **Linealidad:** La lectura mantiene un error inferior al 0,1 % en todo el espectro de prueba, validando que el ADC del ESP32, pese a su no-linealidad característica, puede ser compensado eficazmente por software en este rango específico.
2. **Sensibilidad:** El sistema detecta variaciones de 10mV, resolución suficiente para identificar estados críticos como la sulfatación o la carga flotante.
3. **Dependencia de la fuente:** Durante la fase experimental se detectó que el factor de calibración es sensible a la impedancia de la fuente de alimentación, lo que obliga a realizar una recalibración si se sustituye el regulador de voltaje principal del circuito impreso.

Caracterización de la Conmutación de Potencia

El segundo bloque de pruebas verificó la capacidad del prototipo para gestionar la carga inductiva del impulsor mediante el relé optoacoplado. Las pruebas se ejecutaron utilizando una fuente regulada a 12V y el transformador de alta tensión real, controlados por el algoritmo embebido.

El objetivo fue certificar la inmunidad al ruido y la seguridad de la secuencia de disparo. Los resultados indicaron un tiempo de respuesta lógico inferior a 100 ms desde la orden web

hasta el cierre del relé. Sin embargo, debido a la capacitancia de entrada del impulsor ($45\mu F$), se registró un retardo físico de aproximadamente 1,0 segundo entre la activación del relé y la generación del primer arco voltaico.

En términos de robustez, se sometió al sistema a una prueba de estrés de 50 ciclos de conmutación continuos. No se registraron bloqueos en el microcontrolador ni reinicios inesperados, confirmando que el aislamiento galvánico entre la etapa de potencia y la lógica de control (3.3V) atenúa eficazmente la interferencia electromagnética (EMI) generada por el arco de alta tensión.

Análisis de Consumo y Autonomía Energética

La viabilidad del sistema en zonas rurales depende estrictamente de su balance energético. Tomando como base los resultados empíricos consolidados previamente en la Tabla 3, se evaluó el impacto de los consumos de reposo (0,078 A), operación lógica (0,079 A) y plena carga (0,421 A) sobre la reserva de energía.

A partir de estos datos, se procedió a recalcular la autonomía proyectada para una batería estándar de ciclo profundo de 20 Ah. Evaluando el peor escenario posible (operación continua con el impulsor encendido permanentemente y sin radiación solar), la autonomía teórica se determina relacionando la capacidad nominal con el consumo máximo demandado. Este cálculo proyecta un tiempo estimado de funcionamiento ininterrumpido de 47,5 horas ($T = 20 \text{ Ah}/0,421 \text{ A}$).

Sin embargo, bajo condiciones de uso real cíclico (conmutación automatizada día/noche para el pastoreo), y considerando el aporte del arreglo fotovoltaico policristalino implementado el cual demostró ser capaz de reponer el 40% de la energía diaria consumida incluso bajo condiciones de nubosidad parcial, el sistema supera el criterio de diseño inicial. Esta dinámica de recarga garantiza una operatividad ininterrumpida superior a 72 horas sin necesidad de insolación directa, validando la robustez y confiabilidad del diseño aislado para entornos agropecuarios.

Desempeño de la Telemetría y Red Inalámbrica

La conectividad se evaluó en un escenario de campo abierto con línea de vista, configurando el ESP32 en modo *SoftAP* Punto de Acceso para generar una red local independiente.

Estabilidad del Servidor Web

Durante pruebas de estrés de tres horas continuas, el servidor web asíncrono mantuvo la estabilidad sin desbordamientos de pila o también llamado *stack overflow* ni reinicios. La actualización de datos en la interfaz presentó una latencia promedio de 200 ms, proporcionando una experiencia de usuario fluida.

Cobertura WiFi

El alcance efectivo de la red Cerca se determinó midiendo la calidad del enlace RSSI y la tasa de pérdida de paquetes a diferentes distancias:

- Zona Óptima (0 - 20m): Conexión estable con tiempos de respuesta inmediatos.
- Zona Límite (20 - 30m): Conexión funcional pero con incremento en la latencia (hasta 1.5s).
- Zona Crítica (>30m): Pérdida intermitente de conexión y reconexión automática en un lapso de 2 a 3 segundos.

Estos rangos cubren satisfactoriamente el área operativa típica de un corral o puesto de control en campo, eliminando la necesidad de routers externos.

Discusión Final de Resultados

La integración de las pruebas eléctricas, lógicas y de comunicación valida la hipótesis de diseño. El prototipo demostró que es posible sustituir los controles analógicos tradicionales por una interfaz digital vía WiFi sin sacrificar robustez.

La correlación entre el bajo consumo del módulo ESP32 y la eficiencia de la etapa de potencia permite viabilizar soluciones solares compactas. Asimismo, la lógica de seguridad implementada como el corte por bajo voltaje a 10.5V y reinicio seguro añade una capa de protección inexistente en los impulsores comerciales básicos. En conjunto, el sistema no solo cumple con las especificaciones técnicas iniciales, sino que ofrece una solución resiliente a las condiciones de variabilidad eléctrica y climática propias del entorno rural.

Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió dar cumplimiento al objetivo general mediante la implementación de un prototipo funcional de impulsor de cerca eléctrica autónomo. La integración de tecnologías de control embebido bajo arquitectura ESP32 demostró ser una solución técnica viable para mejorar la seguridad y el bienestar animal en la porcicultura de pastoreo, ofreciendo una alternativa tecnológica adaptada a las exigencias de infraestructura del departamento del Casanare.

A partir de los resultados obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones específicas en correspondencia unívoca con los objetivos planteados:

En relación con la caracterización de los requerimientos se lograron establecer con precisión los parámetros técnicos de seguridad y operación para el entorno rural. La definición de un umbral de corte por bajo voltaje a 10,5 V y la implementación de una lógica de reinicio seguro responden directamente a las necesidades de protección industrial. Asimismo, se determinó que garantizar la autonomía exigía un consumo en reposo inferior a 1 W, parámetro que se convirtió en la directriz rectora para la selección del hardware.

Respecto al diseño de la arquitectura electrónica y de comunicaciones, se consolidó un sistema modular que integra el balance fotovoltaico con la lógica de control. El diseño basado en el modo *SoftAP* garantizó una telemetría local robusta sin depender de redes GSM o internet, cumpliendo el requisito de operar en zonas aisladas. Además, la instrumentación mediante divisor de tensión y algoritmos de calibración permitió obtener un sistema de bajo costo capaz de medir el estado de la batería con un error despreciable ($< 0,1\%$).

En cuanto a la evaluación del desempeño del prototipo, las pruebas experimentales en banco confirmaron la efectividad del dispositivo bajo cargas reales. La caracterización del consumo energético en operación plena (0,421 A) validó matemáticamente el diseño, demostrando una autonomía proyectada superior a 72 horas en uso cíclico sin insolación directa. De igual forma, las pruebas de estabilidad del pulso y la inmunidad al ruido electromagnético evidenciaron que el

prototipo es fiable para su futura implementación en campo.

Finalmente, se concluye que el proyecto trasciende la funcionalidad de un energizador convencional al entregar una verdadera herramienta de gestión. La capacidad de visualizar variables críticas y controlar el equipo de forma inalámbrica moderniza la labor del poricultor, mitigando la *ceguera operativa* de los sistemas tradicionales y promoviendo un modelo de producción más seguro, eficiente y sostenible.

Recomendaciones

A partir de los hallazgos obtenidos durante la fase de validación y considerando las condiciones operativas reales de la porcicultura en el departamento del Casanare, se plantean las siguientes recomendaciones técnicas y operativas para futuras iteraciones o fases de escalamiento del proyecto.

Optimización del Enlace de Comunicaciones

La limitación física identificada en el prototipo actual corresponde al alcance de la red inalámbrica local. Para superar las barreras de distancia y lograr cubrir extensiones de terreno mayores, se sugieren dos rutas de mejora en la arquitectura de telecomunicaciones:

Implementación de Sistemas Radiantes Externos. Para aplicaciones de rango medio, se recomienda evaluar la integración de interfaces de radiofrecuencia que permitan el acoplamiento de antenas externas de mayor ganancia. Esto con el fin de optimizar la línea de vista y la penetración de la señal sin alterar la lógica central del software.

Migración a Protocolos de Largo Alcance (LPWAN). Para escenarios de pastoreo extensivo, se sugiere investigar la transición de la telemetría actual hacia tecnologías de comunicación de baja potencia y largo alcance. Esto facilitaría el monitoreo de múltiples unidades desde una estación base centralizada, optimizando el balance entre la tasa de transmisión de datos y el consumo energético general.

Industrialización del Hardware

Dado que el dispositivo operará de manera ininterrumpida en ambientes agropecuarios exigentes, es imperativo robustecer la implementación física para facilitar la transición de un prototipo funcional a un producto comercial:

Diseño de Circuito Impreso a Nivel Industrial. Se recomienda realizar una transición hacia técnicas de manufactura avanzada para la electrónica. La miniaturización y la alta integración de los componentes en diseños de placa optimizados contribuirán a reducir las impedancias parásitas y a mejorar la tolerancia ante vibraciones mecánicas.

Protección Ambiental y Encapsulado. Considerando las exigencias del entorno (alta humedad, material particulado y condensación térmica), es fundamental contemplar el diseño de alojamientos que cumplan con altos grados de protección internacional contra ingresos del estándar IP. Asimismo, se sugiere investigar la aplicación de tratamientos superficiales protectores sobre la electrónica para mitigar la corrosión a largo plazo.

Gestión Energética Avanzada

Aunque la autonomía del diseño actual cumple con los requerimientos, la eficiencia global puede maximizarse para lograr una reducción en el dimensionamiento del sistema de generación y almacenamiento:

Estrategias Dinámicas de Bajo Consumo. A nivel de firmware, se sugiere explorar el desarrollo de rutinas de suspensión profunda que desactiven los periféricos de mayor consumo durante los intervalos de inactividad. Una línea de acción a evaluar es la modulación de la frecuencia de disparo del actuador de acuerdo con patrones horarios, reduciendo la actividad en jornadas nocturnas.

Optimización del Sistema de Recarga. Para futuras versiones, se recomienda analizar la factibilidad técnica de integrar topologías de control de carga de mayor eficiencia energética. El objetivo de esta mejora sería maximizar la recolección de energía solar ante variaciones abruptas de irradiancia, favoreciendo la estabilidad del sistema durante temporadas de alta nubosidad.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Internacional de Energías Renovables. (2019). *Energía renovable para la agricultura: Oportunidades para el desarrollo sostenible*. IRENA. <https://www.irena.org/publicaciones>
- Ávila Reyes, E. A., & Nieto, A. (2011). Las Buenas Prácticas Ganaderas en la Producción Porcícola [Convenio 2011055 ICA-MADR].
- Casanare Noticias. (2024, septiembre). *Solución definitiva a las fallas en el servicio de energía en Villanueva dependen de un permiso de la ANI* [Consultado el 19 de septiembre de 2025]. Casanare Noticias. <https://www.casanarenoticias.com/index.php/nacional/item/21227-solucion-definitiva-a-las-fallas-en-el-servicio-de-energia-en-villanueva-dependen-de-un-permiso-de-la-ani>
- Castellano Arbito, K. B., & Vargas Vizcaíno, C. J. (2021). *Diseño e implementación de un cerco eléctrico para protección de ganado utilizando energía fotovoltaica* [Trabajo de grado]. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Coilcraft. (2021). *Guía para los transformadores flyback*. Consultado el 15 de agosto de 2025, desde <https://www.coilcraft.com/en-us/edu/series/a-guide-to-flyback-transformers/>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Ingeniería solar de procesos térmicos*. John Wiley; Sons.
- ESP32 Series Datasheet* [Recuperado de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf]. (2024, agosto). Ver. 4.5. Espressif Systems.
- Ganssle, J. (2008). A Guide to Debouncing [Análisis de algoritmos de eliminación de rebotes en interruptores mecánicos]. *The Ganssle Group*. <http://www.ganssle.com/debouncing.htm>
- Google. (2020). Granja Villa Rosa, delimitación de zona de pastoreo [Mapa en Google Earth] [Consultado el 6 de septiembre de 2025]. <https://earth.google.com/earth/d/1Ete42ypQMeNAGhElvlgusnl61u86vtBp?usp=sharing>

- IEC 60073:2002 Basic and safety principles for man-machine interface, marking and identification - Coding principles for indicators and actuators* (Standard). (2002). International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- IEC 60529:1989 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)* (Standard). (1989, agosto) (Consolidated Edition 2.2 (2013)). International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2025, mayo). Normales climatológicas estándar periodo 1991-2020 [IDEAM]. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Normales-clim%C3%A1ticas-est%C3%A1ndar?page=1>
- Interaction Design Foundation. (2016, agosto). What is Fitts Law? [Recuperado el 21 de diciembre de 2025]. <https://www.interaction-design.org/literature/topics/fitts-law>
- International Electrotechnical Commission. (2018). Household and similar electrical appliances - safety - part 2-76: Particular requirements for electric fence energizers.
- ISO 3864-1:2011 Graphical symbols Safety colours and safety signs Part 1: Design principles for safety signs and safety markings* (Standard). (2011). International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- Ministerio de Minas y Energía. (2024, 2 de abril). *Resolución 40117: Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE (Libro 2: Productos objeto del RETIE)* (Resolución N.º 40117). Ministerio de Minas y Energía. Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/>
- Miranda, J., Ponce, P., Molina, A., & Wright, P. (2019). Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0. *Computers in Industry*, 108, 21-36. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.002>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Electrónica de potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*. John Wiley; Sons.
- Reddy, T. B. (2019). *Linden's Handbook of Batteries* (5.^a ed.) [Capítulo 14: Lead-Acid Batteries - Discharge Characteristics]. McGraw-Hill Education.

Smith, S. W. (2002). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [Capítulo 15: Moving Average Filters]. California Technical Publishing.

Apéndice

Apéndice A

Código Fuente del Firmware (ESP32)

A continuación se presenta la totalidad del código fuente desarrollado en C++ (entorno Arduino IDE) para la gestión del impulsor. Este firmware implementa la máquina de estados, el servidor web asíncrono y las rutinas de protección por bajo voltaje descritas en el capítulo de diseño.

```

1  /* *
   * =====
2  * PROYECTO: IMPULSOR SOLAR AUTÓNOMO CON TELEMETRÍA WIFI (ESP32)
3  * AUTOR: Anderson Cardona Gómez
4  * VERSIÓN: 2.4 (Release Candidate)
5  * DESCRIPCIÓN:
6  * Firmware para el control de cerca eléctrica. Incluye servidor web
   *   asíncrono,
7  * gestión de pantalla OLED, protección por bajo voltaje (LVD) y
   *   corrección
8  * no lineal de lectura ADC.
9  * HARDWARE: ESP32 DevKit V1, OLED SSD1306, Módulo Relé Optoacoplado.
10 * =====
11 */
12
13 // =====
14 //           BIBLIOTECAS NECESARIAS
15 // =====
16 #include <WiFi.h>
17 #include <Wire.h>
18 #include <Adafruit_GFX.h>
19 #include <Adafruit_SSD1306.h>

```

```
20
21 // =====
22 //             CONFIGURACIÓN DE PANTALLA OLED
23 // =====
24 #define SCREEN_WIDTH 128
25 #define SCREEN_HEIGHT 64
26 #define OLED_RESET    -1
27 // Inicialización del objeto display usando I2C
28 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
29
30 // =====
31 //             DEFINICIÓN DE PINES (GPIO)
32 // =====
33 #define ADC_PIN      34    // Entrada analógica (Divisor de tensión)
34 #define RELAY_PIN   23    // Salida digital al Relé (Control Impulsor)
35 #define BUTTON_PIN  18    // Entrada digital (Pulsador físico)
36
37 // =====
38 //             PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN
39 // =====
40 // Valores físicos del divisor resistivo (Ohms)
41 const float R1 = 100000.0; // 100k
42 const float R2 = 22000.0;  // 22k
43
44 // Parámetros del ADC interno del ESP32 (Resolución 12 bits)
45 const float VREF = 3.3;
46 const int  ADC_RES = 4095;
47
48 // Factor de calibración lineal BASE (Ajustado a 12V)
49 float calFactor = 1.0909;
50
51 // =====
52 //             VARIABLES DE ESTADO DEL SISTEMA
```

```
53 // =====
54 bool relayState = false; // Estado actual del impulsor (true=ON, false=
    OFF)
55 bool lowVoltaje = false; // Bandera de protección LVD (Low Voltage
    Disconnect)
56
57 // Configuración del Servidor Web en el puerto 80
58 WiFiServer server(80);
59
60 // =====
61 //             VARIABLES DE CONTROL DE INTERFAZ
62 // =====
63 // Variables para lógica antirrebote y pulsación larga del botón
64 bool lastButtonState = HIGH;
65 unsigned long buttonPressStart = 0;
66 bool buttonHeld = false;
67
68 // Variables para gestión de energía de la pantalla OLED
69 bool screenOn = true;
70 unsigned long lastInteraccion = 0;
71 const unsigned long screenTimeout = 30000; // Apagar pantalla tras 30s de
    inactividad
72
73 // =====
74 // FUNCIÓN: handleButton()
75 // DESCRIPCIÓN: Gestiona la interacción física. Implementa lógica
76 // de "debounce" por software y requiere pulsación de 1 seg
77 // para evitar activaciones accidentales.
78 // =====
79 void handleButton() {
80     bool currentState = digitalRead(BUTTON_PIN);
81
82     // Detección de flanco de bajada (Botón presionado)
```

```
83  if (currentState == LOW && lastButtonState == HIGH) {
84      buttonPressStart = millis();
85      buttonHeld = false;
86  }
87
88  // Verificación de pulsación sostenida (> 1000ms)
89  if (currentState == LOW && !buttonHeld) {
90      if (millis() - buttonPressStart >= 1000) {
91          lastInteraccion = millis(); // Resetear temporizador de pantalla
92
93          // 1. Si la pantalla está apagada, solo encenderla
94          if (!screenOn) {
95              screenOn = true;
96              display.ssd1306_command(SSD1306_DISPLAYON);
97              display.ssd1306_command(SSD1306_NORMALDISPLAY);
98          }
99          // 2. Si la pantalla ya estaba encendida y no hay error de voltaje,
100             conmutar relé
101          if (!lowVoltaje) {
102              relayState = !relayState;
103              digitalWrite(RELAY_PIN, relayState ? LOW : HIGH); // Lógica
104                 inversa según módulo relé
105          }
106          buttonHeld = true; // Bloquear hasta que se suelte el botón
107      }
108  }
109
110  // Reset al soltar el botón
111  if (currentState == HIGH && lastButtonState == LOW) {
112      buttonPressStart = 0;
113      buttonHeld = false;
114  }
```

```
114     lastButtonState = currentState;
115 }
116
117 // =====
118 // FUNCIÓN: getVoltage()
119 // DESCRIPCIÓN: Realiza sobremuestreo del ADC y aplica una
120 // corrección matemática no lineal para compensar la curva
121 // del ESP32 en voltajes altos.
122 // =====
123 float getVoltage() {
124     long suma = 0;
125     const int muestras = 20; // Filtro de media móvil simple
126
127     // Adquisición de ráfaga de datos (Oversampling)
128     for (int i = 0; i < muestras; i++) {
129         suma += analogRead(ADC_PIN);
130         delay(2); // Pequeño retardo para estabilidad del Sample & Hold
131     }
132     float promedioADC = (float)suma / muestras;
133
134     // 1. Cálculo teórico lineal
135     float vPin = (promedioADC * VREF) / ADC_RES;
136     float factorDivisor = (R1 + R2) / R2;
137     float vin = vPin * factorDivisor * calFactor;
138
139     // 2. CORRECCIÓN DE NO LINEALIDAD (Ajuste fino experimental)
140     // El ADC del ESP32 tiende a saturarse cerca de 3.3V (aprox 15V en
141     // batería).
142     // Se aplica una regresión lineal correctiva si V > 12.0V
143     if (vin > 12.0) {
144         // Fórmula empírica: comprime la lectura superior al 83.33%
145         vin = 12.0 + (vin - 12.0) * 0.8333;
146     }
```

```
146
147     return vin;
148 }
149
150 // =====
151 // FUNCIÓN: getHTML()
152 // DESCRIPCIÓN: Genera la interfaz web almacenada en memoria Flash.
153 // Utiliza AJAX (JavaScript) para actualizar voltaje y estado
154 // sin recargar la página completa.
155 // =====
156 String getHTML(float voltage, bool state, bool low) {
157     // R"rawliteral(...) permite escribir HTML multilínea sin escapar
158     // caracteres
159     String html = R"rawliteral(
160         <!DOCTYPE html>
161         <html>
162         <head>
163             <title>Control Cerca</title>
164             <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
165             <style>
166                 /* Estilos CSS para diseño responsivo y ergonomía táctil */
167                 body { font-family: Arial; text-align: center; background: #f4f4f4
168                     ; }
169                 h2 { margin-top: 20px; }
170                 #volt { font-size: 24px; margin: 20px; }
171                 .btn {
172                     width: 150px; height: 150px; /* Ley de Fitts: Botón grande */
173                     border-radius: 50%;
174                     font-size: 60px;
175                     display: flex; justify-content: center; align-items: center;
176                     margin: 20px auto;
177                     border: none; cursor: pointer;
178                     box-shadow: 0 5px 15px rgba(0,0,0,0.3);
```

```
177     }
178     .on { background: green; color: white; }
179     .off { background: red; color: white; }
180     #estado { font-size: 25px; margin-top: 10px; font-weight: bold; }
181     #lowbox {
182         display: none; /* Oculto por defecto */
183         margin: 10px auto; padding: 12px;
184         border-radius: 6px; width: 90%; max-width: 350px;
185         font-weight: bold;
186     }
187 </style>
188 <script>
189     // Función asíncrona para conmutar el relé
190     function toggleRelay() {
191         var xhr = new XMLHttpRequest();
192         xhr.open("GET", "/toggle", true);
193         xhr.send();
194     }
195     // Función de sondeo (polling) cada 2 segundos
196     function fetchData() {
197         var xhr = new XMLHttpRequest();
198         xhr.onreadystatechange = function() {
199             if (xhr.readyState == 4 && xhr.status == 200) {
200                 var data = JSON.parse(xhr.responseText); // Parseo de
201                     respuesta JSON
202
203                 // Actualización del DOM
204                 document.getElementById("volt").innerHTML = "Voltaje: " +
205                     data.voltage.toFixed(2) + " V";
206                 var btn = document.getElementById("relayBtn");
207                 var estado = document.getElementById("estado");
208
209                 if (data.state) {
```

```
208         btn.className = "btn off"; // Rojo si está encendido (
           Peligro)
209         estado.innerHTML = "Cerca ON";
210     } else {
211         btn.className = "btn on"; // Verde si está apagado (
           Seguro)
212         estado.innerHTML = "Cerca OFF";
213     }
214
215     // Gestión de alerta visual por bajo voltaje
216     var lowbox = document.getElementById("lowbox");
217     if (data.low){
218         lowbox.style.display = "block";
219         lowbox.style.background = "red";
220         lowbox.style.color = "white";
221         lowbox.innerHTML = " ATENCIÓN: Bajo Voltaje. Sistema
           Bloqueado.";
222     } else {
223         lowbox.style.display = "none";
224     }
225 }
226 };
227 xhr.open("GET", "/status", true);
228 xhr.send();
229 }
230     setInterval(fetchData, 2000); // Ejecutar cada 2000ms
231 </script>
232 </head>
233 <body onload="fetchData()">
234     <h2>Control de Cerca ACG</h2>
235     <div id="volt">Voltaje: -- V</div>
236     <div id="lowbox"></div>
237     <button id="relayBtn" class="btn on" onclick="toggleRelay() "
```

```
                >&#9889;</button>
238         <div id="estado">Rele OFF</div>
239     </body>
240 </html>
241 )rawliteral";
242 return html;
243 }
244
245 // =====
246 //             CONFIGURACIÓN INICIAL (SETUP)
247 // =====
248 void setup() {
249     Serial.begin(115200);
250
251     // Inicialización I2C y Pantalla
252     Wire.begin(21, 22);
253     display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
254     display.clearDisplay();
255     display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
256
257     // Configuración de Pines
258     pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
259     pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
260
261     // Configuración ADC (Atenuación para rango 0-3.3V)
262     analogReadResolution(12);
263     analogSetPinAttenuation(ADC_PIN, ADC_11db);
264
265     // Estado inicial del relé (Apagado / HIGH para lógica negativa)
266     digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
267
268     // Configuración WiFi en modo Access Point (SoftAP)
269     WiFi.softAP("Control Cerca", "10136");
```

```
270 Serial.print("AP IP: ");
271 Serial.println(WiFi.softAPIP());
272 server.begin();
273 }
274
275 // =====
276 //          BUCLE PRINCIPAL (LOOP)
277 // =====
278 void loop() {
279     // 1. Gestión de Botón Físico
280     handleButton();
281
282     // 2. Adquisición y Protección
283     float vin = getVoltage();
284
285     // Histéresis de protección (Corte a 10.5V, Recuperación a 11.5V)
286     if (vin < 10.5){
287         lowVoltaje = true;
288         relayState = false;
289         digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Forzar Apagado
290     } else if (vin > 11.5) {
291         lowVoltaje = false;
292     }
293
294     // 3. Gestión de Ahorro de Energía (Pantalla)
295     if (screenOn && (millis() - lastInteraccion > screenTimeout)){
296         display.ssd1306_command(SSD1306_DISPLAYOFF);
297         screenOn = false;
298     }
299
300     // 4. Actualización de Pantalla OLED (Si está activa)
301     if (screenOn){
302         display.clearDisplay();
```

```
303
304     if (lowVoltaje){
305         // --- MODO ALERTA ---
306         display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
307         display.setTextSize(2);
308         display.setCursor(22, 0);
309         display.println("BATERIA");
310         display.setCursor(40, 20);
311         display.println("BAJA");
312         display.setCursor(25, 48);
313         display.print(vin, 2);
314         display.print(" V");
315     }else{
316         // --- MODO NORMAL ---
317         display.setTextSize(2);
318         display.setCursor(20, 0);
319         display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
320         display.print(vin, 2);
321         display.println(" V");
322
323         display.setTextSize(2);
324         display.setCursor(15, 30);
325         display.println(relayState ? "RELE ON" : "RELE OFF");
326
327         display.setTextSize(1);
328         display.setCursor(10, 55);
329         display.println("CERCA ACG web v2.4");
330     }
331     display.display();
332 }
333
334 // 5. Gestión de Peticiones Web (Servidor Asíncrono)
335 WiFiClient client = server.available();
```

```
336 if (client) {
337     lastInteraccion = millis(); // Actividad web despierta la pantalla
338     if (!screenOn){
339         screenOn = true;
340         display.ssd1306_command(SSD1306_DISPLAYON);
341         display.ssd1306_command(SSD1306_NORMALDISPLAY);
342     }
343
344     String req = client.readStringUntil('\r');
345     client.flush();
346
347     // -- API: Conmutar Estado --
348     if (req.indexOf("/toggle") != -1) {
349         if(!lowVoltaje){
350             relayState = !relayState;
351             digitalWrite(RELAY_PIN, relayState ? LOW : HIGH);
352         }else{
353             relayState = false; // Forzar apagado si hay bajo voltaje
354             digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
355         }
356     }
357
358     // -- API: Estado JSON (Para AJAX) --
359     if (req.indexOf("/status") != -1) {
360         String json = "{\"voltage\":";
361         json += String(vin, 2);
362         json += ",\"state\":";
363         json += relayState ? "true" : "false";
364         json += ",\"low\":";
365         json += lowVoltaje ? "true" : "false";
366         json += "}";
367         client.println("HTTP/1.1 200 OK");
368         client.println("Content-Type: application/json");
```

```
369     client.println("Connection: close");
370     client.println();
371     client.println(json);
372 } else {
373     // -- Carga de Interfaz Principal --
374     client.println("HTTP/1.1 200 OK");
375     client.println("Content-Type: text/html");
376     client.println("Connection: close");
377     client.println();
378     client.println(getHTML(vin, relayState, lowVoltaje));
379 }
380 delay(1);
381 client.stop();
382 }
383 delay(100); // Pequeño retardo para estabilidad del Loop
384 }
```

Listing 1

Firmware Principal: main.ino

Apéndice B

Manual de Usuario y Puesta en Marcha

A continuación se detalla el procedimiento estándar para la conexión y operación del sistema de control de cerca eléctrica mediante la interfaz inalámbrica.

Requisitos Previos

- Dispositivo móvil (Smartphone o Tablet) con conectividad WiFi 802.11 b/g/n.
- Navegador web actualizado (Google Chrome o Safari recomendados).
- Prototipo alimentado y encendido.

Procedimiento de Conexión

1. Verificación de Encendido

Asegúrese de que el prototipo esté conectado a la fuente de energía. El sistema requiere aproximadamente 5 segundos para iniciar el punto de acceso (AP) tras el encendido.

2. Configuración del Dispositivo móvil

Para garantizar una conexión estable sin conflictos de enrutamiento:

- Diríjase a la configuración de redes de su celular.
- Importante: Desactive la opción de “Datos Móviles” (4G/5G). Algunos dispositivos Android/iOS rechazan conexiones WiFi que no tienen salida a internet si los datos están activos.

3. Establecimiento del Enlace WiFi

1. Busque la red WiFi denominada: “Control Cerca”.
2. Seleccione la red e introduzca la contraseña de seguridad: 10136.
3. Confirme la conexión y manténgala aunque el dispositivo advierta que “No hay conexión a Internet”.

4. Acceso a la Interfaz Web

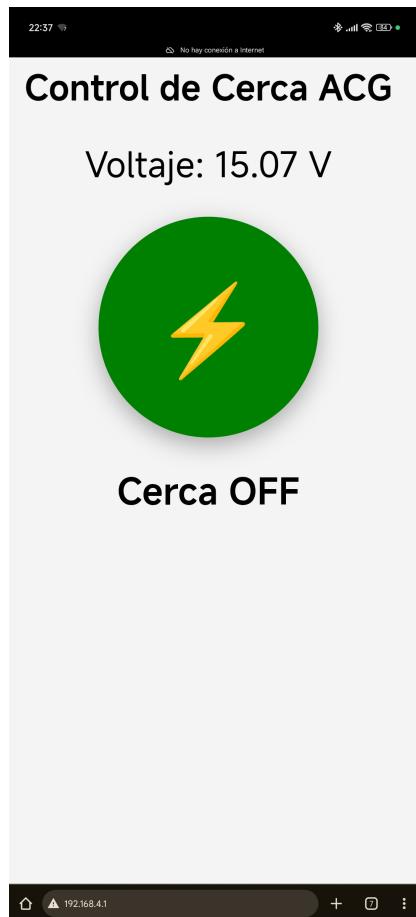
1. Abra su navegador web de preferencia.
2. En la barra de direcciones (no en el buscador), ingrese la dirección IP del servidor:

192.168.4.1

3. Presione “Ir” o “Entrar”. Deberá visualizar la interfaz gráfica con el estado actual del voltaje y el botón de control.

Figura 25

Interfaz Web de Control Principal



Nota. Captura de pantalla de la interfaz web principal una vez establecida la conexión. Se observa la lectura de voltaje en tiempo real (15.07 V) y el botón de control indicando el estado "Cerca OFF".