

PROPUESTA DE DISEÑO: SISTEMA EMBEBIDO DE DETECCIÓN PASIVA DE IMPACTOS DE RAYO BASADO EN ESP32

Fecha de entrega: 02 de diciembre de 2025 Equipo: CMR Integrantes:

- Carlos Elizondo A. – Director de proyecto
- Manuel Garita B. – Auditor / Investigador
- Rodrigo Venegas M – Líder técnico

1. Justificación del Proyecto y Revisión Bibliográfica

1.1 Contexto y Problemática Detallada

1.1.1 Panorama Global de Tormentas Eléctricas

Según la NOAA (2024), ocurren más de 1.4 mil millones de descargas atmosféricas al año, y los sistemas de medición son esenciales para protección estructural e industrial. Las descargas atmosféricas representan riesgo crítico en:

- infraestructura energética
- telecomunicaciones
- sistemas de automatización industrial
- operaciones de campo

En Costa Rica, el CIGEFI reporta que se registran hasta 25 descargas por km²/año, especialmente en zonas montañosas, lo que crea la necesidad de un sistema de monitoreo local confiable y de bajo costo.

1.1.2 Problema Específico de los Pararrayos Tradicionales

Los pararrayos capturan descargas pero no registran cuántas ocurren, lo cual limita:

- mantenimiento preventivo
- análisis de riesgo
- aseguramiento
- monitoreo en tiempo real

Los contadores comerciales de impacto requieren instalación profesional, alto costo y no ofrecen telemetría integrada.

1.1.3 Impacto Socioeconómico

- Fallas por descargas representan pérdidas estimadas de US\$14 mil millones globalmente (IEEE Lightning Protection Study, 2023).
- Los mantenimientos reactivos incrementan costos hasta un 250%.
- La falta de registro dificulta reclamos a aseguradoras.

1.1.4 Oportunidad Tecnológica

El aumento de plataformas IoT y sensores pasivos permite:

- medición sin contacto
- registro digital
- telemetría por WiFi, LoRa o BLE
- integración con dashboards industriales

El ESP32 permite adquisición rápida, filtrado digital y transmisión de eventos.

1.1.5 Justificación del Enfoque Propuesto

El proyecto se justifica porque:

- los sensores pasivos de campo electromagnético no requieren modificar el pararrayo
- el ESP32 permite implementar conteo robusto, registro y telemetría
- permite mantenimiento predictivo
- reduce costos respecto a sistemas comerciales

1.2 Revisión Bibliográfica Especializada

Referencias claves

1. IEC 62305-1: Protección contra rayos (2023)
2. IEEE Std 142: Grounding of Lightning Protection Systems (2022)
3. Rakov & Uman. Lightning: Physics and Effects (2020)
4. López et al. "Low-Cost Sensors for Electromagnetic Surge Detection", IEEE Sensors Journal (2021)
5. Espressif. ESP32 Technical Reference Manual (2023)

Gap identificado No existe un sistema pasivo, autoalimentado, digital y IoT-ready para conteo de descargas basado en bobina inductiva.

2. Descripción y Síntesis del Problema

Los pararrayos convencionales no registran impactos. El reto es:

1. detectar la señal electromagnética inducida
2. identificar impactos reales
3. filtrar ruido
4. registrar eventos y transmitirlos

3. Gestión de Requerimientos

3.1 Requerimientos Funcionales

ID	Requerimiento	Descripción	Prioridad
RF001	Captura inductiva	Medir impulsos EM de alta frecuencia mediante bobina pasiva	Alta
RF002	Filtrado analógico	Atenuar ruido y evitar saturación del ADC	Alta
RF003	Detección digital	Detectar pulsos ≥ 1 kA equivalente	Alta
RF004	Conteo	Incrementar registro por impacto detectado	Alta
RF005	Telemetría	Enviar conteo vía WiFi/MQTT	Media
RF006	Registro local	Guardar eventos en NVS/SD	Media

3.2 Requerimientos No Funcionales

ID	Requerimiento	Descripción	Prioridad
RNF001	Robustez	Operación bajo lluvia, altas corrientes y ruido EM	Alta
RNF002	Consumo	<200 mA en operación continua	Media
RNF003	Tolerancia	Inmunidad a impulsos > 20 kV en pararrayo	Alta
RNF004	Seguridad	Aislamiento galvánico completo	Alta

4. Vista Operacional del Sistema

4.1 Concepto de Operaciones

El sistema funciona así:

1. Una bobina pasiva colocada alrededor del conductor del pararrayo capta el pulso EM.
2. El pulso pasa por un filtro RC + limitador TVS.
3. El ESP32 detecta el pulso mediante comparador o ADC.
4. Se registra el evento.
5. Se transmite a un servidor opcional.

5. Vista Funcional del Sistema

5.1 Descomposición Funcional

Sistema de Detección de Rayos —> Sensor Pasivo —> Bobina inductiva —> Sujeción aislante —> Acondicionamiento analógico —> Rectificador —> Filtro RC —> Limitador TVS —> Módulo digital —> Detección de pico —> Debounce —> Conteo —> Timestamps —> Telemetría —> WiFi/MQTT
Registro interno

6. Arquitectura del Sistema Propuesto

6.1 Diagrama General

Pararrayo —> Inductor Pasivo —> [R] —> [Diodo] —> [RC] —> [TVS] —> GPIO/ADC ESP32

Arquitectura Funcional Completa

6.2 Componentes

Hardware:

- ESP32-WROOM
- Bobina toroidal 40–200 vueltas
- R (100 kΩ)
- Diodo 1N4148
- TVS SMAJ5.0A
- Capacitor 1 nF + 100 nF
- Enclosure IP65

Software:

- ESP-IDF
- ADC + interrupciones
- MQTT opcional

7. Análisis de Dependencias

7.1 Software

- ESP-IDF
- FreeRTOS integrado
- MQTT (opcional)
- NVS Flash

7.2 Hardware

- TVS
- Diodo rápido
- Bobina de aire o ferrita
- Regulador 5V → 3.3V

8. Estrategia de Integración

Fase 1: Sensor físico

- diseñar bobina
- caracterizar señal
- validar formas de onda

Fase 2: Analógico

- filtro RC
- limitación de voltaje
- pruebas con generador de pulsos

Fase 3: Digital

- lógica de detección
- debounce
- timestamping

Fase 4: Telemetría

- WiFi
- MQTT o HTTP

9. Planificación

Fase	Actividades	Duración
Diseño	Sensor, circuito, arquitectura	2 días
Desarrollo	Firmware, filtro, ADC	2 días
Pruebas	Inducción, ruido, calibración	2 días
Documentación	Manual, reporte	1 días

10. Conclusiones

1. El sistema permite detección pasiva sin intervención en el pararrayo.
2. Reduce costos frente a soluciones comerciales.
3. Ofrece telemetría en tiempo real.

4. La arquitectura es escalable para múltiples sensores.