

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.