

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 k Ω)

* 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.