

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Sistema de detección de tormentas
eléctricas con comunicación LoRaWAN y
alimentación fotovoltaica para reducir
riesgos del personal por descargas
atmosféricas, Antamina-2025**

Jordan Angel Luciano Deudor
Edson Jenry Valero Avila

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional"

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Jezzy James Huaman Rojas
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 21 de Setiembre de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Sistema de Detección de Tormentas Eléctricas con Comunicación LoRaWAN y Alimentación Fotovoltaica para Reducir Riesgos del Personal por Descargas Atmosféricas, Antamina-2025

Autor:

1. Jordan Angel Luciano Deudor – EAP. Ingeniería Eléctrica
2. Edson Jenry Valero Avila – EAP. Ingeniería Eléctrica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 13 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|-----------------------------|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☐ | NO ☒ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): | SI ☐ | NO ☒ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

Dedicatoria

A nuestros queridos padres, por su amor incondicional y apoyo constante, que nos han inspirado a alcanzar nuestras metas y nunca rendirnos en el camino del conocimiento.

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Jezzy James Huaman Rojas, nuestro asesor, por su valiosa guía, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de esta tesis.

Índice de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	viii
Índice de ecuaciones	ix
Resumen.....	x
Abstract	xi
Introducción	xii
CAPÍTULO I	13
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	13
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	13
1.1.1. Problema general	14
1.1.2. Problemas específicos	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. Justificación e importancia	15
1.3.1. Teórica	15
1.3.2. Social	15
1.3.3. Metodológica.....	15
1.4. Delimitación del proyecto	16
1.4.1. Conceptual.....	16
1.4.2. Espacial	16
1.4.3. Temporal	16
1.5. Hipótesis y variables	16
1.5.1. Hipótesis	16
1.5.2. Variables	17
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes de la investigación	18
2.1.1. Antecedentes internacionales	18
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	21
2.2. Bases teóricas	25

2.2.1. Sistema de detección de tormentas eléctricas mediante comunicación LoRaWAN y energía solar	25
2.2.2. Riesgos del personal por descargas atmosféricas	62
2.3. Definición de términos	78
CAPÍTULO III.....	79
METODOLOGÍA.....	79
3.1. Método, tipo o alcance de la investigación	79
3.2. Materiales y métodos.....	80
CAPÍTULO IV	84
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
CAPÍTULO V	112
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
ANEXOS	117
Anexo 1: Instrumento de recolección de datos.....	117
Anexo 2: Matriz de consistencia.....	118
Anexo 3: Solicitud para aplicación de cuestionario	119
Anexo 4: Cobertura de transmisor	120
Anexo 5: Ubicación de detector	121
Anexo 6: Tarjeta del emisor de detector de tormentas	122
Anexo 7: Prototipo de detección de tormentas instalado.....	123
Anexo 8: Tarjeta del receptor de detector de tormentas	124
Anexo 9: Receptor de detector de tormentas.....	125
Anexo 10: Plano de conexión del detector de tormentas emisor	126
Anexo 11: Sistemas de detección de Tormentas instalados Wave vs Lora Wan.....	127
Anexo 12: Base de datos	128

Índice de tablas

Tabla 1. Frecuencia estimada de rayos por mina, región y altitud	27
Tabla 2. Parámetros técnicos del DX-LR03 (referencia de fabricante)	28
Tabla 3. Cálculo del tiempo de aire (Time on Air) para SF12: parámetros	28
Tabla 4. Valores asumidos	31
Tabla 5. Valores asumidos	31
Tabla 6. Comparación con SF7	32
Tabla 7. Parámetros técnicos del AS3935.....	33
Tabla 8. Parámetros técnicos del Microcontrolador ESP32-WROOM-32D	35
Tabla 9. Comparación de modos de energía.....	36
Tabla 10. Comparación de modos de energía.....	37
Tabla 11. Normas aplicables	39
Tabla 12. Conexión del Sensor WCMCU3935 (SPI).....	40
Tabla 13. Conexión del Módulo LoRa (UART).....	40
Tabla 14. Configuración SPI y UART	41
Tabla 15. Calibración del Sensor	41
Tabla 16. Lectura de distancia y envío por LoRa.....	41
Tabla 17. Bucle principal	42
Tabla 18. Configuración de UART	42
Tabla 19. Recepción de mensajes LoRa.....	42
Tabla 20. Recomendaciones de prueba	43
Tabla 21. Datos iniciales	54
Tabla 22. Prueba de normalidad: Shapiro-Wilk	84
Tabla 23. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta amarilla, naranja y roja	85
Tabla 24. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta amarilla.....	86
Tabla 25. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta naranja	88
Tabla 26. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta roja.....	90
Tabla 27. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta amarilla, naranja y roja.....	92
Tabla 28. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta amarilla	94
Tabla 29. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta naranja.....	96
Tabla 30. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta roja	97
Tabla 31. Pretest y posttest del alcance de la detección	98
Tabla 32. Pretest y posttest de las interrupciones en la transmisión	101
Tabla 33. Pretest y posttest de la cantidad y gravedad de los incidentes del personal por descargas atmosféricas.....	103

Tabla 34. Pretest y postest de la percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas.....	104
Tabla 35. Pretest y postest de la confianza en la Red Lora WAN para la detección de tormentas eléctricas.....	105
Tabla 36. Pretest y postest de la confianza en la alimentación fotovoltaica para la comunicación de las alertas.....	106
Tabla 37. Prueba de rangos de los riesgos/incidentes eléctricos del personal por descargas atmosféricas.....	107
Tabla 38. Prueba de chi-cuadrado de la transmisión de alertas por descargas atmosféricas: cantidad de detecciones, tiempo de detección y alcance de la detección.....	107
Tabla 39. Prueba de rangos de las interrupciones en la transmisión del sistema de detección de tormentas	108

Índice de figuras

Figura 1. Promedio de rayos por km ²	27
Figura 2. Imagen referencial del sistema de alerta	38
Figura 3. Módulo LoRaWAN DX-LR03.....	56
Figura 4. LM2596 – Regulador de voltaje: Pin definition table	57
Figura 5. LM2596 – Regulador de voltaje: Power consumption table	58
Figura 6. LM2596 – Regulador de voltaje: ejemplar	58
Figura 7. Imagen referencial del refugio contra tormentas eléctricas.....	64
Figura 8. Espressif Systems de 32 bits (ESP32).....	81
Figura 9. Long Range (LoRa DX LR03)	82

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Duración de un símbolo.....	29
Ecuación 2. Tiempo total de transmisión	29
Ecuación 3. Velocidad de datos teórica.....	30
Ecuación 4. Presupuesto de enlace.....	31
Ecuación 5. Consumo energético por transmisión	31
Ecuación 6. Estimación de distancia	33
Ecuación 7. Cálculo alternativo por tiempo de llegada	34
Ecuación 8. Cálculo de velocidad de procesamiento.....	35
Ecuación 9. Cálculo de consumo energético	36
Ecuación 10. Estimación de distancia por intensidad de campo	37
Ecuación 11. Estimación por tiempo de llegada.....	38
Ecuación 12. Potencia eléctrica.....	54
Ecuación 13. Consumo diario	55
Ecuación 14. Capacidad necesaria	55
Ecuación 15. Capacidad de la batería.....	55
Ecuación 16. Horas efectivas del sol	56
Ecuación 17. Energía diaria necesaria.....	56
Ecuación 18. Potencia del panel.....	56

Resumen

La presente investigación titulada «Sistema de Detección de Tormentas Eléctricas con Comunicación LoRaWAN y Alimentación Fotovoltaica para Reducir Riesgos del Personal por Descargas Atmosféricas, Antamina-2025» aborda un problema creciente en las industrias de altura y zonas rurales: la exposición del personal a descargas eléctricas durante tormentas. En contextos como el complejo minero Antamina, donde las operaciones se desarrollan en condiciones climáticas extremas y zonas geográficas de difícil acceso, contar con sistemas autónomos, precisos y confiables de alerta temprana es vital para proteger la integridad humana. Esta necesidad se agrava por las limitaciones de infraestructura eléctrica y de comunicación tradicionales.

El objetivo general fue proponer un sistema de detección de tormentas eléctricas basado en comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica, con el fin de reducir los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas. Se aplicó el método hipotético-deductivo, con enfoque cuantitativo, de tipo aplicado-tecnológico, alcance explicativo y diseño preexperimental. Se emplearon como instrumentos una lista de cotejo y un cuestionario, y se contrastaron las hipótesis mediante pruebas t de Student y Wilcoxon.

Los resultados evidenciaron que el sistema propuesto reduce significativamente los riesgos eléctricos del personal, al mejorar la cantidad, velocidad y alcance de las alertas ($\chi^2 = 9,132$; $p = ,010$), eliminar interrupciones en la transmisión y aumentar la percepción de seguridad del personal ($Z = 2,75$; $p = ,006$). Asimismo, se identificó una mejora relevante, aunque marginalmente significativa ($Z = 1,89$; $p = ,059$), en la continuidad operativa gracias a la fuente fotovoltaica. Se concluye que el sistema LoRaWAN con energía solar representa una solución viable, robusta y eficiente en entornos críticos para la gestión del riesgo climático.

Palabras clave: Detección de tormentas eléctricas, comunicación LoRaWAN, alimentación fotovoltaica, descargas atmosféricas y seguridad laboral.

Abstract

This research entitled «Thunderstorm Detection System with LoRaWAN Communication and Photovoltaic Power Supply to Reduce Personnel Risks from Atmospheric Lightning, Antamina-2025» addresses a growing problem in high-altitude industries and rural areas: personnel exposure to electrical discharges during thunderstorms. In contexts such as the Antamina mining complex, where operations are carried out in extreme weather conditions and in difficult-to-access geographic areas, having autonomous, accurate, and reliable early warning systems is vital to protect human safety. This need is compounded by the limitations of traditional electrical and communication infrastructure.

The overall objective was to propose a thunderstorm detection system based on LoRaWAN communication and photovoltaic power supply to reduce personnel electrical risks from atmospheric lightning. The hypothetical-deductive method was applied, with a quantitative approach, an applied-technological approach, explanatory scope, and a pre-experimental design. A checklist and a questionnaire were used as instruments, and hypotheses were tested using Student's t-test and Wilcoxon's test.

The results showed that the proposed system significantly reduces electrical risks to personnel by improving the number, speed, and scope of alerts ($\chi^2 = 9.132$; $p = .010$), eliminating transmission interruptions, and increasing personnel perception of safety ($Z = 2.75$; $p = .006$). A significant, albeit marginally significant, improvement in operational continuity was also identified ($Z = 1.89$; $p = .059$) thanks to the photovoltaic source. It is concluded that the solar-powered LoRaWAN system represents a viable, robust, and efficient solution for climate risk management in critical environments.

Keyword classes: Storm detection, LoRaWAN communication, photovoltaic power supply, atmospheric discharges y occupational safety.

Introducción

La presente tesis se titula «Sistema de Detección de Tormentas Eléctricas con Comunicación LoRaWAN y Alimentación Fotovoltaica para Reducir Riesgos del Personal por Descargas Atmosféricas, Antamina-2025». Tiene como objetivo general proponer un sistema de alerta temprana que integre comunicación inalámbrica de largo alcance (LoRaWAN) y una fuente energética autónoma (fotovoltaica), con el fin de mitigar los riesgos eléctricos a los que se expone el personal durante eventos de tormentas eléctricas en zonas remotas.

En el capítulo I, se desarrolla el planteamiento del estudio, que incluye la formulación del problema general y los problemas específicos, los objetivos de la investigación, la justificación e importancia del estudio, así como las delimitaciones conceptuales, espaciales y temporales. También se presentan las hipótesis y se describen las variables, dimensiones e indicadores que estructuran el diseño experimental de la investigación.

El capítulo II, expone el marco teórico, en el cual se revisan antecedentes internacionales y nacionales relacionados con sistemas de detección de tormentas eléctricas, tecnologías de comunicación inalámbrica, energía fotovoltaica y riesgos laborales. También se detallan las bases teóricas de las variables principales, así como las definiciones operacionales y conceptuales que sustentan el enfoque metodológico.

En el capítulo III, se presenta la metodología de la investigación, basada en el método hipotético-deductivo. Se describe el tipo de estudio (aplicado-tecnológico), su alcance explicativo, el diseño preexperimental y el enfoque cuantitativo. Se detallan los materiales utilizados, los instrumentos de recolección de datos (lista de cotejo y cuestionario), y los métodos estadísticos aplicados para la contrastación de hipótesis.

El capítulo IV, contiene los resultados obtenidos a partir de la implementación del sistema, así como su análisis y discusión a la luz de estudios previos. Se evidencian mejoras significativas en la velocidad, alcance y confiabilidad del sistema de detección y transmisión de alertas, así como en la percepción de seguridad, reducción de incidentes y eliminación de interrupciones.

El capítulo V, presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio. Estas se organizan en función de los objetivos planteados y apuntan hacia la validación del sistema como una herramienta eficaz para la gestión del riesgo meteorológico en entornos operativos complejos. Finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas y los anexos, entre ellos el instrumento de recolección de datos y la matriz de consistencia.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

A nivel internacional, diversos estudios han abordado la detección y prevención de descargas atmosféricas mediante tecnologías de comunicación IoT y modelos predictivos. Ortiz diseñó un prototipo para la localización de descargas atmosféricas utilizando LoRaWAN, destacando su eficiencia en la cobertura de detección y resistencia a interferencias (1). Guamán desarrolló un sistema basado en triangulación de sensores, con una precisión del 75.37% en la localización de tormentas (2). Sin embargo, estos estudios no han integrado una solución aplicada en entornos de trabajo de alto riesgo, dejando un vacío en la implementación efectiva de sistemas de alerta temprana en operaciones industriales expuestas a tormentas eléctricas.

En el contexto nacional, Huanca et al. analizaron las fallas en transformadores debido a descargas atmosféricas en redes de distribución eléctrica, proponiendo mejoras en la coordinación de aislamiento y protección mediante pararrayos (3). Cisneros et al. diseñaron un sistema de protección contra descargas atmosféricas para prevenir cortes de energía en unidades mineras (4). No obstante, estos estudios se enfocan en la infraestructura eléctrica, sin abordar directamente la mitigación de riesgos para el personal expuesto a descargas atmosféricas en entornos mineros, lo que resalta la necesidad de una solución específica para este sector.

A nivel local, Antamina enfrenta riesgos constantes por tormentas eléctricas, afectando la seguridad del personal en campo. Si bien existen protocolos de seguridad, la detección y comunicación de tormentas aún presenta deficiencias, generando vulnerabilidad ante descargas atmosféricas. No se han implementado sistemas de alerta temprana con tecnología LoRaWAN y energía solar, lo que limita la capacidad de reacción oportuna ante eventos climáticos severos. Este vacío en la aplicación de tecnologías eficientes y sostenibles para la prevención de riesgos eléctricos subraya la pertinencia de la presente investigación.

En síntesis, la ausencia de estudios aplicados que integren detección, comunicación eficiente y fuentes de energía sostenibles en la prevención de riesgos por descargas atmosféricas en el ámbito minero evidencia la problemática general. La presente investigación propone desarrollar un sistema de detección de tormentas eléctricas basado en LoRaWAN y energía solar, contribuyendo a reducir los riesgos del personal en Antamina-2025. Su enfoque cuantitativo,

explicativo y preexperimental permitirá evaluar la eficacia y eficiencia del sistema, proporcionando una solución innovadora y aplicable a contextos industriales similares.

1.1.1. Problema general

- ¿De qué manera el sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma reduce los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas, optimiza la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025?
- ¿De qué manera la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma reduce las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por descargas atmosféricas, Antamina-2025?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Proponer la implementación de un sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma para reducir los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025.

1.2.2. Objetivos específicos

- Proponer la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas para optimizar la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025.
- Proponer la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma para reducir las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red, Antamina-2025.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Teórica

La presente investigación aporta al campo de la seguridad laboral al desarrollar un sistema eficiente para la detección de tormentas eléctricas, mitigando así el riesgo de descargas atmosféricas en Antamina. La integración de tecnología LoRaWAN con energía solar permite una vigilancia autónoma y continua, optimizando la gestión logística y reduciendo la frecuencia de incidentes. Además, el estudio contribuye al conocimiento sobre soluciones tecnológicas aplicadas a entornos mineros, proporcionando datos cuantificables sobre su impacto en la percepción de seguridad del personal expuesto a condiciones climáticas adversas.

1.3.2. Social

La presente investigación es socialmente relevante porque aborda un problema crítico en la seguridad laboral del personal minero en Antamina: la exposición a descargas atmosféricas debido a la ausencia de un sistema eficiente de detección de tormentas eléctricas. Al desarrollar una solución basada en comunicación LoRaWAN y energía solar, se promueve la prevención de incidentes mediante una tecnología autónoma y sostenible. La implementación del sistema contribuirá a la reducción de accidentes, mejorará la percepción de seguridad del personal y fortalecerá la gestión de riesgos en entornos de alta exposición eléctrica.

1.3.3. Metodológica

La justificación metodológica de la investigación radica en la necesidad de evaluar la efectividad del sistema de detección de tormentas eléctricas mediante un enfoque cuantitativo, explicativo y preexperimental. La aplicación de este diseño permite medir el impacto del sistema en la reducción de incidentes por descargas atmosféricas y en la percepción de seguridad del personal. El uso de una lista de cotejo y un cuestionario posibilita la recolección de datos objetivos y subjetivos, garantizando un análisis riguroso para validar la funcionalidad y eficiencia del sistema propuesto.

1.4. Delimitación del proyecto

1.4.1. Conceptual

La investigación se centra en el desarrollo y evaluación de un sistema de detección de tormentas eléctricas basado en comunicación LoRaWAN y energía solar, orientado a reducir los riesgos del personal por descargas atmosféricas.

1.4.2. Espacial

La investigación se desarrolla en la unidad minera Antamina, ubicada en la región Áncash, Perú. El estudio abarca las áreas operativas expuestas a descargas atmosféricas, donde se implementará y evaluará el sistema de detección de tormentas eléctricas.

1.4.3. Temporal

La investigación se llevará a cabo durante el año 2025, abarcando las etapas de diseño, implementación, recolección de datos, análisis y validación del sistema de detección de tormentas eléctricas.

1.5. Hipótesis y variables

1.5.1. Hipótesis

Hipótesis general:

- El sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma reduce los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025.

Hipótesis específicas:

- La implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas optimiza la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025.

- La implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma reduce las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red, Antamina-2025.

1.5.2. Variables

- Variable independiente:
Sistema de detección de tormentas eléctricas
- Variable dependiente:
Riesgos del personal por descargas atmosféricas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Ortiz en su tesis “Diseño e implementación de un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoRaWAN” tuvo como objetivo diseñar e implementar un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoRaWAN. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el prototipo diseñado permitió identificar con precisión la ubicación de descargas atmosféricas en el cantón Riobamba y sus alrededores, logrando una cobertura aproximada de 4126 km²; se validó el uso de la tecnología LoRaWAN debido a su eficiencia energética y resistencia a interferencias, a pesar de su limitado ancho de banda; además, el sensor AS3935 demostró ser una herramienta clave para la detección de estos eventos, con un margen de error de 1 km, convirtiendo al prototipo en una solución viable para el monitoreo y prevención de riesgos asociados a tormentas eléctricas (1).

Guamán en su tesis “Desarrollo de un prototipo IoT para la localización de descargas atmosféricas mediante la triangulación de sensores” tuvo como objetivo determinar un prototipo IoT para la localización de descargas atmosféricas mediante la triangulación de sensores. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el prototipo IoT desarrollado fue eficiente en la detección y localización de descargas atmosféricas mediante triangulación de sensores; se utilizó el sensor AS3935, destacando su bajo costo y precisión del 75.37%; además, la plataforma ThingSpeak permitió almacenar y procesar los datos en MATLAB, obteniendo coordenadas geográficas precisas de los eventos registrados; los resultados mostraron que la dirección de las tormentas eléctricas podía determinarse con base en la secuencia de las descargas, identificando un desplazamiento hacia el sur de Riobamba (2).

Salvador en su tesis “Caracterización de la electrificación de tormentas para su aplicación en procesos de sistemas de alerta: el caso de aerogeneradores y otras infraestructuras elevadas” tuvo como objetivo analizar la actividad eléctrica atmosférica, identificando condiciones meteorológicas que favorecen la presencia de rayos y su impacto en infraestructuras como

aerogeneradores. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que las amenazas de rayos a los aerogeneradores no ocurren durante la temporada principal de tormentas, sino en períodos de transición como primavera y otoño; se identificó que la actividad eléctrica en estas infraestructuras está asociada a tormentas con estructuras de carga específicas y que los rayos descendentes presentan una capa de carga positiva dominante más cercana al suelo; además, las condiciones para rayos ascendentes incluyen una base de nube baja con una estructura de carga en dos capas; estos hallazgos resaltan la necesidad de ajustar los estándares de protección contra rayos en aerogeneradores (5).

Salazar et al. en su artículo científico “Evaluación de la factibilidad del pronóstico de descargas eléctricas mediante el índice del Potencial de Rayos” tuvieron como objetivo evaluar la factibilidad del Índice del Potencial de Rayo (LPI) para pronosticar descargas eléctricas en Cuba mediante el análisis de tres casos de estudio con datos significativos. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que la marcha diaria de los acumulados promedios del Índice del Potencial de Rayo (LPI) y el ENTLN evidenció una alta coincidencia en los horarios de mayor actividad eléctrica, con un pico máximo entre las 20:00 y 21:00 UTC; además, las correlaciones obtenidas entre ambos parámetros fueron más altas cuando el modelo fue inicializado a las 12:00 UTC, alcanzando valores de hasta 0,85; sin embargo, el LPI presentó un alto número de falsas alarmas, lo que indica su tendencia a sobreestimar la actividad convectiva; a pesar de ello, este índice permitió identificar áreas con potencial desarrollo de tormentas eléctricas, aportando información relevante para la predicción meteorológica (6).

Arias et al. en su artículo científico “Análisis de días con tormentas eléctricas, mediante índices termodinámicos e índice derivado” tuvieron como objetivo determinar qué índices termodinámicos se ajustan mejor a diferentes configuraciones sinópticas en Cuba y desarrollar un índice derivado que mejore la predicción de tormentas eléctricas en la región occidental. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que los índices termodinámicos tradicionales más significativos fueron el K y el TT, mientras que el índice GDI presentó una alta habilidad para la detección de tormentas en la zona tropical estudiada; además, se desarrolló un índice derivado (ID), cuyos valores oscilaron entre 100 y 120, siendo más representativos para la predicción de tormentas eléctricas, especialmente en el período poco lluvioso; este nuevo índice permitió mejorar la identificación de los sistemas meteorológicos asociados a tormentas en comparación con los índices tradicionales (7).

Vázquez et al. en su artículo científico “Aplicación de tecnologías inalámbricas al monitoreo climatológico en la cuenca del Río Paute” tuvieron como objetivo habilitar la transmisión inalámbrica en tiempo real de los datos recopilados por estaciones meteorológicas hacia el centro de datos del PROMAS, para mejorar la eficiencia del monitoreo climatológico en la cuenca del río Paute. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que la arquitectura de red basada en tecnología LoRaWAN permitió una transmisión eficiente y de baja latencia, incluso en entornos geográficos complejos y de difícil acceso como la cordillera andina; se verificó la utilidad de los datos en tiempo real para apoyar la gestión del riesgo hidrometeorológico, especialmente en zonas urbanas vulnerables como la ciudad de Cuenca; las pruebas iniciales en campo evidenciaron un desempeño robusto de los prototipos, lo que respalda su escalabilidad futura en la red de monitoreo regional (8).

Elijah en su artículo científico “Efecto de las condiciones climáticas en la tecnología de comunicación IoT LoRa en una región tropical: Malasia” tuvieron como objetivo analizar cómo las condiciones climáticas afectan el rendimiento de la comunicación IoT mediante tecnología LoRa en una región tropical, con el fin de optimizar su implementación y modelado de propagación en entornos similares. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que parámetros como la radiación solar, la temperatura atmosférica y la humedad relativa influyen en la calidad del enlace LoRa, observándose una correlación positiva entre la radiación solar y la intensidad de la señal (RSSI); no se evidenció un impacto significativo de la precipitación, incluso a altas tasas de lluvia, en distancias cercanas al kilómetro; estos hallazgos aportan información clave para el diseño y modelado de redes IoT en climas tropicales, así como para la evaluación de su confiabilidad operativa (9).

Armijos y Narváez en su tesis “Sistema de alerta temprana de riesgo de inundaciones basado en el Protocolo de Comunicación LoRa” tuvieron como objetivo implementar un sistema de alerta temprana de riesgo de inundaciones utilizando el protocolo de comunicación LoRa, evaluando su alcance y permitiendo la visualización de datos en un servidor web. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el sistema logró una transmisión eficiente y de bajo consumo energético, con cobertura adecuada bajo condiciones de línea de vista; la comunicación entre múltiples nodos hacia un mismo gateway fue efectiva, y los datos transmitidos mostraron alta correlación con los registros de la red hidrometeorológica oficial; además, se validó la autonomía operativa del sistema mediante energía solar y su capacidad para emitir alertas automáticas en tiempo real a través de plataformas IoT como ThingSpeak y ThingTweet (10).

Arias et al. en su artículo científico “Estudio de cobertura radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa)” tuvieron como objetivo evaluar la cobertura radial de la tecnología LoRa en distintos entornos geográficos dentro de la Universidad de El Salvador, con el fin de establecer una metodología de predicción del nivel de recepción para implementar redes de sensores eficientes. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que los parámetros óptimos para la comunicación en los escenarios evaluados fueron un factor de ensanchamiento de 7, ancho de banda de 125 kHz, tasa de datos ajustada en 5 y potencia de transmisión de 20 dBm, utilizando una frecuencia ideal de 914 MHz por su baja interferencia; se adoptó el modelo COST 231 para el cálculo de cobertura en zonas urbanas, complementado con el modelo UIT-R P.833-2 para considerar pérdidas por vegetación. Las mediciones obtenidas fueron consistentes con los valores registrados en campo, validando la aplicabilidad de la metodología propuesta (11).

Espinoza en su tesis “Plataforma basada en internet de las cosas (IoT) para la medición y monitoreo del nivel de gas sulfuro de hidrógeno generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos” tuvo como objetivo desarrollar una plataforma IoT para medir y monitorear en tiempo real los niveles de gas sulfuro de hidrógeno emitido por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos, con el fin de mejorar la seguridad industrial. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el sistema desarrollado permitió la detección oportuna de concentraciones de gas por encima de los límites permisibles, mediante sensores conectados a una red inalámbrica que transmitía los datos a una interfaz web en tiempo real; se verificó la funcionalidad del sistema en condiciones operativas reales, demostrando su utilidad para activar protocolos de seguridad en situaciones de riesgo; la plataforma presentó bajo consumo energético y buena estabilidad en la transmisión de datos, lo que la hace viable para su implementación en entornos logísticos industriales (12).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Huanca et al. en su tesis “Análisis de fallas en transformadores por la operación de los pararrayos antes descargas atmosféricas en el sistema eléctricos primario de distribución 22,9kV” tuvieron como objetivo analizar y modelar las fallas en transformadores de distribución por la operación de los pararrayos ante sobretensiones externas en el sistema eléctrico primaria 22,9kV-Espinar, y plantear una solución. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que la instalación de un sistema de pararrayos de línea un vano antes de cada subestación de distribución permitió

mejorar la coordinación de aislamiento, reduciendo significativamente las sobretensiones por descargas atmosféricas y aumentando la confiabilidad del sistema; se evidenció que la falta de apantallamiento adecuado y sistemas de puesta a tierra deficientes generaban fallas recurrentes en los transformadores, manifestadas por flameo en bujes y bobinas, así como expulsión de aceite quemado; con la implementación de pararrayos de óxido de zinc y SPAT con resistencia menor a 10 ohmios, las sobretensiones en los transformadores se redujeron a niveles aceptables dentro de la coordinación de protección (3).

Cisneros et al. en su tesis “Diseño e implementación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas para prevenir cortes espontáneos de energía eléctrica en la Unidad Minera Andaychagua-Volcán” tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de protección contra descargas atmosféricas para prevenir cortes espontáneos de energía eléctrica en la Unidad Minera Andaychagua-Volcán. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que la implementación del sistema de protección contra descargas atmosféricas redujo los cortes espontáneos de energía eléctrica por impacto de rayos, cumpliendo con las normas IEC 62305 y NFPA 780; se determinó que la frecuencia tolerable del rayo era menor que la frecuencia anual de caída, justificando la instalación de pararrayos tipo Franklin, terminales sobre techo y jaulas de Faraday; además, la implementación del sistema cumplió con el Decreto Supremo N° 024-2016-EM, asegurando la protección de las instalaciones mineras y la seguridad de los operadores (4).

Flores et al. en su artículo científico “Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas para la cuenca del río Mantaro - Perú, utilizando bandas de vapor de agua e infrarroja del satélite goes” tuvieron como objetivo desarrollar relaciones estadísticas para calcular la probabilidad de ocurrencia de rayos en la sierra central de Perú y evaluar su aplicación en un sistema de seguimiento de descargas eléctricas atmosféricas. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el número de descargas varía a lo largo del año, siendo un factor clave para su predicción; las relaciones empíricas obtenidas permitieron estimar la ocurrencia de descargas en localidades como Huayao y Marcapomacocha; además, se determinó que el uso de bandas de temperatura de brillo de satélites meteorológicos mejora la precisión del monitoreo, sugiriendo la necesidad de ajustes en la detección para optimizar un sistema de vigilancia de descargas en el país (13).

Meza et al. en su artículo científico “Tecnología de compensación de campo eléctrico como una solución alternativa para la reducción de descargas atmosféricas en Perú” tuvieron como objetivo analizar la tecnología de compensación de campo eléctrico como alternativa para reducir descargas atmosféricas en Perú y evaluar su eficacia en la protección de personas,

animales y estructuras. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que esta tecnología constituye una alternativa efectiva a los sistemas de pararrayos Franklin, especialmente en zonas de alta exposición a rayos; durante las pruebas, los compensadores soportaron hasta 840 kV sin generar descargas eléctricas, demostrando su capacidad de mitigación; además, se destacó su importancia como medida preventiva para proteger instalaciones terrestres y espacios abiertos, resaltando que las protecciones atmosféricas deben considerarse una inversión, ya que el costo de prevención es significativamente menor que el de los daños ocasionados por descargas eléctricas (14).

Quijada et al. en su artículo científico “Caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú” tuvo como objetivo caracterizar los eventos de tormenta pluviométrica en el Perú mediante el análisis de datos de estaciones automáticas, para comprender su comportamiento y generar herramientas para el diseño hidráulico e hidrológico. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el 77% de los eventos de tormenta pluviométrica (TP) tuvieron duraciones entre 4 y 8 horas, el 17% duraron de 9 a 12 horas y el 6% superaron las 12 horas; se observó que el total de lluvia varió entre 0.7 y 46 mm, con intensidades de 0.2 a 7.2 mm/h, siendo la selva la región con los valores más altos; además, se identificó que los eventos de TP en la costa y los Andes ocurren entre las 12 y 18 horas, mientras que en la selva predominan entre las 0 y 6 horas; finalmente, se determinaron los perfiles de tormenta a través de las "Curvas Huff", útiles para la desagregación de lluvias máximas en el diseño hidráulico (15).

Quillas en su tesis “Implementación de un sistema unificado detector de tormentas eléctricas para una compañía minera en el departamento de Apurímac” tuvo como objetivo implementar un sistema unificado de detección y notificación de advertencias de tormentas eléctricas en una Compañía Minera del departamento de Apurímac, para disminuir el tiempo de respuesta del sistema actual. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el sistema propuesto logró automatizar la activación de alarmas tanto para tormentas locales como entrantes, eliminando la dependencia de intervención manual; se optimizó la ubicación de las estaciones de detección, reduciendo interferencias y ampliando la cobertura efectiva; asimismo, se validó la funcionalidad del sensor de campo eléctrico CS110 en condiciones operativas reales, mejorando significativamente los tiempos de alerta temprana. La implementación alcanzó una reducción del tiempo de respuesta en un 60 %, contribuyendo a una mayor seguridad operativa en la unidad minera (16).

Huarachi y Calcina en su tesis “Sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible” tuvieron como

objetivo implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible en zonas de interés. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que el sistema logró una comunicación estable entre los nodos y el gateway, incluso a distancias superiores a 7 km, con una pérdida mínima de datos; se registraron con éxito variables como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y presión atmosférica, y los datos fueron integrados eficientemente a la plataforma ThingSpeak para su visualización en tiempo real; además, se automatizó el análisis estadístico mediante herramientas en la nube, permitiendo estimaciones preliminares del recurso eólico y facilitando una evaluación continua y detallada de las condiciones atmosféricas en el entorno geográfico de Puno (17).

Cruz en su tesis “Evaluación de los parámetros de transmisión de una red LoRaWAN en presencia de interferencia electromagnética sobre la banda de 900 MHz” tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de los principales parámetros de una red LoRaWAN en diferentes escenarios de nivel de interferencia electromagnética en la banda de 900 MHz. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que la red mantuvo un desempeño estable frente a interferencias, gracias a la robustez de su modulación; aunque el RSSI se mantuvo constante, el SNR presentó variaciones según el tipo y nivel de interferencia; se evidenció que el ajuste del factor de ensanchamiento permite mitigar distintos tipos de interferencia, lo que demuestra la viabilidad de LoRaWAN en entornos electromagnéticamente adversos (18).

Catari en su tesis “Diseño de un sistema de monitoreo con sensores de redes inalámbricas con tecnología LoRaWAN contra incendios en los pastizales en el distrito de Puno, 2023” tuvo como objetivo diseñar un sistema de monitoreo con sensores de redes inalámbricas con tecnología LoRa WAN contra incendios en los pastizales en el distrito de Puno. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que se logró establecer un sistema funcional de detección en tiempo real mediante un enlace punto a punto entre dispositivos TTGO LoRa32 OLED, permitiendo la transmisión continua de datos hacia una estación base; el sistema permitió monitorear variables ambientales críticas como temperatura, humedad, luz y niveles de CO₂, facilitando la identificación temprana de condiciones propensas a incendios; la recolección y visualización en tiempo real de estos datos mejora significativamente la capacidad de respuesta ante emergencias en zonas vulnerables (19).

Mendoza y De los Santos en su tesis “Diseño e implementación de una red piloto LoRaWAN para el monitoreo remoto de cuatro parámetros médicos” tuvieron como objetivo diseñar e

implementar una red LoRaWAN para el monitoreo remoto de cuatro parámetros médicos. Su metodología fue aplicada, cuantitativa, explicativa y preexperimental. Los resultados mostraron que se logró desarrollar un sistema funcional capaz de medir temperatura corporal, presión arterial, saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca, integrando sensores especializados con módulos LoRa de baja potencia; se alcanzó una transmisión efectiva de datos a través de una red LoRaWAN enlazada con un gateway y plataformas como TTN y UBIDOTS, permitiendo la visualización remota en tiempo real; las pruebas demostraron un alcance de hasta 4.61 km en línea de vista y una autonomía estimada de hasta siete meses por nodo, validando su viabilidad en zonas con acceso limitado a energía o infraestructura de telecomunicaciones (20).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Sistema de detección de tormentas eléctricas mediante comunicación LoRaWAN y energía solar

El sistema de detección de tormentas eléctricas basado en comunicación LoRaWAN y energía solar permite mitigar los riesgos asociados a descargas atmosféricas en entornos laborales expuestos. Su implementación contribuye a la seguridad del personal al proporcionar alertas tempranas sobre la presencia de tormentas eléctricas. Este sistema se fundamenta en la captación y transmisión de datos meteorológicos en tiempo real, asegurando una cobertura eficiente en zonas de alto riesgo. Además, su autonomía energética garantiza un funcionamiento continuo, incluso en condiciones climáticas adversas (21).

El mecanismo de detección se basa en sensores especializados que monitorean variaciones en el campo eléctrico y la actividad electromagnética. Estos sensores identifican cambios característicos previos a la formación de tormentas, permitiendo generar alertas con suficiente anticipación. La cantidad de detecciones obtenidas es un indicador clave de la eficacia del sistema, reflejando su capacidad para identificar eventos atmosféricos peligrosos. Así, se optimiza la protección del personal en zonas vulnerables (22).

La rapidez con la que el sistema detecta tormentas es fundamental para su eficacia. El tiempo de detección se mide desde el inicio de las condiciones de riesgo hasta la emisión de una alerta. La reducción de este tiempo permite implementar medidas preventivas de manera oportuna, disminuyendo la exposición del personal a descargas eléctricas. La combinación de sensores de alta sensibilidad y algoritmos de procesamiento de datos contribuye a mejorar esta capacidad de respuesta (23).

El alcance de la detección determina la extensión geográfica cubierta por el sistema. Un mayor radio de cobertura permite monitorear amplias zonas de trabajo, asegurando que ninguna área crítica quede desprotegida. La eficiencia del alcance depende de la ubicación estratégica de los sensores y la configuración de la red LoRaWAN. De esta manera, el sistema puede adaptarse a distintos entornos laborales y condiciones meteorológicas (24).

La comunicación de datos mediante LoRaWAN garantiza una transmisión confiable y de bajo consumo energético. La tecnología LoRaWAN permite enviar información sobre detecciones a largas distancias sin requerir infraestructura de comunicaciones compleja. La reducción de interrupciones en la transmisión de datos mejora la eficiencia del sistema, asegurando que las alertas lleguen oportunamente al personal de seguridad (25).

Las interrupciones en la comunicación pueden comprometer la efectividad del sistema. Por ello, se implementan protocolos de redundancia que minimizan la pérdida de información. La optimización de la red LoRaWAN, junto con la selección de frecuencias adecuadas, permite mantener la estabilidad de la transmisión. Así, se garantiza que los datos meteorológicos sean procesados y enviados sin retrasos significativos (26).

La implementación de este sistema tiene un impacto directo en la reducción de incidentes por descargas atmosféricas. La cantidad de incidentes registrados antes y después de su instalación permite evaluar su efectividad. Una disminución en estos eventos refleja la capacidad del sistema para mejorar la seguridad laboral. La protección del personal en entornos expuestos es un objetivo prioritario en la gestión del riesgo eléctrico (27).

La gravedad de los incidentes también se ve influenciada por la implementación del sistema. Al proporcionar alertas tempranas, se minimizan las probabilidades de que el personal sufra lesiones graves. La comparación de los reportes de accidentes antes y después del uso del sistema permite analizar su impacto en la seguridad ocupacional. Esto contribuye a la toma de decisiones informadas para la protección de los trabajadores (28).

La percepción de seguridad del personal es un aspecto relevante en la evaluación del sistema. La confianza en la detección se mide a través de encuestas que recopilan la opinión de los trabajadores sobre la efectividad del sistema. Una mayor confianza indica que el personal se siente protegido y respalda la continuidad de su uso. Esto influye positivamente en la cultura de seguridad dentro de la organización (29).

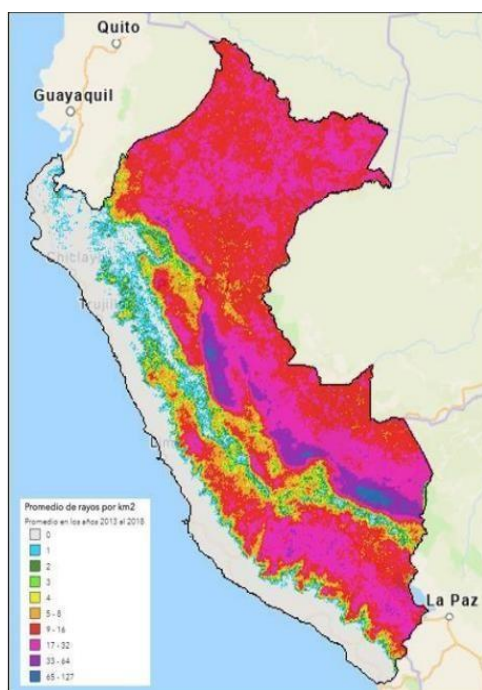
La confianza en la comunicación de alertas refuerza la utilidad del sistema. Los trabajadores deben recibir las notificaciones de manera oportuna y confiable para tomar decisiones adecuadas ante una posible tormenta. La estabilidad en la transmisión de datos y la efectividad de los protocolos de notificación garantizan que el sistema cumpla con su función. En conjunto, estos factores permiten una reducción significativa de los riesgos laborales asociados a descargas atmosféricas.

Tabla 1. Frecuencia estimada de rayos por mina, región y altitud

Mina Principal	Región	Altitud (msnm)	Frecuencia Estimada de Rayos/año
Cerro Verde	Arequipa	2,400 – 3,000	10 – 30
Las Bambas	Apurímac	3,800 – 4,500	40 – 80
Antamina	Áncash	4,300	60 – 100
Quellaveco	Moquegua	3,500 – 4,000	30 – 60
Yanacocha	Cajamarca	3,500 – 4,000	20 – 50
San Rafael	Puno	4,500	80 – 120
Zafranal	Arequipa	2,500 – 3,000	10 – 30
Pampa de Pongo	Arequipa	1,500 – 2,000	5 – 15
Corani	Puno	4,800	100 – 140
Trapiche	Apurímac	3,800 – 4,200	40 – 80

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (30).

Figura 1. Promedio de rayos por km²



Nota: Figura extraída de una fuente externa (30).

Sobre el dispositivo LoRaWAN:

Parámetros técnicos del DX-LR03 (referencia de fabricante):

- El módulo LoRa DX-LR03 está diseñado para operar en la banda de 915 MHz, frecuencia comúnmente asignada para aplicaciones en Latinoamérica. Su potencia de transmisión alcanza los 30 dBm (1 W), mientras que la sensibilidad del receptor se sitúa en -138 dBm, lo que le permite captar señales extremadamente débiles. Este módulo es compatible con factores de dispersión (Spreading Factor, SF) desde SF7 hasta SF12, y soporta anchos de banda configurables de 125, 250 y 500 kHz. La modulación utilizada es de tipo Chirp Spread Spectrum (CSS), característica de la tecnología LoRa, que optimiza la robustez ante interferencias. La comunicación con microcontroladores se realiza a través de una interfaz UART con velocidades de hasta 115,200 bps mediante comandos AT. En condiciones ideales, el alcance estimado puede superar los 15 km en campo abierto con línea de vista (31).

Tabla 2. *Parámetros técnicos del DX-LR03 (referencia de fabricante)*

Parámetro	Valor
Frecuencia	915 MHz (Latinoamérica)
Potencia de transmisión	30 dBm (1 W)
Sensibilidad del receptor	-138 dBm
Spreading Factor (SF)	SF7 a SF12
Ancho de banda (BW)	125 kHz / 250 kHz / 500 kHz
Modulación	Chirp Spread Spectrum (LoRa CSS)
Interfaz UART	Hasta 115,200 bps (AT Commands)
Distancia estimada	Hasta 15 km en campo abierto

Nota. Tabla extraída de una fuente externa (31).

Cálculo del tiempo de aire (Time on Air) para SF12:

- Para evaluar la eficiencia temporal de una transmisión con este módulo utilizando SF12, se consideran los siguientes parámetros: un ancho de banda de 125 kHz, una carga útil (payload) de 20 bytes, una razón de codificación (CR) de 4/5, un preámbulo de 8 símbolos y un total estimado de 20 símbolos para la carga útil. Con estos valores, se puede determinar el tiempo de aire o duración total de la transmisión (31).

Tabla 3. *Cálculo del tiempo de aire (Time on Air) para SF12: parámetros*

SF	=	12
BW	=	125,000 Hz
Payload	=	20 bytes

CR	=	4/5
Preamble	=	8 símbolos
Símbolos de Payload	=	20

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Duración de símbolo:

- La duración de un símbolo bajo SF12 y BW de 125 kHz se calcula con la fórmula: $T_{sym} = 2^{SF} / BW$, lo que da como resultado un tiempo de símbolo de aproximadamente 32.768 ms (31).

Ecuación 1: Duración de un símbolo

$$T_s = \frac{1000 \cdot 2^{SF}}{BW}$$

Explicación de las variables:

- T_s : Tiempo de símbolo en milisegundos (ms).
- SF : Spreading Factor (Factor de Expansión), un valor entero (ejemplo; $SF=12$).
- BW : Ancho de banda en Hertz (Hz) (ejemplo: $BW=125000$ Hz).

Ejemplo de aplicación:

- Con $SF=12$ y $BW=125000$ Hz.

$$T_s = \frac{1000 \cdot 2^{12}}{125000} + \frac{1000 \cdot 4096}{125000} = \frac{4096000}{125000} = 32.768 \text{ ms}$$

Tiempo total de transmisión:

- Con base en la duración del símbolo y la cantidad estimada de símbolos en el preámbulo y la carga útil, se estima un tiempo total de transmisión cercano a 0.9175 segundos por paquete transmitido (31).
- El tiempo de transmisión (T_{total}) es igual a la suma del número de símbolos en el preámbulo ($N_{preamble}$) y el número de símbolos en la carga útil ($N_{payload}$), multiplicada por la duración de un símbolo (T_s).

Expresión matemática:

Ecuación 2: Tiempo total de transmisión

$$T_{total} = (N_{preamble} + N_{payboad}) \cdot T_s$$

Ejemplo numérico dado:

$$T_{total} = (8 + 20) \cdot 32.768 = 28 \cdot 32.768 = 917.5 \text{ ms}$$

Explicación de los valores usados:

- $N_{preamble} = 8$ (símbolos de preámbulo).
- $N_{payboad} = 20$ (símbolo de la carga útil).
- $T_s = 32.768 \text{ ms}$ (duración de un símbolo).

Cálculo:

$$(8 + 20) = 28$$

$$28 \times 32.768 \equiv 917.5 \text{ ms}$$

Resultado:

- El tiempo total de transmisión es 917.5 milisegundos.

Velocidad de datos teórica:

- La tasa de transferencia efectiva de datos bajo SF12 y un BW de 125 kHz se aproxima a 250 bps. Este valor refleja la capacidad de transmisión en situaciones donde se prioriza el alcance y la sensibilidad por encima de la velocidad (31).

Ecuación 3: Velocidad de datos teórica

$$R_b = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}} = \frac{12 \cdot 125000}{4096} = 366 \text{ bps}$$

Para SF7:

- Cuando se utiliza SF7 en el mismo ancho de banda de 125 kHz, la velocidad de datos se incrementa significativamente, alcanzando aproximadamente 5,470 bps. Esta configuración resulta más eficiente energéticamente, aunque con menor cobertura (31).

$$R_b = \frac{7 \times 125000}{128} = 6,835 \text{ bps}$$

Presupuesto de enlace (Link Budget):

- El presupuesto de enlace para el módulo DX-LR03 se calcula con los siguientes valores: potencia de transmisión (Ptx) de 30 dBm, ganancia de transmisión y recepción de 2 dBi cada una, pérdidas por obstáculos, altitud y reflexiones estimadas en 10 dB, y sensibilidad del receptor (Srx) de -138 dBm. El cálculo se expresa como: $LB = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{obst} - S_{rx}$, resultando en un presupuesto de enlace total de 162 dB. Este valor permite estimar un alcance de 10 a 15 km en condiciones de línea de vista, y entre 3 y 6 km en presencia de obstrucciones moderadas, como maquinaria o topografía irregular (31).

Ecuación 4: Presupuesto de enlace

$$LB = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{obst} - S_{rx}$$

Tabla 4. Valores asumidos

Ptx	= 30dBm
Gtx	= Grx = 2dBi
Lobst	= 10dB (pérdidas por polvo, altitud, reflexiones)
Srx	= -138dBm}

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

$$LB = 30 + 2 + 2 - 10 - (-138) = 162 \text{ dB}$$

Consumo energético por transmisión:

- El consumo de energía para una transmisión con SF12 se calcula a partir de una corriente de 120 mA (0.12 A), una tensión de alimentación de 3.3 V y un tiempo de transmisión de 0.9175 s. El consumo energético (E) se determina como: $E = I \times V \times t \approx 0.0363 \text{ Wh}$. En comparación, para SF7, el tiempo de aire es de aproximadamente 100 ms, lo que equivale a un consumo de 0.00396 Wh. Por tanto, transmitir con SF12 implica un consumo energético casi nueve veces mayor que con SF7, aunque con el beneficio de una mayor cobertura (31).

Ecuación 5: Consumo energético por transmisión

$$E = I \cdot V \cdot t$$

Tabla 5. Valores asumidos

I	= 120mA = 0.12A
V	= 3.3 V
t	= 0.9175s

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

$$E = 0.12 \cdot 3.3 \cdot 0.9175 \approx 0.363 \text{ Wh}$$

Tabla 6. Comparación con SF7

ToA	=	100 ms
ESF7	=	0.0396Wh

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Aplicabilidad en la mina Antamina:

- La mina Antamina, ubicada a una altitud promedio de 4,300 msnm, presenta una geografía compleja, exposición a tormentas eléctricas frecuentes y la necesidad de monitoreo en áreas remotas sin cobertura celular. En este contexto, el uso del módulo DX-LR03 operando con SF12 y un BW de 125 kHz se recomienda para asegurar cobertura superior a los 10 km. Se sugiere complementar el sistema con antenas de entre 3 y 5 dBi, instaladas a más de 3 m de altura sobre el nivel del suelo para minimizar interferencias y mejorar el rendimiento del enlace (31).

Semtech corporation – tecnología y propiedad de LoRa:

- La tecnología LoRa es propiedad de Semtech Corporation, empresa especializada en el diseño de semiconductores para comunicaciones inalámbricas de largo alcance. LoRa se basa en modulación chirp, lo que le permite alcanzar distancias de hasta 15 km, operar con alta sensibilidad (hasta -148 dBm en algunos modelos) y ofrecer una alta robustez frente a interferencias. Además, se caracteriza por un bajo consumo energético, lo que la convierte en una tecnología ideal para aplicaciones en monitoreo ambiental, industrial y minero en zonas remotas (31).

Sobre el sensor de tormentas AS3935 (WCMCU3935):

Características técnicas del AS3935:

- El sensor AS3935 es un circuito integrado de detección de rayos que emplea un receptor de radiofrecuencia de alta sensibilidad y un algoritmo embebido de análisis de señales. Diseñado para aplicaciones que requieren monitoreo atmosférico preciso, este sensor es capaz de detectar descargas eléctricas en un radio de hasta 40 kilómetros. La estimación de la distancia al frente de tormenta se realiza en catorce niveles discretos, desde 1 km hasta 40 km. El sensor puede comunicarse con sistemas embebidos mediante interfaces I²C o SPI, lo que permite su integración en diversas plataformas electrónicas (31).

Tabla 7. Parámetros técnicos del AS3935

Parámetro	Valor típico
Rango de detección	Hasta 40 km
Estimación de distancia	1 km a 40 km (14 pasos)
Interfaz	I ² C o SPI
Voltaje de operación	2.4 V – 5.5 V
Corriente en modo activo	~350 μ A
Corriente en modo escucha	~60 μ A
Corriente en modo apagado	~1 μ A
Temperatura de operación	–40 °C a +85 °C
Detección	Nube-tierra e intranube
Algoritmo de rechazo de ruido	Integrado

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

- El voltaje de operación oscila entre 2.4 V y 5.5 V, adaptándose a diversas fuentes de alimentación. En modo activo, el consumo de corriente es del orden de 350 μ A, mientras que en modo escucha se reduce a aproximadamente 60 μ A, y en modo de apagado desciende a 1 μ A, lo que permite configuraciones de bajo consumo energético. Su rango térmico operativo abarca desde –40 °C hasta +85 °C, adecuado para entornos extremos. Además, el AS3935 es capaz de distinguir entre descargas intranube y nube-tierra, y cuenta con un algoritmo interno de rechazo de ruido electromagnético, el cual minimiza falsas detecciones ocasionadas por interferencias industriales o electrónicas (31).

Estimación de distancia:

- La estimación de la distancia al rayo no se basa en una medición directa, sino en una aproximación derivada de la intensidad del campo electromagnético captado por la antena interna del sensor. A mayor intensidad, menor es la distancia al frente de tormenta. Esta relación se expresa mediante una fórmula empírica del tipo: $d = k / E$, donde d representa la distancia estimada en kilómetros, E es la intensidad del campo eléctrico medida en voltios por metro (V/m), y k es una constante empírica que varía típicamente entre 1,000 y 10,000, según condiciones de calibración y entorno (31).

Ecuación 6: Estimación de distancia

$$d = \frac{k}{E}$$

- Por ejemplo, si se registra una intensidad de 2,500 V/m y se asume un valor de k igual a 10,000, la distancia estimada será de 4 km. Esta aproximación es útil para generar alertas

tempranas en sistemas de seguridad industrial o minera, donde el conocimiento anticipado de la proximidad de una tormenta es crucial para la activación de protocolos de evacuación o suspensión de actividades (31).

$$d = \sqrt{\frac{10,000}{2,500}} = \sqrt{4} = 2 \text{ km}$$

Cálculo alternativo por tiempo de llegada:

- Como método complementario, es posible estimar la distancia de una descarga eléctrica a partir del tiempo transcurrido entre el impacto del rayo y la detección de la señal electromagnética por parte del sensor. Este cálculo considera que la propagación del pulso electromagnético ocurre a una velocidad cercana a la de la luz en el vacío (aproximadamente 300,000 km/s). La distancia se determina utilizando la fórmula: $d = v \times t$, donde d es la distancia en kilómetros, v representa la velocidad de propagación (300,000 km/s), y t es el tiempo medido en segundos (31).

Ecuación 7: Cálculo alternativo por tiempo de llegada

$$d = v \cdot t$$

- Por ejemplo, si el sistema registra un tiempo de 5 microsegundos (5×10^{-6} s), el cálculo resulta en una distancia estimada de 1.5 km. Aunque este método no es implementado directamente por el sensor AS3935, puede utilizarse en sistemas más complejos que sincronicen señales múltiples o combinen información de varios sensores para obtener datos más precisos sobre la ubicación de una descarga (31).

$$d = 300,000 \cdot 5 \times 10^{-6} = 1.5 \text{ km}$$

Sobre el Microcontrolador ESP32-WROOM-32D:

Especificaciones técnicas:

- El ESP32-WROOM-32D es un módulo de conectividad inalámbrica de alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems. Está basado en el microprocesador ESP32-D0WD, el cual incorpora un procesador dual-core Xtensa LX6 con una frecuencia operativa ajustable

- entre 80 MHz y 240 MHz. Dispone de una memoria SRAM interna de 520 KB y una memoria flash externa de 4 MB, adecuada para el almacenamiento de firmware y datos (31).
- En cuanto a conectividad, el módulo integra Wi-Fi conforme al estándar IEEE 802.11 b/g/n, alcanzando velocidades de hasta 150 Mbps, y Bluetooth versión 4.2, compatible con modos BR/EDR y BLE. Cuenta con 34 pines de propósito general (GPIO), además de periféricos analógicos que incluyen un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits con 18 canales y dos salidas de convertidor digital a analógico (DAC) (31).
 - El consumo energético en modo activo con Wi-Fi habilitado es del orden de 80 mA, mientras que en modo de suspensión profunda (deep sleep) desciende a valores inferiores a 10 μ A, lo que permite su uso en sistemas alimentados por baterías. Su rango de temperatura operativa abarca desde -40°C hasta $+85^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace apto para entornos industriales o de minería de gran altitud (31).

Tabla 8. *Parámetros técnicos del microcontrolador ESP32-WROOM-32D*

Característica	Valor
Núcleo	Xtensa LX6 dual-core (80–240 MHz)
Memoria RAM	520 KB SRAM
Memoria Flash	4 MB (externa)
Wi-Fi	802.11 b/g/n (hasta 150 Mbps)
Bluetooth	v4.2 BR/EDR + BLE
GPIOs	34 pines I/O
ADC / DAC	12-bit ADC (18 canales), 2 DAC
Consumo en modo activo	$\sim 80\text{ Ma}$
Consumo en deep sleep	$<10\text{ }\mu\text{A}$
Temperatura de operación	-40°C a $+85^{\circ}\text{C}$

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Cálculo de velocidad de procesamiento:

- La capacidad de procesamiento del ESP32 permite ejecutar operaciones de cómputo intensivo en tiempos reducidos. Considerando una frecuencia máxima de operación de 240 MHz, una tarea que requiera un millón de ciclos de CPU puede ejecutarse en un tiempo aproximado de 4.17 milisegundos. Este valor se obtiene al dividir la cantidad de ciclos por la frecuencia del reloj del procesador, permitiendo estimar el tiempo de ejecución de algoritmos o tareas críticas dentro del sistema embebido (31).

Ecuación 8. Cálculo de velocidad de procesamiento

$$t = \frac{\text{ciclos}}{\text{frecuencia}} = \frac{1 \times 10^6}{240 \times 10^6} = 4.17\text{ ms}$$

Cálculo de consumo energético:

- El consumo energético del ESP32-WROOM-32D se calcula a partir de la corriente, el voltaje de alimentación y el tiempo de operación. Utilizando una corriente promedio de 80 mA (0.08 A), un voltaje de 3.3 V y un tiempo de 1 segundo, se obtiene un consumo energético de aproximadamente 0.264 Wh por segundo de operación activa. En modo de suspensión profunda, el consumo disminuye drásticamente, alcanzando niveles menores a 10 μ A, lo que representa una eficiencia energética significativa para aplicaciones de sensado periódico o monitoreo de bajo tráfico (31).

Ecuación 9: Cálculo de consumo energético

$$E = I \cdot V \cdot t$$

$$E = 10 \times 10^{-6} \cdot 3.3 \cdot 3600 = 0.119 \text{ mWh/h}$$

Comparación de modos de energía:

- El ESP32 ofrece varios modos de operación energética, lo que permite adaptar el consumo a las necesidades del sistema. En modo activo, con Wi-Fi habilitado, la corriente típica es de aproximadamente 80 mA, con respuesta inmediata, ideal para transmisión de datos en tiempo real. El modo de bajo consumo (light sleep) reduce la corriente a cerca de 0.8 mA y permite mantener el reloj activo, con tiempos de respuesta inferiores a 1 milisegundo. Finalmente, el modo de suspensión profunda (deep sleep) consume del orden de 10 μ A, con un tiempo de reactivación de aproximadamente 100 milisegundos, siendo adecuado para sistemas que requieren largos períodos de inactividad intercalados con breves transmisiones o mediciones (31).

Tabla 9. Comparación de modos de energía

Modo	Corriente típica	Tiempo de respuesta	Aplicación típica
Activo (Wi-Fi)	~80 mA	Inmediato	Transmisión de datos
Light Sleep	~0.8 mA	<1 ms	Espera con reloj activo
Deep Sleep	~10 μ A	~100 ms	Sensado periódico

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Sobre el sistema de detección y alerta de tormentas eléctricas en minería de altura (caso Antamina):

Niveles de alerta y protocolo de respuesta:

- En operaciones mineras de gran altitud como Antamina, la detección oportuna de tormentas eléctricas es esencial para mitigar riesgos sobre el personal, equipos y estructuras. El sistema

implementado contempla tres niveles de alerta en función de la distancia estimada de la tormenta respecto a la zona de operación (31).

- El nivel de alerta amarilla se activa cuando una descarga eléctrica se encuentra entre 16 y 32 km de distancia. En este escenario, se intensifica el monitoreo atmosférico y se identifica la ubicación de refugios. La alerta naranja se establece para tormentas ubicadas entre 8 y 16 km, momento en el cual se suspenden tareas críticas como trabajos en altura, izajes y actividades con explosivos. Finalmente, la alerta roja corresponde a tormentas ubicadas a menos de 8 km o cuando se detecta directamente una descarga dentro del perímetro crítico; esta condición implica la paralización inmediata de las actividades y el desplazamiento del personal hacia zonas seguras (31).

Tabla 10. Comparación de modos de energía

Nivel de alerta	Distancia estimada	Color	Acción requerida
Alerta amarilla	16 – 32 km		Identificar refugios, monitoreo activo
Alerta naranja	8 – 16 km		Suspender trabajos en altura, izaje y explosivos
Alerta roja	0 – 8 km		Refugiarse inmediatamente, paralizar actividades

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

- El protocolo de Antamina contempla que, en condiciones de detección directa dentro del radio crítico, la alerta roja puede activarse sin necesidad de transitar por los niveles previos, priorizando así la protección inmediata (31).

Estimación de distancia por intensidad de campo:

- Una de las metodologías empleadas para estimar la proximidad de una descarga eléctrica se basa en la intensidad del campo electromagnético detectado por los sensores. Esta estimación no representa una medición directa, sino una aproximación empírica basada en la relación inversa entre la distancia al rayo y la magnitud del campo recibido (31).

Ecuación 10: Estimación de distancia por intensidad de campo

$$d = \sqrt{\frac{k}{E}}$$

- La fórmula utilizada es de la forma: $d = k / E$, donde d representa la distancia estimada en kilómetros, E corresponde a la intensidad del campo eléctrico medida en voltios por metro (V/m), y k es una constante empírica cuyo valor se sitúa típicamente entre 1,000 y 10,000, dependiendo del entorno y de la calibración del sensor. Esta estimación es fundamental en sensores como el AS3935 y en sistemas de monitoreo que operan con medición de intensidad de pulso (31).

Estimación por tiempo de llegada:

- Otra técnica aplicable para estimar la distancia a una descarga atmosférica se basa en el tiempo que transcurre entre el impacto del rayo y la detección del pulso electromagnético. Dado que las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad cercana a la de la luz, la fórmula correspondiente es: $d = v \times t$, donde d representa la distancia en kilómetros, v es la velocidad de propagación (aproximadamente 300,000 km/s) y t es el tiempo medido en segundos. Este método requiere una alta precisión en la sincronización de eventos y es comúnmente utilizado en sistemas combinados de detección, especialmente aquellos basados en triangulación de señales o múltiples sensores distribuidos (31).

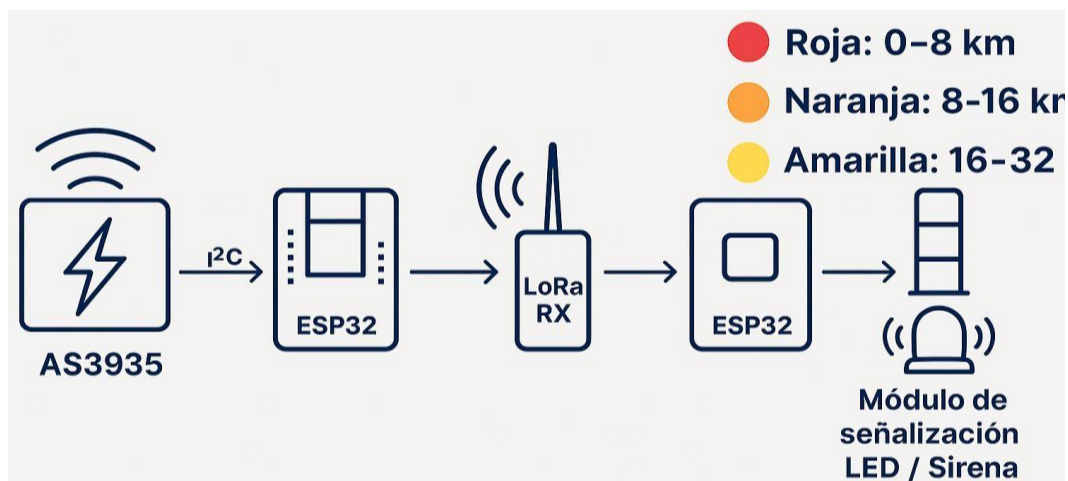
Ecuación 11: Estimación por tiempo de llegada

$$d = v \cdot t$$

Sistema de alerta:

- Los sistemas de alerta instalados en operaciones mineras como Antamina suelen incluir una combinación de sensores fijos con cobertura extendida, detectores portátiles para zonas específicas, balizas visuales, sirenas de advertencia y plataformas de comunicación con el personal. Aunque no se muestra aquí la imagen referencial, estos sistemas están diseñados para integrarse con protocolos de emergencia y plataformas de monitoreo meteorológico, facilitando la toma de decisiones en tiempo real (31).

Figura 2. *Imagen referencial del sistema de alerta*



Nota: Figura extraída de una fuente externa (31)

Normas aplicables:

- El diseño, implementación y operación de los sistemas de detección de tormentas eléctricas deben estar alineados con normativas internacionales y regulaciones nacionales. La norma IEC 62793 establece los lineamientos para sistemas de detección de tormentas eléctricas, mientras que la NFPA 780 regula los sistemas de protección contra rayos, incluyendo el diseño de pararrayos (31).
- En el contexto peruano, el DS-024-2016-EM establece disposiciones sobre seguridad y salud ocupacional en minería, incluyendo la gestión de riesgos eléctricos. La norma IEEE Std 1243-1997 proporciona una guía para la estimación del riesgo por rayos, y la UNE-EN 50536 describe requisitos técnicos para sistemas de aviso de tormentas en instalaciones industriales. Estas normativas sustentan la implementación de procedimientos y sistemas en ambientes de alto riesgo como la minería de altura (31).

Tabla 11. Normas aplicables

Norma / Código	Aplicación específica
IEC 62793	Sistemas de detección de tormentas eléctricas
NFPA 780	Diseño de pararrayos y protección contra rayos
DS-024-2016-EM	Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería
IEEE Std 1243-1997	Guía para estimación de riesgo por rayos
UNE-EN 50536	Sistemas de aviso de tormentas para instalaciones industriales

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

Sobre la conexión de componentes al ESP32:

Conexión del sensor WCMCU3935 (SPI):

- El sensor AS3935, contenido en el módulo WCMCU3935, se comunica mediante la interfaz SPI. Los pines se conectan de la siguiente manera:

- El pin MOSI del sensor (A1) se conecta al pin 23 del ESP32.
- El pin MISO (A0) al pin 19 del ESP32.
- El pin SCK (SCL) al pin 18 del ESP32.
- El pin CS se vincula al pin 5 del ESP32 como selección de chip.
- El pin IRQ, encargado de emitir la interrupción por detección de rayo, se conecta al pin 2.
- El pin GND se conecta al GND del ESP32 y el pin VCC a la salida de 3.3 V (31).

Tabla 12. Conexión del Sensor WCMCU3935 (SPI)

Pin Sensor	Pin ESP32
MOSI (A1)	Pin 23 (MOSI ESP32)
MISO (A0)	Pin 19 (MISO ESP32)
SCK (SCL)	Pin 18 (SCK ESP32)
CS	Pin 5 (Chip Select ESP32)
IRQ	Pin 2 (Interrupción ESP32)
GND	GND del ESP32
VCC	3.3v del ESP32

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Conexión del módulo LoRa (UART)

- El módulo LoRa se comunica a través de UART. Para configurarlo en modo normal, los pines M0 y M1 deben conectarse a GND. El pin RXD del módulo se conecta al pin TX (17) del ESP32, y el TXD al pin RX (16) del ESP32. El GND del módulo debe estar conectado al GND del ESP32. La alimentación puede ser de 3.3 V o 5 V, dependiendo del modelo, y en caso de usar 5 V, se recomienda un convertidor de nivel lógico para proteger los pines del ESP32 (31).

Tabla 13. Conexión del módulo LoRa (UART)

Pin LoRa	Conexión
M0	GND (Modo normal)
M1	GND (Modo normal)
RXD	Pin 17 (TX ESP32)
TXD	Pin 16 (RX ESP32)
GND	GND del ESP32
VCC	3.3V o 5V

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Sobre la programación en MicroPython para el Emisor:

Configuración SPI y UART:

- El código configura la interfaz SPI con una velocidad de 1 MHz, polaridad 0 y fase 0. Los pines 18 (SCK), 23 (MOSI), y 19 (MISO) se asignan a la comunicación SPI. El pin 5 se utiliza como selección de chip (CS), y el pin 2 como interrupción.
- Simultáneamente, se configura la UART1 con un baud rate de 9600, y se asignan los pines 17 (TX) y 16 (RX) para la comunicación con el módulo LoRa (31).

Tabla 14. Configuración SPI y UART

Interfaz	Parámetros
SPI	SPI(1), baudrate=1MHz, SCK=18, MOSI=23, MISO
UART	UART(1), baudrate=9600, TX=17, RX=16

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Calibración del sensor:

- Antes de iniciar la operación, el sistema ejecuta una rutina de calibración simulada para el sensor AS3935. Este procedimiento representa el proceso habitual requerido para activar la estimación de distancia en entornos exteriores (31).

Tabla 15. Calibración del sensor

Paso	Acción
1	Inicio de calibración
2	Espera de 2 segundos
3	Confirmación de calibración completada

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Lectura de distancia y envío por LoRa:

- El código incluye una función para leer la distancia del rayo a través de SPI mediante una instrucción ficticia de lectura. Posteriormente, se establece una rutina de interrupción que interpreta el nivel de alerta en función de la distancia estimada:
 - Si el rayo se detecta entre 1 y 8 km, se genera el mensaje hexadecimal "ff02 03 45" (alerta roja).
 - Si la distancia está entre 8 y 16 km, se envía "ff02 03 46" (alerta naranja).
 - Si se encuentra entre 16 y 32 km, se transmite "ff02 03 47" (alerta amarilla).
 - Cada mensaje se imprime en consola y se envía a través de la UART al módulo LoRa para su transmisión inalámbrica (31).

Tabla 16. Lectura de distancia y envío por LoRa

Distancia (km)	Mensaje	Alerta
1 – 8	ff02 03 45	Roja
8 – 16	ff02 03 46	Naranja

16 - 32	ff02 03 47	Amarilla
---------	------------	----------

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Bucle principal

- El sistema entra en un bucle de espera activa, permitiendo la ejecución continua mientras monitorea la señal de interrupción en tiempo real (31).

Tabla 17. *Bucle principal*

Código	Descripción
while True	Mantiene el sistema activo
time.sleep(1)	Reduce carga del sistema

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

Sobre la programación en MicroPython para el Receptor:

Configuración de UART:

- El ESP32 receptor configura su UART1 con el mismo baud rate (9600) y utiliza los mismos pines físicos (TX=17, RX=16) para asegurar compatibilidad con el transmisor (31).

Tabla 18. *Configuración de UART*

Parámetro	Valor
Baudrate	9600
TX	Pin 17
RX	Pin 16

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

Recepción de mensajes LoRa:

- El receptor permanece en modo escucha constante, verificando si hay datos disponibles en el buffer UART. Si se detecta un mensaje, este se lee, decodifica y muestra en consola para validación del sistema. Se incluye un retardo de un segundo para estabilizar la lectura continua (31).

Tabla 19. *Recepción de mensajes LoRa*

Acción	Explicación
uart.any()	Verifica si hay datos
uart.read()	Lee el mensaje
mensaje.decoder()	Muestra mensaje recibido

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

Recomendaciones de prueba:

- Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, se recomienda cargar el código en ambos dispositivos. El emisor debe iniciar el monitoreo de tormentas, mientras que el receptor debe mantenerse en ejecución y conectado mediante consola serial (como Thonny o PuTTY). Las alertas deben visualizarse conforme a la distancia detectada por el sensor (31).

Tabla 20. *Recomendaciones de prueba*

Paso	Acción
1	Cargar código en ESP32 receptor
2	Activar detección en emisor
3	Observar mensajes en consola (Thonny)

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31).

2.2.1.1. Eficacia de la detección

El sistema de detección de tormentas eléctricas mediante comunicación LoRaWAN se fundamenta en la capacidad de identificar con precisión la presencia de actividad eléctrica en la atmósfera. La eficacia de esta detección se mide a través de la cantidad de eventos detectados, el tiempo de respuesta y el alcance del sistema. Un sistema eficaz debe garantizar una alta tasa de detección para proporcionar alertas oportunas y reducir los riesgos de exposición del personal a descargas atmosféricas (22).

La cantidad de detecciones es un indicador clave de la eficacia del sistema, ya que determina su capacidad para identificar eventos eléctricos en la atmósfera. La implementación de sensores sensibles y algoritmos avanzados permite mejorar este indicador. Un alto número de detecciones incrementa la confiabilidad del sistema, asegurando que ninguna tormenta eléctrica pase desapercibida y, por lo tanto, disminuyendo la vulnerabilidad del personal ante posibles descargas (25).

El tiempo de detección es otro aspecto crucial que influye en la eficacia del sistema. Un sistema eficiente debe reducir al mínimo el intervalo entre la generación de actividad eléctrica y su identificación por los sensores. La baja latencia en la transmisión de datos mediante comunicación LoRaWAN permite que las alertas lleguen rápidamente a los usuarios. De este

modo, se facilita la toma de decisiones y se mejora la capacidad de reacción ante tormentas eléctricas en áreas de riesgo (28).

El alcance de la detección se relaciona con la capacidad del sistema para cubrir una amplia zona geográfica. La tecnología LoRaWAN permite la transmisión de datos a largas distancias, favoreciendo la cobertura de grandes áreas con un número reducido de dispositivos. Esto es esencial para proteger a trabajadores que operan en entornos abiertos, donde las tormentas pueden desarrollarse rápidamente y representar un peligro inminente (21).

Para garantizar una detección eficaz, el sistema debe integrar múltiples sensores estratégicamente ubicados. La combinación de mediciones de campo eléctrico, electromagnetismo y ruido atmosférico permite aumentar la precisión del sistema. Además, la implementación de redes de detección interconectadas mediante LoRaWAN mejora la recopilación y análisis de datos, optimizando la capacidad predictiva del sistema y reduciendo los falsos positivos (24).

El análisis de datos en tiempo real es fundamental para mejorar la eficacia del sistema. La integración de algoritmos de procesamiento permite diferenciar entre descargas eléctricas naturales y otras fuentes de interferencia. Con ello, se logra una detección más confiable y una mayor precisión en las alertas emitidas. Esto contribuye a minimizar la exposición del personal a riesgos asociados a tormentas eléctricas (27).

El uso de la comunicación LoRaWAN favorece la eficacia del sistema al garantizar la transmisión estable de datos sobre la detección de tormentas. A diferencia de otras tecnologías inalámbricas, LoRaWAN permite la conectividad en entornos de difícil acceso, asegurando que la información llegue a los sistemas de monitoreo sin interrupciones. Esto refuerza la capacidad del sistema para generar alertas tempranas y prevenir accidentes laborales por descargas atmosféricas (21).

La implementación de mecanismos de calibración y mantenimiento periódico es esencial para asegurar la eficacia del sistema. La actualización de firmware en los sensores y la optimización de la comunicación LoRaWAN contribuyen a mejorar la detección. Además, la supervisión constante de los parámetros de operación permite identificar posibles fallas y corregirlas oportunamente, evitando errores en la identificación de tormentas eléctricas (23).

La validación del sistema a través de pruebas experimentales permite cuantificar su eficacia en la detección de tormentas eléctricas. Mediante la comparación de datos con registros

meteorológicos, se verifica la precisión del sistema y se ajustan los algoritmos de detección. De esta forma, se garantiza que la tecnología LoRaWAN desempeñe un papel efectivo en la reducción de riesgos laborales asociados a descargas atmosféricas (25).

La eficacia de la detección en un sistema basado en LoRaWAN depende de la cantidad de detecciones, el tiempo de respuesta y el alcance del monitoreo. La integración de sensores avanzados, algoritmos de procesamiento y redes de comunicación confiables fortalece la capacidad del sistema para generar alertas oportunas. Con ello, se contribuye a la protección del personal expuesto a descargas atmosféricas y se optimiza la gestión del riesgo en entornos laborales.

Sobre las alertas de tormentas eléctricas y normativa asociada:

Alerta de tormentas eléctricas:

- La activación de alertas de tormentas eléctricas constituye un mecanismo preventivo de comunicación operativa destinado a salvaguardar la integridad física del personal frente a fenómenos atmosféricos peligrosos. Estas alertas permiten identificar la proximidad de descargas eléctricas y establecer acciones diferenciadas según el nivel de riesgo (31).
- Se clasifican en tres categorías —amarilla, naranja y roja— de acuerdo con la distancia estimada de caída de rayos y con el nivel de intervención requerido. Cada tipo de alerta se encuentra respaldado por la legislación nacional en seguridad y salud ocupacional, así como por el reglamento específico del sector minero (31).

Alerta amarilla:

- La alerta amarilla se declara cuando se detectan descargas eléctricas dentro de un radio de 16 a 32 kilómetros respecto a la zona de operación. En este escenario, el riesgo es moderado, por lo que las actividades pueden continuar bajo monitoreo. Los supervisores y trabajadores deben mantenerse en vigilancia constante de las condiciones atmosféricas y estar atentos a las comunicaciones por radio (31).
- Este nivel de alerta se encuadra dentro del enfoque preventivo de las normas de seguridad y salud laboral establecidas en la Ley N° 29783, el Decreto Supremo N° 005-2012-TR y el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024-2016-EM y su modificatoria DS 023-2017-EM), orientado a la identificación temprana de peligros y la adopción de medidas de control progresivas (31).

Alerta naranja:

- La alerta naranja indica la presencia de descargas eléctricas en un rango de 8 a 16 kilómetros, lo que implica una alta probabilidad de ingreso de una tormenta al área crítica en pocos minutos. En este nivel, se requiere suspender actividades que impliquen exposición directa, como trabajos en altura al aire libre, los cuales deben interrumpirse de inmediato, ubicando al personal a nivel de piso mientras se evalúa la evolución del fenómeno. Las labores de izaje también deben cesar, asegurando las cargas en posición estable (31).
- Se permite la continuidad de actividades a nivel de piso siempre que exista acceso rápido a refugios (menos de 100 metros). Las tareas en líneas eléctricas de media y alta tensión cuya extensión supere los 16 kilómetros también deben suspenderse. Este nivel de alerta se ajusta a las exigencias normativas que obligan a paralizar actividades de riesgo ante condiciones meteorológicas adversas, en concordancia con la legislación anteriormente mencionada (31).

Alerta roja:

- La alerta roja representa el nivel más crítico de riesgo. Se activa cuando se detecta la caída de un rayo dentro de un radio de 0 a 8 kilómetros de la zona de operación. La alerta puede emitirse directamente sin pasar por las anteriores si se confirma la actividad eléctrica dentro del área crítica (31).
- Todas las labores al aire libre deben cesar de inmediato, y el personal debe dirigirse a los refugios previamente identificados. En esta fase, la observación directa de condiciones severas (nubes densas, granizo, truenos, corrientes estáticas) por parte de supervisores también puede justificar la paralización de actividades, incluso si el sistema de alerta automatizado aún no ha detectado la tormenta (31).

2.2.1.1.1. Cantidad de detecciones

La cantidad de detecciones de tormentas eléctricas en un sistema basado en comunicación LoRaWAN es un factor determinante para evaluar su eficacia. Un sistema de detección debe identificar la mayor cantidad posible de eventos atmosféricos con el fin de alertar oportunamente al personal expuesto a descargas eléctricas. La capacidad del sistema para registrar múltiples descargas dentro de un área geográfica definida influye directamente en la efectividad de la prevención de riesgos (29).

El uso de LoRaWAN permite la detección de tormentas eléctricas a grandes distancias y con una cobertura amplia, lo que incrementa la cantidad de eventos detectados. Este protocolo de comunicación permite la transmisión de datos en tiempo real desde sensores desplegados en ubicaciones estratégicas. De este modo, la información sobre la actividad eléctrica en la atmósfera puede ser procesada de manera eficiente para generar alertas oportunas (28).

La detección de tormentas eléctricas mediante LoRaWAN se basa en sensores especializados que captan variaciones en el campo eléctrico atmosférico. Estos sensores detectan los impulsos electromagnéticos generados por descargas eléctricas y envían los datos a un servidor central. La capacidad del sistema para identificar un alto número de eventos en un periodo determinado mejora su eficacia y proporciona mayor confiabilidad en la prevención de accidentes (25).

El incremento en la cantidad de detecciones mejora la capacidad predictiva del sistema, permitiendo estimar patrones de actividad eléctrica en la atmósfera. Cuando se detectan numerosas descargas en una zona, se pueden activar protocolos de seguridad con anticipación. Esto es esencial para reducir el riesgo de exposición del personal y minimizar la posibilidad de incidentes relacionados con tormentas eléctricas (21).

El procesamiento de datos obtenidos a través de la comunicación LoRaWAN permite mejorar la precisión de las detecciones. A través de algoritmos avanzados, los datos recopilados se analizan para determinar patrones de tormentas y su evolución. Esto posibilita la generación de alertas con base en información precisa y confiable, lo que refuerza la eficacia del sistema en la detección de eventos atmosféricos peligrosos (23).

El sistema de detección basado en LoRaWAN está diseñado para operar de manera continua, registrando eventos sin interrupciones y optimizando la recolección de datos. La automatización del monitoreo permite detectar descargas eléctricas con alta frecuencia, lo que mejora la capacidad de respuesta. Esta operatividad constante fortalece la prevención y la mitigación de riesgos asociados a tormentas eléctricas (22).

La cantidad de detecciones también influye en la configuración de los umbrales de alarma, ya que un sistema con alta sensibilidad puede identificar tormentas con mayor precisión. Al registrar un gran número de eventos, se pueden definir criterios más rigurosos para la emisión de alertas. De esta manera, se optimiza la respuesta del personal y se evita la exposición innecesaria a descargas eléctricas (26).

El uso de LoRaWAN para la transmisión de datos sobre tormentas eléctricas permite una gestión eficiente de la información en tiempo real. La conexión de múltiples sensores distribuidos en una región amplia posibilita la recopilación de datos de diversas fuentes. Este enfoque mejora la cantidad de detecciones y contribuye a un análisis más preciso de las condiciones meteorológicas (27).

El incremento en la cantidad de detecciones mediante LoRaWAN impacta directamente en la seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas. Un sistema con alta capacidad de detección reduce la probabilidad de incidentes al proporcionar advertencias oportunas. Así, se mejora la protección de trabajadores que operan en entornos de riesgo, minimizando accidentes y daños materiales (22).

La implementación de un sistema con alta capacidad de detección permite evaluar su eficacia de manera objetiva. La recopilación de datos sobre la cantidad de eventos registrados posibilita su comparación con las condiciones climáticas observadas. Esto permite mejorar continuamente los algoritmos de detección y optimizar el desempeño del sistema, garantizando una protección efectiva contra tormentas eléctricas.

2.2.1.1.2. Tiempo de detección

El tiempo de detección en un sistema de alerta de tormentas eléctricas mediante comunicación LoRaWAN es un factor determinante en su eficacia. La capacidad del sistema para identificar descargas eléctricas en el menor tiempo posible permite tomar medidas preventivas con rapidez. La detección temprana reduce el riesgo de exposición del personal a condiciones peligrosas. Un tiempo de respuesta reducido implica una mayor fiabilidad del sistema, asegurando que las alertas sean emitidas con suficiente anticipación para minimizar posibles daños (21).

La comunicación LoRaWAN influye directamente en la rapidez con la que los datos son transmitidos y procesados. Su bajo consumo energético y gran alcance permiten una vigilancia continua sin interrupciones en la recolección de datos. La velocidad de detección depende de la capacidad de los sensores para identificar cambios en los campos eléctricos atmosféricos y comunicar esta información en tiempo real. Un sistema eficiente minimiza la latencia en la transmisión de datos y optimiza la toma de decisiones (22).

La ubicación y calibración de los sensores afectan el tiempo de detección del sistema. Sensores correctamente distribuidos permiten un monitoreo amplio y continuo, asegurando que las

señales sean captadas y transmitidas sin demoras. Además, una calibración precisa garantiza que los valores medidos sean fiables, evitando retrasos en la generación de alertas. La combinación de sensores avanzados y algoritmos de procesamiento rápido incrementa la eficacia del sistema en la identificación de tormentas eléctricas (24).

El tiempo de detección también depende de la capacidad del sistema para diferenciar entre señales eléctricas de tormentas y otras interferencias. Algoritmos de filtrado y análisis de datos permiten descartar falsas alarmas y optimizar el tiempo de respuesta. La implementación de modelos predictivos mejora la identificación de patrones eléctricos asociados con tormentas, reduciendo la incertidumbre y agilizando la emisión de alertas oportunas para la protección del personal (25).

El procesamiento de datos en la nube facilita la rápida identificación de tormentas eléctricas. La integración de la comunicación LoRaWAN con plataformas de análisis permite una interpretación eficiente de la información recopilada. A través de servidores centralizados, los datos de múltiples sensores pueden ser analizados en conjunto, reduciendo el tiempo necesario para confirmar una amenaza real. Este enfoque optimiza la gestión de alertas y mejora la capacidad del sistema para detectar eventos con precisión (27).

Las pruebas de rendimiento son fundamentales para evaluar la rapidez del sistema de detección. Mediante simulaciones y pruebas de campo, se determina la capacidad del sistema para identificar descargas eléctricas en diferentes condiciones atmosféricas. El análisis de la velocidad de detección en distintos escenarios permite realizar ajustes en la configuración de sensores y algoritmos para mejorar su efectividad. La optimización continua del sistema es clave para garantizar tiempos de detección adecuados (28).

La sincronización entre sensores es otro factor crucial para minimizar el tiempo de detección. Un sistema con múltiples puntos de monitoreo debe coordinar la transmisión de datos para evitar redundancias y demoras en la identificación de tormentas. La comunicación LoRaWAN facilita esta coordinación al permitir que los dispositivos operen en red con bajo consumo de energía. Un sistema bien sincronizado mejora la rapidez en la emisión de alertas y aumenta la eficacia general del monitoreo (21).

El análisis de registros históricos de detección permite mejorar los tiempos de respuesta del sistema. Comparando eventos previos, se pueden identificar patrones en la aparición de tormentas y ajustar los algoritmos para anticipar mejor los riesgos. Además, la recopilación de

datos en largo plazo ayuda a optimizar la calibración de los sensores, reduciendo los tiempos de detección y mejorando la confiabilidad del sistema de alerta temprana (22).

El tiempo de detección impacta directamente en la percepción de seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas. Un sistema con tiempos de respuesta rápidos genera mayor confianza entre los trabajadores, reduciendo la incertidumbre y aumentando la preparación ante condiciones adversas. La eficacia de la detección no solo depende de la velocidad del sistema, sino también de la claridad y precisión con la que se comunican las alertas a los usuarios (23).

La reducción del tiempo de detección en un sistema de alerta de tormentas eléctricas basado en comunicación LoRaWAN es esencial para minimizar riesgos. La combinación de sensores bien calibrados, algoritmos optimizados y transmisión eficiente de datos permite una detección rápida y precisa. La mejora continua del sistema a través de análisis de desempeño y sincronización de sensores asegura tiempos de detección adecuados, contribuyendo a la seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas en entornos de trabajo vulnerables.

2.2.1.1.3. Alcance de la detección

El alcance de la detección en un sistema de alerta de tormentas eléctricas determina la capacidad del sistema para identificar descargas atmosféricas en un área extensa. Una cobertura amplia permite detectar tormentas a mayor distancia, proporcionando tiempo suficiente para la toma de decisiones preventivas. En este contexto, la comunicación LoRaWAN es clave, ya que permite la transmisión de datos de sensores ubicados en diferentes puntos geográficos sin necesidad de infraestructura de red convencional. Así, se logra una mayor eficacia en la detección de tormentas eléctricas (26).

El uso de LoRaWAN en la detección de tormentas eléctricas se basa en su capacidad para operar en bandas de radiofrecuencia de largo alcance. Este tipo de comunicación posibilita la recolección de datos en tiempo real desde sensores distribuidos en grandes extensiones de terreno. Gracias a su robustez en la transmisión de datos, el sistema puede recopilar información sobre la actividad eléctrica atmosférica con alta precisión, mejorando la eficacia del monitoreo de eventos climáticos adversos (27).

La eficacia del alcance de la detección depende de la ubicación estratégica de los sensores y la capacidad de los dispositivos para registrar descargas eléctricas. Para maximizar la cobertura, se implementa una red de sensores interconectados a través de LoRaWAN, permitiendo la supervisión en tiempo real de la actividad eléctrica. Esto posibilita que el sistema identifique

patrones de tormentas antes de que representen un peligro inminente, aumentando la efectividad de las alertas emitidas (28).

El sistema de detección no solo debe abarcar un amplio radio de cobertura, sino también garantizar la fiabilidad en la transmisión de datos. La capacidad de LoRaWAN para enviar información a largas distancias con bajo consumo energético favorece la operación continua del sistema. Además, su resistencia a interferencias electromagnéticas mejora la precisión en la recolección de datos, asegurando que la información sobre descargas eléctricas llegue oportunamente a los centros de monitoreo (29).

El alcance de la detección influye directamente en la capacidad de respuesta ante tormentas eléctricas. Una mayor cobertura del sistema permite alertar con mayor anticipación a los trabajadores expuestos a riesgos atmosféricos. De este modo, se logra mitigar incidentes relacionados con descargas eléctricas, proporcionando un margen de seguridad adicional en sectores donde la exposición a este tipo de fenómenos es alta. Así, la eficacia del sistema de detección se traduce en la reducción de riesgos laborales (22).

Para garantizar la máxima cobertura, la implementación del sistema debe considerar factores geográficos y climáticos. La disposición de sensores en áreas estratégicas mejora la capacidad de detección de tormentas en tiempo real. La topografía del terreno y la presencia de obstáculos naturales pueden afectar la propagación de las señales LoRaWAN, por lo que el diseño de la red debe contemplar estos elementos para optimizar la eficacia en la detección (21).

La integración de algoritmos de procesamiento de datos mejora la precisión en la interpretación de la información recolectada. Al analizar patrones de descargas eléctricas, el sistema puede identificar tendencias meteorológicas y emitir alertas con mayor anticipación. Esto es posible gracias a la comunicación confiable proporcionada por LoRaWAN, que permite el envío constante de datos desde sensores ubicados en zonas de alta exposición a tormentas eléctricas (24).

El alcance de la detección también depende de la capacidad del sistema para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes. Sensores con alta sensibilidad permiten detectar descargas eléctricas incluso en condiciones climáticas adversas. Gracias a la tecnología LoRaWAN, el sistema puede operar en ambientes hostiles sin perder la integridad de la información transmitida, asegurando así una detección eficaz de tormentas en diversas regiones (25).

El monitoreo continuo del desempeño del sistema es fundamental para evaluar su eficacia en la detección de tormentas eléctricas. La recopilación de datos sobre la cantidad de detecciones y la precisión de los registros permite realizar mejoras en la infraestructura de detección. Esto garantiza que el sistema mantenga un alto nivel de eficacia en la identificación de tormentas eléctricas, reduciendo así el riesgo de exposición del personal a descargas atmosféricas (27).

El alcance de la detección en un sistema de alerta de tormentas eléctricas determina su eficacia para identificar riesgos atmosféricos con antelación. La tecnología LoRaWAN permite una cobertura amplia y confiable, facilitando la transmisión de datos en tiempo real desde sensores distribuidos en diversas ubicaciones. Al optimizar la ubicación de sensores y mejorar la precisión en el análisis de datos, se logra un sistema eficaz que contribuye a la reducción de incidentes laborales por descargas eléctricas.

2.2.1.2. Eficiencia de la comunicación

La eficiencia de la comunicación en el sistema de detección de tormentas eléctricas mediante energía solar se fundamenta en la reducción de las interrupciones en la transmisión y la optimización del costo operativo. La incorporación de energía solar permite que el sistema funcione de manera autónoma, evitando dependencias de la red eléctrica y asegurando una transmisión continua. Esta autonomía garantiza que los datos meteorológicos sean enviados sin interrupciones, contribuyendo a la fiabilidad del sistema y a la protección del personal expuesto a descargas atmosféricas (21).

El uso de energía solar disminuye la vulnerabilidad del sistema ante cortes eléctricos, lo que resulta esencial en entornos remotos donde el suministro eléctrico es inestable. La generación de energía renovable permite mantener operativos los sensores y repetidores de señal sin interrupciones prolongadas. Al evitarse interrupciones en la transmisión, se optimiza el flujo de información meteorológica, asegurando que las alertas de tormentas eléctricas sean recibidas de manera oportuna y confiable (22).

Además de la continuidad operativa, la eficiencia de la comunicación se ve mejorada por la reducción del costo de operación al utilizar energía solar. La generación autónoma de electricidad evita gastos en infraestructura eléctrica convencional y en mantenimiento de redes de suministro. Esto permite que el sistema de detección funcione con menores costos a largo plazo, favoreciendo su sostenibilidad y viabilidad en diversas aplicaciones industriales y de seguridad laboral (23).

La implementación de paneles solares en el sistema de detección contribuye a minimizar la dependencia de fuentes de energía externas. Este enfoque permite que el sistema sea desplegado en ubicaciones estratégicas sin la necesidad de contar con acceso a la red eléctrica. Como resultado, la cobertura del sistema se amplía y se garantiza la comunicación continua de los datos recopilados, sin que el rendimiento del sistema se vea afectado por factores externos (27).

El almacenamiento de energía solar en baterías también juega un papel clave en la eficiencia de la comunicación. La capacidad de almacenar energía durante el día permite que el sistema continúe operando en horarios nocturnos o en condiciones climáticas adversas. Esto asegura que las alertas de tormentas eléctricas sean transmitidas sin interrupciones, incluso en situaciones de baja radiación solar, garantizando así la operatividad del sistema en todo momento (28).

Otro aspecto relevante de la eficiencia de la comunicación es la capacidad del sistema para mantener la integridad de los datos transmitidos. La estabilidad energética proporcionada por la energía solar reduce fluctuaciones en la alimentación eléctrica, evitando fallos en la transmisión de información. Como consecuencia, la precisión y fiabilidad de las alertas meteorológicas se mantienen constantes, beneficiando la toma de decisiones para la seguridad del personal (29).

La combinación de energía solar con sistemas de almacenamiento eficientes permite que la comunicación del sistema sea resistente a eventos climáticos extremos. La disponibilidad de energía almacenada permite que los dispositivos continúen operando incluso durante tormentas eléctricas, cuando la detección y transmisión de datos es más crítica. Este aspecto es fundamental para minimizar los riesgos del personal expuesto a condiciones meteorológicas adversas (23).

En términos de mantenimiento, la eficiencia de la comunicación mejora gracias a la reducción de intervenciones técnicas necesarias. La alimentación con energía solar disminuye la necesidad de reemplazo de baterías y de ajustes en la infraestructura eléctrica, reduciendo el tiempo de inactividad del sistema. De esta manera, se optimizan los recursos destinados al mantenimiento y se mejora la disponibilidad del sistema para el monitoreo continuo (24).

El uso de energía solar en la comunicación del sistema también contribuye a la sostenibilidad ambiental del proyecto. Al reducirse la dependencia de fuentes de energía convencionales, se disminuye la huella de carbono y se promueve el uso de tecnologías limpias. Esta característica

refuerza la viabilidad del sistema como una solución eficiente tanto en términos operativos como ecológicos (25).

La eficiencia de la comunicación en el sistema de detección de tormentas eléctricas se ve favorecida por el uso de energía solar al reducir las interrupciones en la transmisión y minimizar los costos operativos. La autonomía energética, la continuidad en la transmisión de datos y la reducción del mantenimiento son factores clave para garantizar una comunicación efectiva. Como resultado, se mejora la fiabilidad del sistema y se contribuye a la seguridad del personal frente a descargas atmosféricas.

Sobre el dimensionamiento del panel solar:

Datos iniciales:

- El sistema a alimentar requiere una corriente de operación de 62.09 mA, equivalente a 0.06209 A, con una tensión de alimentación de 12 VDC. Esto permite calcular la potencia eléctrica del dispositivo mediante la fórmula $P = I \times V$, resultando en una potencia de 0.745 W. Es importante considerar que algunos componentes internos del sistema operan en un rango de 3.3 a 3.7 VDC, por lo que se requiere regulación adecuada (31).

Tabla 21. *Datos iniciales*

Corriente del dispositivo (I)	: 62.09 mA = 0.06209 A
Tensión del dispositivo (V)	: 12 VDC (3.3-3.7VDC)
Potencia del dispositivo (P)	: $P = I \times V$

Nota: Tabla extraída de una fuente externa (31)

Ecuación 12: Potencia eléctrica

$$P = I \times V$$

$$P = 0.06209 \text{ A} \times 12 \text{ V}$$

$$P = 0.745 \text{ W}$$

Consumo diario:

- El consumo energético diario del sistema se obtiene multiplicando la potencia nominal por el tiempo de operación. Dado que el sistema permanece en funcionamiento continuo durante 24 horas, el consumo diario se calcula como $0.745 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 17.88 \text{ Wh}$. Esta estimación considera una operación constante sin interrupciones ni modos de bajo consumo (31).

Ecuación 13: Consumo diario

$$\text{Consumo diario (Wh)} = \text{Potencia nominal (W)} \times \text{Tiempo de operación (h)}$$

$$\text{Wh} = 0.745 \text{ W} \times 24 \text{ h}$$

$$\text{Wh} = 17.88$$

Capacidad de la batería:

- Para garantizar un margen de seguridad ante variaciones en el recurso solar y pérdidas del sistema, se aplica un factor de seguridad del 20 %. Por tanto, la capacidad energética requerida se ajusta a 22.35 Wh, obtenida al dividir el consumo diario entre 0.8. La capacidad de la batería, expresada en amperios-hora (Ah), se determina dividiendo la capacidad energética por la tensión de alimentación: $22.35 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 1.8625 \text{ Ah}$. Esta capacidad asegura autonomía adecuada para un día completo de operación (31).

Ecuación 14: Capacidad necesaria

$$\text{Capacidad necesaria (Wh)} = \text{Consumo diario} / 0.8$$

$$\text{Wh} = 17.88 / 0.8$$

$$\text{Wh} = 22.35$$

Ecuación 15: Capacidad de la batería

$$\text{Capacidad de la batería (Ah)} = \text{Capacidad necesaria (Wh)} / \text{Tensión (V)}$$

$$\text{Ah} = \text{Wh} / \text{V}$$

$$\text{Ah} = 22.35 \text{ Wh} / 12 \text{ V}$$

$$\text{Ah} = 1.8625$$

Dimensionamiento del panel solar:

- El diseño del sistema fotovoltaico considera la radiación solar media diaria registrada en el distrito de San Marcos provincia de Huari región Ancash, equivalente a 2040 Wh/m². Suponiendo una irradiancia estándar de 1000 W/m², se deduce que las horas solares pico disponibles son aproximadamente 2.04 horas. Con base en este valor, se calcula la potencia mínima requerida del panel como $17.88 \text{ Wh} / 2.04 \text{ h} = 8.765 \text{ W}$. Finalmente, considerando

un 25 % de pérdidas por temperatura, inclinación, polvo, cables y eficiencia de carga, la potencia nominal del panel debe ser al menos 11.687 W, redondeándose idealmente a un módulo de 12 W o superior (31).

Ecuación 16: Horas efectivas del sol

$$\text{Horas efectivas del sol} = \text{Radiación solar diaria (Wh/m}^2\text{)} / \text{Irradiación promedio (W/m}^2\text{)}$$

$$\text{Horas efectivas del sol} = 2040 \text{ Wh/m}^2 / 1000 \text{ W/m}^2$$

$$Ah = 2.04 \text{ horas}$$

Ecuación 17: Energía diaria necesaria

$$\text{Energía diaria necesaria (W)} = \text{Consumo diario (Wh)} / \text{Horas de sol efectivas}$$

$$\text{Energía diaria necesaria} = 17.88 \text{ Wh} / 2.04 \text{ h}$$

$$\text{Energía diaria necesaria} = 8.765 \text{ W}$$

- Considerando un 25% de pérdidas:

Ecuación 18: Potencia del panel

$$\text{Potencia del panel (W)} = \text{Energía diaria necesaria} / 0.75$$

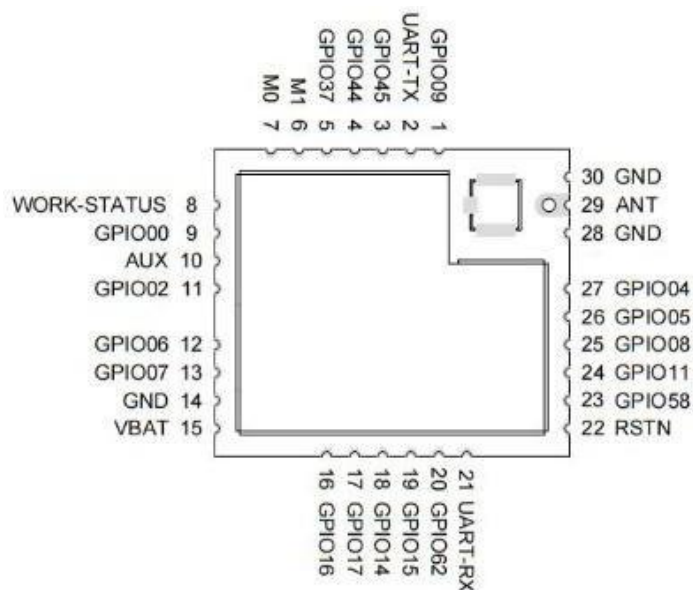
$$\text{Potencia del panel (W)} = 8.765 \text{ W} / 0.75$$

$$\text{Potencia del panel (W)} = 11.687 \text{ W}$$

Módulo LoRa DX-LR01:

- El sistema incorpora un módulo de comunicación LoRa modelo DX-LR01, diseñado para operar en la banda ISM y facilitar enlaces inalámbricos de largo alcance. Este módulo se caracteriza por su bajo consumo energético y su capacidad de transmisión robusta en entornos de difícil cobertura, siendo compatible con arquitecturas de microcontroladores de bajo voltaje. El correcto funcionamiento del módulo exige estabilidad en la tensión de entrada, lo cual es provisto por el regulador integrado en el sistema (31).

Figura 3. *Módulo LoRaWAN DX-LR03*



Nota: Figura extraída de una fuente externa (31)

LM2596 – Regulador de voltaje:

- El sistema de regulación está basado en el módulo LM2596, un convertidor reductor (buck converter) de alta eficiencia. Este dispositivo permite adaptar la tensión de entrada de 12 V proveniente del panel o de la batería, hacia niveles inferiores requeridos por componentes como el módulo LoRa (3.3 V o 5 V). El LM2596 es una solución ampliamente utilizada en sistemas autónomos, por su capacidad de entregar corriente continua estable, su eficiencia superior al 75 % y su fácil integración en sistemas fotovoltaicos de baja potencia (31).

Figura 4. LM2596 – Regulador de voltaje: Pin definition table

Pin number	Pin ame	Pin function	Ilustrate
1,3,4,5,9,11, 12,13,16,17, 18,19,20,23, 24,25,26,27	GPIO09, GPIO45, GPIO44, GPIO37, GP1O00, GPIO02, GPIO06, GPIO07, GPIO16, GPIO17, GPIO14, GPIO15,	IO	Programmable Input/output pins

	GPIO62, GPIO58, GPIO11, GPIO08, GPIO05, GPIO04		
2	UART_TX	Serial data output	
6	M1	Reserve	Customizable IO ports
7	M0	Reserve	Customizable IO ports
8	WORK-STATUS	Module working status output pin	1s high level 1s low level
10	AUX	Module RF status indicator pin	Please refer to 2.3.4 for details
14,28,30	GND	Power Ground	-
15	VBAT	Power input pin	3.3V (typical)
twenty one	UART-RX	Serial data input	-
twenty two	RSTN	Reset	Please refer to 2.3.3 for details
29	ANT	antenna	-

Nota: Figura extraída de una fuente externa (31).

Figura 5. LM2596 – Regulador de voltaje: Power consumption table

Working status	State	Current	Unit
Sleep Mode	Standby	56.39	Ua
Air wake-up mode	Standby	4.25	mA
	Receive	7.05	mA
High time efficiency mode	Standby	8.84	mA
	Transmisión	62.09	mA
	receive	8.86	mA

Nota: Figura extraída de una fuente externa (31).

Figura 6. LM2596 – Regulador de voltaje: ejemplar



Nota: Figura extraída de una fuente externa (31).

2.2.1.2.1. Reducción de las interrupciones en la transmisión

La eficiencia de la comunicación en un sistema de detección de tormentas eléctricas depende de la reducción de las interrupciones en la transmisión. La utilización de energía solar permite

garantizar un suministro continuo de energía, evitando cortes que puedan afectar el flujo de información. La estabilidad en la transmisión es fundamental para mantener una operación confiable del sistema, minimizando el riesgo de fallos que comprometan la seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas (21).

El uso de energía solar contribuye a la autonomía del sistema, reduciendo la dependencia de fuentes energéticas convencionales susceptibles a fallos. Al emplear paneles solares, se logra una operatividad constante, incluso en zonas remotas donde el acceso a la red eléctrica es limitado. Esta característica permite mejorar la continuidad de la transmisión de datos, optimizando la capacidad del sistema para detectar tormentas eléctricas en tiempo real y reducir riesgos asociados (22).

Las interrupciones en la transmisión pueden derivarse de fallos energéticos, pero también de condiciones climáticas adversas. La energía solar ofrece una solución efectiva, ya que su almacenamiento en baterías garantiza el funcionamiento del sistema durante periodos sin irradiación solar. De esta manera, se asegura la comunicación ininterrumpida de las alertas, permitiendo una respuesta oportuna ante la proximidad de descargas eléctricas (23).

El diseño del sistema incorpora tecnologías de almacenamiento eficiente para maximizar la autonomía. Las baterías de alta capacidad permiten gestionar la energía de manera efectiva, evitando pérdidas por fluctuaciones en la generación solar. Esta optimización del recurso energético es clave para garantizar la reducción de las interrupciones en la transmisión, asegurando la disponibilidad del sistema en todo momento (25).

Además de la generación solar, el uso de sistemas de respaldo permite mitigar cualquier deficiencia energética. La integración de baterías de litio y reguladores de carga optimiza el consumo de energía, reduciendo picos de demanda y evitando caídas en la transmisión. Estas medidas aseguran que el sistema de detección mantenga su operatividad sin interrupciones inesperadas (26).

La eficiencia en la comunicación también se ve favorecida por el diseño de redes optimizadas. El uso de protocolos de transmisión de baja potencia permite reducir el consumo energético sin comprometer la confiabilidad de la comunicación. Esta estrategia minimiza las fallas en la transmisión, favoreciendo una conectividad estable que contribuye a la detección efectiva de tormentas eléctricas (27).

El mantenimiento predictivo del sistema es otra estrategia para reducir interrupciones. La monitorización continua del estado de los paneles solares y baterías permite anticipar fallos y realizar correcciones antes de que impacten la transmisión. Esta práctica optimiza la eficiencia del sistema, garantizando su disponibilidad operativa con el mínimo uso de recursos (28).

El impacto de la reducción de interrupciones se refleja en la confianza del personal respecto a la comunicación del sistema. Una transmisión estable genera seguridad en la información recibida, permitiendo que los protocolos de actuación frente a tormentas eléctricas se ejecuten de manera eficaz. Esto refuerza la percepción de seguridad y minimiza la exposición a riesgos (29).

La reducción de costos operativos también es un beneficio asociado a la eficiencia de la comunicación. Al depender de energía solar, se eliminan gastos relacionados con el consumo de electricidad convencional, permitiendo una operación sostenible a largo plazo. Esta optimización de recursos mejora la rentabilidad del sistema sin comprometer su desempeño (27).

La reducción de las interrupciones en la transmisión es un factor clave para la eficiencia de la comunicación en el sistema de detección de tormentas eléctricas. La integración de energía solar, junto con el almacenamiento adecuado y el mantenimiento predictivo, garantiza una operatividad continua. Esto no solo optimiza la detección de tormentas, sino que también reduce riesgos y costos, asegurando una solución efectiva y sostenible en la protección del personal frente a descargas atmosféricas.

2.2.1.2.2. Reducción del costo de la operación

La eficiencia en la comunicación del sistema de detección de tormentas eléctricas mediante energía solar se relaciona directamente con la reducción del costo de la operación. La integración de paneles solares permite disminuir la dependencia de fuentes energéticas convencionales, lo que reduce gastos asociados al consumo eléctrico. Además, al emplear energía solar, se eliminan costos de infraestructura para la distribución de electricidad, lo que optimiza los recursos económicos y operativos. Esta autonomía energética resulta clave para mejorar la sostenibilidad financiera del sistema (25).

El uso de energía solar también minimiza la necesidad de mantenimiento frecuente en los sistemas de suministro eléctrico. Al evitar el uso de redes eléctricas tradicionales, se reducen los costos derivados de reparaciones, reemplazo de cableado y revisiones periódicas. Esto

contribuye a una operación más eficiente, permitiendo la asignación de recursos económicos a otros aspectos críticos del sistema de detección. Además, la reducción del mantenimiento implica menor intervención del personal técnico (22).

La eficiencia de la comunicación se optimiza mediante la implementación de energía solar, lo que garantiza una operación continua del sistema sin interrupciones prolongadas. Las interrupciones en la transmisión pueden generar costos adicionales debido a la necesidad de reiniciar o reparar equipos. Con la autonomía energética proporcionada por la energía solar, se asegura una operatividad constante, evitando gastos inesperados por fallos en el suministro eléctrico y reduciendo los tiempos de inactividad (23).

La disminución del costo de la operación también se ve favorecida por la larga vida útil de los sistemas fotovoltaicos. A diferencia de otras fuentes energéticas que requieren reemplazo frecuente de componentes, los paneles solares presentan un desgaste mínimo y una durabilidad de varias décadas. Esto implica menores inversiones en repuestos y actualizaciones tecnológicas, lo que se traduce en una reducción significativa de los costos operacionales a lo largo del tiempo (26).

El ahorro económico también se refleja en la eliminación de costos asociados a la distribución de energía en zonas remotas. En lugares de difícil acceso, la instalación de infraestructura eléctrica convencional puede ser extremadamente costosa. Al utilizar energía solar, el sistema de detección de tormentas eléctricas se vuelve completamente autónomo, evitando gastos en cableado, transformadores y mantenimiento de redes eléctricas (27).

Otro aspecto fundamental en la reducción del costo de operación es la independencia de fluctuaciones en tarifas eléctricas. La energía solar no está sujeta a aumentos de precios de energía convencional, lo que permite a las organizaciones tener un control financiero más estable y predecible. De esta manera, los costos de operación pueden planificarse a largo plazo sin verse afectados por incrementos en tarifas energéticas (29).

El aprovechamiento de energía solar también disminuye la necesidad de almacenamiento de combustible o generadores de respaldo, lo que reduce costos logísticos y ambientales. En sistemas convencionales, es necesario contar con generadores que requieren combustibles fósiles, lo que implica gastos continuos en abastecimiento y mantenimiento. La energía solar elimina esta dependencia, haciendo que el sistema de detección sea más eficiente y económico (21).

Desde una perspectiva operativa, la implementación de energía solar también simplifica la gestión del sistema. Al eliminar la necesidad de gestión de contratos con proveedores eléctricos, reducción de facturación y monitoreo de consumo, se ahorra tiempo y recursos administrativos. Esto permite que el personal se enfoque en mejorar la eficacia del sistema en lugar de gestionar problemas energéticos (22).

La eficiencia de la comunicación, impulsada por el uso de energía solar, contribuye directamente a la sostenibilidad financiera del sistema de detección. La reducción de costos operativos permite destinar presupuesto a mejorar tecnologías de detección y optimizar la seguridad del personal. Esto garantiza que el sistema continúe operando con altos estándares de calidad sin generar cargas financieras excesivas (24).

La incorporación de energía solar en el sistema de detección de tormentas eléctricas es una estrategia clave para reducir el costo de operación. A través de la autonomía energética, la disminución de mantenimiento y la eliminación de gastos en infraestructura, se logra un sistema más eficiente y rentable. Esta optimización económica permite mejorar la seguridad del personal sin comprometer la viabilidad financiera de la operación. Además, el uso de energía renovable contribuye a la reducción de la huella de carbono, promoviendo la sostenibilidad ambiental del sistema.

2.2.2. Riesgos del personal por descargas atmosféricas

Los riesgos del personal por descargas atmosféricas representan una problemática relevante en sectores expuestos a condiciones climáticas adversas. Las tormentas eléctricas generan descargas de alta intensidad que pueden causar daños severos a personas y equipos. La exposición del personal a estas descargas incrementa la posibilidad de lesiones graves o incluso fatales, lo que resalta la necesidad de implementar sistemas de detección temprana. La comprensión de estos riesgos permite desarrollar estrategias de mitigación que reduzcan la cantidad de incidentes en entornos laborales de alto riesgo (23).

Las descargas atmosféricas pueden generar lesiones directas en el cuerpo humano debido a la transferencia de corriente de alta magnitud. Entre las principales afecciones se encuentran quemaduras, paros cardíacos y daño neurológico. Además, los efectos indirectos pueden incluir traumatismos provocados por caídas o desplazamientos bruscos a causa de la onda expansiva. La gravedad de estos incidentes varía según la intensidad de la descarga y la proximidad del trabajador al punto de impacto (24).

Los incidentes relacionados con descargas atmosféricas también pueden derivar en riesgos secundarios. Entre ellos se incluyen incendios en estructuras, explosiones de materiales inflamables y fallos en sistemas eléctricos. Estos eventos no solo comprometen la seguridad del personal, sino que también afectan la operatividad de las instalaciones. Por ello, la detección eficaz de tormentas eléctricas resulta fundamental para minimizar daños y prevenir pérdidas humanas y materiales (26).

El uso de la comunicación LoRaWAN permite mejorar la eficacia de los sistemas de detección de tormentas eléctricas. Esta tecnología posibilita la transmisión de datos meteorológicos en tiempo real, lo que facilita la identificación oportuna de condiciones atmosféricas peligrosas. Una detección eficaz contribuye a reducir la exposición del personal mediante alertas preventivas, lo que disminuye la cantidad de incidentes relacionados con descargas eléctricas (27).

Por otro lado, la eficiencia en la comunicación se ve favorecida por el uso de energía solar en los sistemas de detección. La alimentación mediante fuentes renovables permite reducir las interrupciones en la transmisión de datos, asegurando la continuidad operativa del sistema. Además, el aprovechamiento de la energía solar disminuye el costo de operación, lo que optimiza la gestión de recursos sin comprometer la seguridad del personal (29).

La percepción de seguridad del personal también se ve influenciada por la eficacia del sistema de detección. Una detección confiable genera mayor confianza en los trabajadores, quienes pueden adoptar medidas preventivas con anticipación. La comunicación efectiva de alertas contribuye a fortalecer la cultura de seguridad en el entorno laboral, reduciendo la exposición a descargas atmosféricas y mejorando la respuesta ante emergencias (21).

La cantidad de incidentes por descargas atmosféricas disminuye cuando se implementan sistemas de alerta temprana basados en comunicación LoRaWAN. Al proporcionar información en tiempo real sobre la presencia de tormentas eléctricas, se facilita la toma de decisiones oportunas para resguardar al personal. La reducción de estos incidentes impacta directamente en la integridad física de los trabajadores y en la continuidad de las operaciones industriales y comerciales (22).

La gravedad de los incidentes por descargas atmosféricas también se mitiga mediante la implementación de medidas de seguridad complementarias. La capacitación del personal en protocolos de emergencia y el uso de refugios adecuados minimizan el impacto de las descargas. Además, la integración de tecnologías avanzadas de detección permite mejorar la

eficacia de los sistemas de protección contra rayos, reduciendo los efectos adversos sobre la salud y la infraestructura (25).

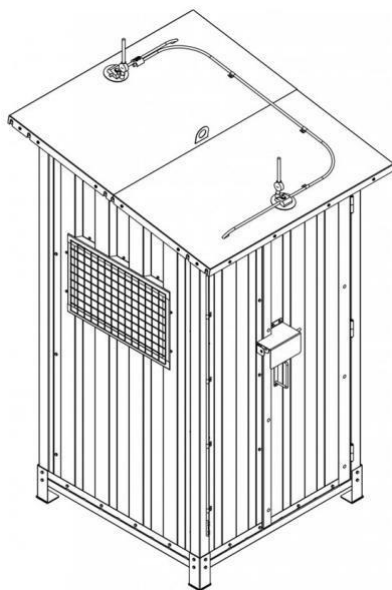
Los avances tecnológicos han permitido desarrollar sistemas de detección más precisos y eficientes, lo que ha transformado la gestión de riesgos asociados a descargas atmosféricas. La combinación de comunicación LoRaWAN y energía solar representa una solución innovadora para la protección del personal expuesto a condiciones climáticas extremas. La implementación de estos sistemas contribuye a la reducción de incidentes y al fortalecimiento de la seguridad en entornos laborales de alto riesgo (26).

Los riesgos del personal por descargas atmosféricas pueden mitigarse mediante la implementación de sistemas de detección eficaces y eficientes. La comunicación LoRaWAN mejora la capacidad de detección, mientras que la energía solar optimiza la transmisión de datos, asegurando la operatividad del sistema. La reducción de incidentes y la mejora en la percepción de seguridad del personal destacan la importancia de integrar tecnologías avanzadas en la gestión de riesgos eléctricos en el ámbito laboral.

Refugio para tormentas eléctricas:

- Los refugios para tormentas eléctricas están destinados a brindar protección temporal frente a posibles descargas atmosféricas durante la vigencia de una alerta roja. Se trata de espacios cerrados, debidamente identificados antes del inicio de las labores, con capacidad adecuada para albergar al personal. Estos refugios pueden ser fijos, móviles o remotos, y deben cumplir con condiciones técnicas específicas que aseguren aislamiento, contención electromagnética y protección estructural ante impactos directos o indirectos (31).

Figura 7. *Imagen referencial del refugio contra tormentas eléctricas*



Nota: Figura extraída de una fuente externa (31)

Refugio fijo:

- Los refugios fijos corresponden a edificaciones situadas preferentemente en zonas protegidas por sistemas de pararrayos y puestas a tierra. Deben contar con aforo suficiente para recibir al personal en caso de alerta y garantizar aislamiento físico del entorno. Se prohíbe la aproximación a las líneas de descarga del sistema de pararrayos durante la tormenta, a fin de evitar accidentes por corrientes inducidas o derivadas (31).

Refugio móvil:

- Los vehículos pueden utilizarse como refugios móviles ante la aproximación de una tormenta, siempre que el personal se encuentre dentro de la cabina con puertas y ventanas cerradas antes del inicio de la descarga. Durante la tormenta, no debe abandonarse el vehículo ni establecer contacto con superficies metálicas expuestas. En caso de impacto directo, se recomienda permanecer dentro del habitáculo hasta que concluya la alerta. Está estrictamente prohibido bajar pértigas u operar dispositivos externos durante este período (31).

Refugio remoto:

- En zonas alejadas de la infraestructura principal, se utilizan refugios remotos contruidos a partir de estructuras metálicas cerradas que actúan como Jaulas de Faraday. Estas unidades deben contar con puerta de acceso, piso aislante y un sistema de ventilación mediante malla electrosoldada. No se requiere conexión a tierra si la estructura cumple los principios de contención electromagnética. Asimismo, no deben poseer instalaciones eléctricas internas

ni elementos conductores hacia el exterior. El personal debe permanecer en el interior hasta que se levante oficialmente la alerta (31).

2.2.2.1. Incidentes del personal por descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas representan un riesgo significativo para el personal que trabaja en entornos expuestos, como instalaciones industriales y zonas de campo abierto. Estas descargas pueden generar incidentes que afectan tanto la seguridad física como la operatividad de los sistemas eléctricos. La falta de mecanismos adecuados de detección incrementa la vulnerabilidad del personal ante estos eventos. Por ello, el estudio de los incidentes derivados de descargas atmosféricas resulta esencial para implementar medidas preventivas que minimicen los riesgos asociados (21).

Los incidentes del personal por descargas atmosféricas pueden clasificarse en leves, moderados y graves, dependiendo de la magnitud del impacto y sus consecuencias. En casos leves, se presentan lesiones superficiales o efectos secundarios como mareos y desorientación. Sin embargo, en incidentes moderados y graves, pueden ocurrir quemaduras severas, afectaciones neurológicas e incluso la muerte. La probabilidad de sufrir estos daños depende de factores como la intensidad de la descarga, la ubicación del trabajador y la presencia de estructuras de protección (22).

Para reducir la cantidad de incidentes, es fundamental mejorar la eficacia de la detección de tormentas eléctricas mediante tecnologías avanzadas como la comunicación LoRaWAN. Este sistema permite detectar tormentas en tiempo real, alertando al personal sobre la proximidad de descargas atmosféricas. La cantidad de detecciones y el tiempo de detección influyen directamente en la reducción de la exposición al riesgo. Un sistema eficaz proporciona alertas oportunas que permiten la evacuación oportuna de las áreas de trabajo en riesgo (24).

El alcance de la detección también es un factor determinante en la prevención de incidentes. Un sistema de detección que cubra amplias áreas permite identificar tormentas en una fase temprana, lo que brinda mayor tiempo para implementar medidas de seguridad. La comunicación LoRaWAN es una alternativa eficiente para lograr este objetivo, ya que permite la transmisión de datos a largas distancias con bajo consumo energético. De esta manera, la eficacia en la detección contribuye a disminuir la cantidad de incidentes registrados (23).

Además de la detección temprana, la eficiencia de la comunicación juega un papel clave en la mitigación de riesgos. Un sistema de comunicación con energía solar ayuda a reducir las

interrupciones en la transmisión, asegurando la disponibilidad constante de alertas para el personal. La estabilidad en la transmisión de datos es fundamental para evitar fallas en la comunicación de advertencias y garantizar que las medidas de protección se implementen sin demoras (27).

La reducción de incidentes no solo depende de la tecnología empleada, sino también de la percepción de seguridad del personal. Cuando los trabajadores confían en la detección de tormentas eléctricas, es más probable que sigan los protocolos de seguridad establecidos. La confianza en la detección se fortalece con sistemas de monitoreo precisos y alertas oportunas, lo que genera un ambiente de trabajo más seguro y con menor incidencia de accidentes (26).

Asimismo, la confianza en la comunicación es esencial para garantizar que las advertencias sean recibidas y comprendidas por el personal. La eficiencia de la transmisión de datos mediante energía solar reduce el riesgo de fallas en la comunicación, lo que refuerza la percepción de seguridad. Un sistema confiable genera un mayor nivel de cumplimiento de las medidas preventivas, disminuyendo la gravedad de los incidentes cuando ocurren descargas atmosféricas (28).

La gravedad de los incidentes por descargas atmosféricas se reduce significativamente con la implementación de medidas tecnológicas adecuadas. Un sistema de detección eficaz y una comunicación eficiente permiten minimizar el impacto de estos eventos en la salud del personal. Además, la capacitación sobre protocolos de seguridad y la instalación de dispositivos de protección complementan las estrategias de mitigación del riesgo (23).

El análisis de la cantidad y gravedad de los incidentes permite evaluar la efectividad de los sistemas de detección y comunicación. La recopilación de datos a través de listas de cotejo y cuestionarios facilita la medición de la reducción de incidentes y la mejora en la percepción de seguridad del personal. De este modo, se pueden realizar ajustes en la tecnología y en los protocolos de seguridad para optimizar la protección del personal (29).

Los incidentes del personal por descargas atmosféricas pueden mitigarse mediante un sistema de detección basado en comunicación LoRaWAN y energía solar. La combinación de una detección eficaz y una comunicación eficiente contribuye a reducir la cantidad y gravedad de los incidentes. Además, una mayor confianza en el sistema mejora la percepción de seguridad del personal, promoviendo una cultura de prevención y reduciendo los riesgos asociados a las descargas atmosféricas en entornos laborales.

2.2.2.1.1. Cantidad de incidentes

Las descargas atmosféricas representan un riesgo significativo para el personal expuesto a condiciones meteorológicas adversas. La cantidad de incidentes relacionados con este fenómeno depende de la efectividad de los sistemas de detección y alerta. Sin un mecanismo adecuado de monitoreo, los trabajadores pueden verse sorprendidos por tormentas eléctricas, lo que incrementa la probabilidad de accidentes. La implementación de estrategias de detección temprana, como la comunicación LoRaWAN, puede contribuir a la reducción de incidentes al proporcionar información oportuna sobre la presencia de actividad eléctrica en el área de trabajo (21).

La eficacia de la detección de tormentas eléctricas está directamente relacionada con la cantidad de incidentes registrados. Un sistema de alerta con capacidad para identificar tormentas a tiempo permite a los trabajadores tomar medidas preventivas y resguardarse antes de que ocurra una descarga. La comunicación LoRaWAN posibilita la transmisión rápida de datos sobre la actividad atmosférica, facilitando la toma de decisiones en tiempo real. Cuanto mayor sea la cantidad de detecciones precisas, menor será la exposición del personal a descargas eléctricas (22).

El tiempo de detección es un factor clave en la prevención de incidentes. Un sistema que identifique tormentas con suficiente anticipación brinda la oportunidad de evacuar o suspender actividades de riesgo. La comunicación LoRaWAN permite transmitir información en tiempo real, lo que mejora la eficacia del sistema. Una detección tardía o imprecisa puede derivar en un mayor número de accidentes, ya que el personal podría no contar con el tiempo suficiente para resguardarse antes de la ocurrencia de una descarga atmosférica (23).

El alcance de la detección influye en la cantidad de incidentes registrados. Un sistema con una cobertura amplia permite identificar tormentas eléctricas a mayores distancias, proporcionando alertas con mayor anticipación. La comunicación LoRaWAN posibilita la integración de múltiples sensores en grandes áreas, mejorando la eficacia en la detección de descargas atmosféricas. En ausencia de un alcance adecuado, las advertencias pueden ser insuficientes, lo que incrementa el riesgo de exposición del personal a condiciones peligrosas (24).

La cantidad de incidentes también se ve influenciada por la reducción de interrupciones en la transmisión de datos. Un sistema de comunicación eficiente minimiza las fallas en la entrega de alertas, asegurando que la información llegue en el momento oportuno. La utilización de energía solar en la infraestructura de detección puede optimizar la eficiencia de la

comunicación, evitando interrupciones en el suministro eléctrico y reduciendo costos operativos. Con una comunicación más confiable, la cantidad de incidentes puede disminuir significativamente (27).

La gravedad de los incidentes por descargas atmosféricas varía en función de la calidad del sistema de detección. Un mecanismo de alerta eficaz y eficiente no solo reduce la cantidad de incidentes, sino también la severidad de los mismos. La comunicación LoRaWAN permite alertar al personal de manera inmediata, reduciendo la probabilidad de impactos directos. Sin un sistema de advertencia adecuado, los trabajadores pueden enfrentar consecuencias graves, que van desde lesiones menores hasta accidentes fatales por descargas eléctricas de alta intensidad (28).

La percepción de seguridad del personal se ve influenciada por la cantidad de incidentes registrados. Un sistema de detección confiable genera mayor confianza en la capacidad de prevención, lo que disminuye la sensación de vulnerabilidad. La comunicación LoRaWAN fortalece la confianza en la detección, al garantizar un monitoreo constante de la actividad eléctrica. A menor cantidad de incidentes reportados, mayor será la percepción de seguridad, lo que puede impactar positivamente en la productividad y bienestar del personal expuesto a riesgos atmosféricos (29).

La confianza en la comunicación también es un factor determinante en la reducción de incidentes. Un sistema de alerta con comunicación eficiente evita fallas en la transmisión de datos, asegurando que la información llegue a tiempo a los trabajadores. La energía solar contribuye a mejorar la eficiencia de la comunicación al garantizar un suministro de energía continuo, lo que reduce las interrupciones en la transmisión. Un sistema sin interrupciones permite una mejor planificación de medidas preventivas, reduciendo la cantidad de incidentes por descargas atmosféricas (23).

El monitoreo constante de la cantidad de incidentes permite evaluar la efectividad del sistema de detección. La recopilación de datos mediante listas de cotejo proporciona información clave para mejorar las estrategias de prevención. La combinación de la comunicación LoRaWAN y la energía solar puede optimizar la eficiencia y eficacia del sistema, disminuyendo progresivamente la cantidad de incidentes reportados. Un análisis detallado de los incidentes ocurridos facilita la implementación de mejoras en el sistema de detección y alerta (24).

La cantidad de incidentes por descargas atmosféricas está directamente relacionada con la eficacia y eficiencia del sistema de detección implementado. La comunicación LoRaWAN

mejora la eficacia de la detección, al permitir una identificación rápida y precisa de tormentas eléctricas. La energía solar, por su parte, optimiza la eficiencia de la comunicación, asegurando una transmisión de datos sin interrupciones. La combinación de estos elementos permite reducir la cantidad de incidentes y mejorar la percepción de seguridad del personal expuesto a este tipo de riesgos.

2.2.2.1.2. Gravedad de los incidentes

Las descargas atmosféricas representan un riesgo significativo para el personal en entornos laborales expuestos. La gravedad de los incidentes derivados de estas descargas depende de múltiples factores, como la intensidad de la corriente, el punto de impacto y la protección disponible en el área. En ausencia de sistemas de detección eficientes, las descargas pueden generar consecuencias fatales o discapacitantes. Además, la falta de protocolos de seguridad incrementa la vulnerabilidad del personal ante estos eventos, lo que resalta la necesidad de implementar medidas preventivas adecuadas (25).

La comunicación LoRaWAN permite una detección más eficaz de tormentas eléctricas, lo que contribuye a la reducción de la gravedad de los incidentes. Mediante la transmisión de alertas tempranas, el personal puede tomar medidas preventivas oportunas y minimizar la exposición a descargas. La capacidad de detección en tiempo real permite una mejor planificación de las actividades laborales en zonas de riesgo. Como resultado, la implementación de sistemas de detección basados en LoRaWAN mejora la seguridad operativa y reduce el impacto de las descargas atmosféricas (26).

El alcance de la detección influye en la capacidad del sistema para prevenir incidentes graves. Un sistema con cobertura amplia permite identificar tormentas en etapas tempranas, proporcionando tiempo suficiente para resguardar al personal. En contraste, una detección con alcance limitado incrementa el riesgo de exposición a descargas sin advertencias previas. Por ello, la eficacia del sistema de detección depende de su capacidad para monitorear extensas áreas con precisión y enviar alertas oportunas (21).

El tiempo de detección es un factor crítico en la prevención de incidentes graves. Un sistema que identifica tormentas con anticipación permite que el personal adopte medidas de seguridad adecuadas, como la evacuación o la suspensión temporal de actividades. En cambio, un sistema con tiempos de detección prolongados puede generar respuestas tardías, aumentando la posibilidad de incidentes severos. La optimización de este parámetro es esencial para minimizar la gravedad de los impactos de las descargas atmosféricas en el personal expuesto (22).

La cantidad de detecciones realizadas por el sistema influye en la percepción de seguridad del personal. Un sistema que emite alertas constantes y precisas genera confianza en su funcionamiento, lo que motiva a los trabajadores a seguir los protocolos de seguridad establecidos. Por el contrario, una detección ineficaz o esporádica puede generar incertidumbre, lo que disminuye la efectividad de las medidas preventivas. En este sentido, la comunicación LoRaWAN juega un papel clave en la mejora de la detección y en la reducción de la gravedad de los incidentes (28).

Los incidentes graves por descargas atmosféricas pueden ocasionar lesiones de diferente magnitud. Entre las consecuencias más severas se encuentran las quemaduras, los daños neurológicos y las alteraciones cardiovasculares. Además, los impactos indirectos, como caídas o explosiones derivadas de la descarga, pueden incrementar la letalidad del evento. La implementación de sistemas de detección eficaces disminuye la probabilidad de que estos efectos adversos se materialicen, protegiendo así la integridad del personal en riesgo (29).

La eficiencia de la comunicación influye en la rapidez con la que se transmiten las alertas, lo que impacta directamente en la gravedad de los incidentes. La utilización de energía solar contribuye a la reducción de interrupciones en la transmisión, asegurando una operatividad continua del sistema de detección. De esta manera, se garantiza que el personal reciba información precisa y oportuna, lo que facilita la toma de decisiones en situaciones de emergencia y minimiza el impacto de las descargas atmosféricas (24).

La reducción de interrupciones en la transmisión mejora la efectividad del sistema de detección al mantener un flujo constante de información. Si la comunicación se interrumpe, la capacidad de respuesta ante tormentas eléctricas se ve comprometida, lo que aumenta la gravedad de los incidentes. En este contexto, la integración de energía solar como fuente de alimentación permite una mayor estabilidad operativa, lo que refuerza la protección del personal expuesto a riesgos eléctricos (25).

El costo de la operación del sistema influye en su viabilidad a largo plazo. La implementación de energía solar no solo mejora la eficiencia de la comunicación, sino que también reduce los costos asociados al mantenimiento del sistema. Esto permite que la infraestructura de detección se mantenga operativa sin interrupciones, asegurando que el personal reciba alertas en todo momento. Como resultado, se minimiza la gravedad de los incidentes y se optimiza la inversión en medidas de seguridad (22).

La gravedad de los incidentes por descargas atmosféricas está influenciada por la eficacia de la detección y la eficiencia de la comunicación. La implementación de comunicación LoRaWAN mejora la detección de tormentas eléctricas, mientras que el uso de energía solar optimiza la estabilidad del sistema. Estos factores, en conjunto, permiten reducir el impacto de las descargas en el personal expuesto, promoviendo un entorno laboral más seguro y mitigando las consecuencias de eventos eléctricos adversos.

2.2.2.2. Percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas

La percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas es un factor clave en la reducción de riesgos laborales. Esta percepción depende de la confianza en los sistemas de detección de tormentas eléctricas y en la comunicación de alertas. La implementación de tecnologías avanzadas permite mejorar la eficacia de la detección, asegurando que los trabajadores cuenten con información oportuna. Un sistema eficiente puede reducir la incertidumbre y fortalecer la sensación de protección en entornos expuestos a tormentas eléctricas (23).

La comunicación LoRaWAN desempeña un papel fundamental en la eficacia de la detección de tormentas eléctricas. Gracias a su amplio alcance y bajo consumo de energía, este sistema permite la transmisión continua de datos meteorológicos en tiempo real. Una detección eficaz contribuye a que el personal perciba una mayor seguridad, ya que puede anticiparse a eventos climáticos adversos. La rapidez en la identificación de tormentas eléctricas es determinante para mejorar la confianza en el sistema de alerta temprana (24).

La confianza en la detección está directamente relacionada con la cantidad, el tiempo y el alcance de las detecciones. Un sistema que identifica tormentas con alta precisión y en un tiempo reducido fortalece la seguridad percibida por el personal. La comunicación LoRaWAN permite monitorear las condiciones atmosféricas con mayor cobertura, evitando errores en la detección. Cuando se garantiza una vigilancia efectiva de la actividad eléctrica en la atmósfera, se refuerza la percepción de protección y se minimiza el temor a descargas inesperadas (25).

La confianza en la comunicación también es crucial para la percepción de seguridad. Un sistema confiable debe transmitir alertas sin interrupciones, permitiendo que el personal tome decisiones informadas. La eficiencia en la comunicación depende de la capacidad del sistema para operar con estabilidad, asegurando que la información llegue a todos los trabajadores. Una

red de comunicación robusta reduce la posibilidad de fallos en la transmisión de datos, lo que refuerza la sensación de seguridad en el entorno laboral (21).

El uso de energía solar mejora la eficiencia de la comunicación, garantizando la operatividad del sistema en condiciones adversas. La reducción de interrupciones en la transmisión evita la pérdida de datos críticos, lo que permite que el personal reciba alertas sin retrasos. Además, el aprovechamiento de energía renovable disminuye los costos de operación, asegurando la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Un sistema eficiente incrementa la seguridad percibida al garantizar el flujo continuo de información en todo momento (22).

La percepción de seguridad del personal también está influenciada por la integración de tecnologías de monitoreo meteorológico. Sensores de alta precisión permiten registrar variaciones en la actividad eléctrica de la atmósfera con mayor exactitud. Cuando los trabajadores saben que cuentan con herramientas avanzadas para predecir tormentas, su confianza en las medidas de protección aumenta. La información confiable y accesible refuerza la sensación de control sobre los riesgos asociados a las descargas atmosféricas (23).

Un sistema de detección eficaz debe garantizar que las alertas sean comprensibles y oportunas. La interpretación clara de la información es fundamental para que el personal adopte medidas preventivas con rapidez. La comunicación LoRaWAN permite la transmisión instantánea de avisos de tormentas, reduciendo el margen de error en la toma de decisiones. Si las alertas son precisas y bien comunicadas, se fortalece la percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas (27).

El mantenimiento adecuado del sistema de detección también influye en la seguridad percibida. Equipos en óptimas condiciones operativas aseguran la continuidad del monitoreo y previenen fallos en la detección. La revisión periódica de los dispositivos garantiza que la información proporcionada sea precisa y fiable. Un sistema bien mantenido refuerza la confianza del personal en la protección brindada, minimizando la sensación de vulnerabilidad ante descargas eléctricas (28).

La capacitación del personal en el uso del sistema de detección mejora su percepción de seguridad. Conocer los protocolos de respuesta ante tormentas eléctricas permite a los trabajadores actuar de manera más eficiente en situaciones de riesgo. La comunicación clara sobre los procedimientos de seguridad incrementa la confianza en la eficacia del sistema. Cuando el personal está adecuadamente preparado, se reduce la incertidumbre y se fortalece la sensación de protección frente a los peligros de las descargas atmosféricas (29).

La percepción de seguridad del personal depende de la eficacia del sistema de detección y de la eficiencia en la comunicación de alertas. La tecnología LoRaWAN mejora la detección de tormentas eléctricas, mientras que la energía solar optimiza la transmisión de datos. La combinación de estos elementos reduce la incertidumbre y refuerza la confianza del personal en la protección frente a descargas atmosféricas. Un sistema confiable y bien gestionado es clave para mitigar los riesgos laborales asociados a tormentas eléctricas.

2.2.2.2.1. Confianza en la detección

La confianza en la detección de tormentas eléctricas influye en la percepción de seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas. Un sistema eficaz permite advertencias oportunas, reduciendo la incertidumbre y el riesgo de exposición. La falta de un mecanismo confiable incrementa el temor ante eventos climáticos severos. En este contexto, la implementación de tecnologías avanzadas, como la comunicación LoRaWAN, se convierte en un factor clave para mejorar la detección y reforzar la seguridad del personal en entornos laborales vulnerables a estos fenómenos naturales (21).

La eficacia de un sistema de detección se mide en función de la cantidad de tormentas identificadas, el tiempo de detección y el alcance del monitoreo. Una alta cantidad de detecciones precisas mejora la confianza del personal en la tecnología utilizada. Cuando el sistema identifica con precisión eventos eléctricos en la atmósfera, se genera una percepción de seguridad que permite a los trabajadores adoptar medidas preventivas con mayor antelación y confianza en la protección de su integridad (22).

El tiempo de detección es un factor determinante en la percepción de seguridad. Un sistema que emite alertas con suficiente anticipación permite a los trabajadores tomar resguardos antes de que ocurra una tormenta. La comunicación LoRaWAN contribuye a esta eficacia al garantizar una transmisión rápida de la información desde los sensores hasta el personal, minimizando el tiempo de respuesta ante eventos peligrosos. De esta manera, la detección temprana genera un entorno de trabajo más seguro y reduce la ansiedad del personal expuesto (24).

El alcance de la detección también impacta en la confianza del personal. Un sistema que monitorea un área extensa permite identificar tormentas en zonas remotas, ofreciendo protección incluso en entornos de difícil acceso. La comunicación LoRaWAN facilita esta cobertura al permitir la interconexión de sensores en grandes áreas geográficas. Cuando el

personal percibe que el sistema cubre toda la zona de trabajo, su confianza en la detección aumenta, lo que se traduce en una reducción de la percepción de riesgo (25).

El uso de un sistema de detección basado en comunicación LoRaWAN mejora la precisión y confiabilidad de las alertas. La percepción de seguridad del personal depende en gran medida de la credibilidad de la tecnología empleada. Un sistema con baja tasa de falsas alarmas refuerza la confianza en la detección y evita la fatiga por alertas innecesarias. Por ello, la optimización de la tecnología de detección resulta fundamental para fortalecer la sensación de protección ante descargas atmosféricas (26).

La integración de la comunicación LoRaWAN en sistemas de detección permite la recopilación y transmisión eficiente de datos en tiempo real. La precisión de la información recibida influye directamente en la percepción de seguridad del personal. Cuando los trabajadores confían en que las alertas emitidas se basan en datos confiables, se genera un ambiente laboral más tranquilo. Esta confiabilidad reduce la incertidumbre y facilita la toma de decisiones preventivas con mayor seguridad y efectividad (27).

La percepción de seguridad del personal también se ve influenciada por la continuidad en la transmisión de alertas. Si las interrupciones en la comunicación son frecuentes, la confianza en el sistema disminuye. Por esta razón, la eficacia de la detección debe ir acompañada de una infraestructura de comunicación robusta, como la que ofrece la tecnología LoRaWAN. De este modo, se asegura una detección constante y fiable, lo que incrementa la sensación de seguridad entre los trabajadores (28).

Además de la tecnología utilizada, la capacitación del personal juega un papel esencial en la confianza en la detección. Cuando los trabajadores comprenden el funcionamiento del sistema y la interpretación de las alertas, su percepción de seguridad mejora significativamente. La implementación de programas de formación refuerza la confianza en la eficacia del sistema y promueve una cultura de prevención ante descargas atmosféricas (29).

El monitoreo continuo y la mejora constante del sistema de detección son clave para mantener la confianza del personal. La realización de pruebas periódicas y la actualización de la infraestructura tecnológica aseguran que el sistema funcione de manera óptima. Cuando los trabajadores perciben que el sistema evoluciona y se adapta a nuevas condiciones, su confianza en la detección se fortalece, aumentando su percepción de seguridad frente a tormentas eléctricas (22).

La confianza en la detección de tormentas eléctricas es un elemento esencial para la seguridad del personal expuesto a descargas atmosféricas. La eficacia del sistema, la precisión de las alertas y la capacitación del personal influyen en la percepción de seguridad. La comunicación LoRaWAN mejora la detección, asegurando una respuesta rápida y precisa. Un sistema confiable reduce la incertidumbre y permite la implementación de medidas preventivas efectivas, protegiendo la integridad de los trabajadores en entornos vulnerables a fenómenos climáticos extremos.

2.2.2.2.2. Confianza en la comunicación

La confianza en la comunicación dentro de un sistema de detección de tormentas eléctricas es un factor determinante en la percepción de seguridad del personal. Un sistema confiable debe garantizar que la información sobre la presencia de tormentas sea transmitida de manera oportuna y sin interrupciones. Si la comunicación falla o presenta retrasos, la incertidumbre aumenta, lo que puede generar desconfianza en el sistema y reducir la efectividad de las medidas de seguridad implementadas para proteger al personal ante descargas atmosféricas (22).

El uso de energía solar en el sistema de detección contribuye a mejorar la eficiencia de la comunicación al reducir las interrupciones en la transmisión de datos. Una fuente de energía constante y renovable permite que los dispositivos de comunicación mantengan su operatividad incluso en condiciones adversas. Esto evita fallos en la transmisión de alertas, asegurando que el personal reciba la información en tiempo real y pueda tomar las medidas de prevención necesarias (23).

La percepción de seguridad del personal está estrechamente relacionada con la continuidad en la comunicación del sistema de detección. Si las alertas sobre tormentas eléctricas se transmiten de manera constante y sin interrupciones, se refuerza la confianza en la fiabilidad del sistema. En cambio, si la comunicación se interrumpe frecuentemente, los trabajadores pueden cuestionar su eficacia y optar por ignorar las advertencias, incrementando el riesgo de exposición a descargas atmosféricas (24).

La reducción de interrupciones en la transmisión de datos es fundamental para garantizar la confianza en la comunicación del sistema de detección. Las interrupciones pueden deberse a fallos en la alimentación eléctrica, problemas en la red de comunicación o interferencias en la señal. El empleo de energía solar minimiza estos inconvenientes, permitiendo que el sistema

funcione de manera ininterrumpida y asegurando que las alertas sean emitidas en todo momento (26).

La confianza en la comunicación también se ve influenciada por la velocidad con la que se transmiten los datos. Un sistema que envíe alertas en tiempo real permite al personal reaccionar de manera inmediata ante una posible tormenta eléctrica. En este sentido, la eficiencia de la comunicación se convierte en un factor determinante para la seguridad laboral, ya que cualquier retraso en la transmisión de información puede poner en peligro la integridad física de los trabajadores (27).

El costo de operación del sistema de detección es otro aspecto relevante en la percepción de confianza en la comunicación. Un sistema que requiera constantes inversiones en mantenimiento o reposición de componentes puede ser visto como poco confiable. El uso de energía solar reduce estos costos, ya que disminuye la necesidad de baterías adicionales o fuentes de energía alternativas, garantizando una operación continua y a menor costo (29).

Además, la redundancia en la transmisión de datos refuerza la confianza en la comunicación. Un sistema que cuente con múltiples canales de transmisión puede evitar fallos en la comunicación al utilizar rutas alternativas en caso de interrupciones. Esto permite que el personal reciba las alertas sin importar las condiciones ambientales o técnicas que puedan afectar la señal de transmisión (22).

La compatibilidad del sistema con otras tecnologías de comunicación también influye en la percepción de confianza. Un sistema que pueda integrarse con redes existentes o dispositivos utilizados por el personal facilita el acceso a la información y mejora la eficacia en la transmisión de alertas. Esto permite una respuesta más coordinada y efectiva ante la presencia de tormentas eléctricas (23).

El monitoreo y la verificación constante del sistema de comunicación garantizan su funcionamiento adecuado y refuerzan la confianza del personal. La implementación de pruebas periódicas y la supervisión de la transmisión de datos permiten identificar posibles fallos y corregirlos antes de que afecten la operatividad del sistema. Esto asegura una mayor fiabilidad en la detección y comunicación de alertas (21).

La confianza en la comunicación dentro del sistema de detección de tormentas eléctricas es un factor clave para la percepción de seguridad del personal. La reducción de interrupciones en la transmisión, la rapidez en la entrega de alertas, la eficiencia operativa y la redundancia en la

transmisión son elementos esenciales para garantizar una comunicación confiable. De esta manera, se mejora la seguridad del personal ante descargas atmosféricas y se optimiza el funcionamiento del sistema de detección.

2.3. Definición de términos

- Sistema de detección de tormentas eléctricas: Conjunto de sensores y algoritmos que identifican descargas atmosféricas mediante radiofrecuencia o electromagnetismo para alertar sobre tormentas (23).
- Red de comunicación LoRaWAN: Infraestructura de baja potencia y largo alcance que permite la transmisión de datos entre dispositivos IoT mediante la modulación LoRa en redes LPWAN (25).
- Alimentación fotovoltaica autónoma: Sistema de generación de energía basado en paneles solares, almacenamiento en baterías y regulación electrónica para operar sin conexión a la red eléctrica (26).
- Riesgos del personal por descargas atmosféricas: Probabilidad de que el personal sufra daños por tormentas eléctricas; depende de la cantidad y gravedad de incidentes, así como de la percepción de seguridad del trabajador (28).
- Incidentes del personal por descargas atmosféricas: Eventos en los que un trabajador es afectado por una descarga atmosférica; su análisis incluye la cantidad de sucesos y la gravedad de las consecuencias sufridas (21).
- Percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas: Nivel de confianza del trabajador en las medidas de protección contra tormentas eléctricas; se relaciona con la efectividad de detección y la confiabilidad en la comunicación del sistema (22).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo o alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

El método hipotético-deductivo es un procedimiento científico que parte de la formulación de una hipótesis como posible explicación de un fenómeno. A través de la deducción, se derivan consecuencias verificables que se contrastan empíricamente para confirmar o refutar la hipótesis planteada (32).

La investigación emplea el método hipotético-deductivo debido a su enfoque explicativo y preexperimental, lo que permite formular hipótesis sobre la relación entre la implementación del sistema de detección de tormentas eléctricas y la reducción de riesgos del personal por descargas atmosféricas. A partir de la teoría y antecedentes, se deducen predicciones verificables mediante la recolección de datos cuantitativos. El análisis de los indicadores de eficacia y eficiencia del sistema posibilita contrastar empíricamente las hipótesis, asegurando una evaluación objetiva de su impacto en la seguridad del personal.

3.1.2. Tipo de investigación

La investigación de tipo aplicado-tecnológico se orienta a la solución de problemas específicos mediante la generación o mejora de productos, procesos o tecnologías. Su finalidad es la aplicación práctica del conocimiento científico para optimizar el desarrollo en distintos ámbitos, como la industria, la salud o la educación (32).

La investigación es de tipo aplicado-tecnológico porque busca desarrollar y evaluar una solución práctica basada en tecnología para mitigar riesgos laborales por descargas atmosféricas. Al centrarse en la implementación de un sistema de detección de tormentas eléctricas mediante comunicación LoRaWAN y energía solar, se orienta a la mejora de la seguridad del personal mediante innovación tecnológica. Además, su carácter aplicado radica en la validación empírica del sistema en un entorno real, garantizando su eficacia y eficiencia en la reducción de incidentes y la optimización de la percepción de seguridad.

3.1.3. Alcance de la investigación

La investigación de alcance explicativo-longitudinal estudia relaciones causales entre variables a lo largo del tiempo, analizando su evolución y cambios. Su diseño implica la recolección de datos en diferentes momentos, permitiendo identificar tendencias, patrones y efectos acumulativos para una comprensión profunda del fenómeno investigado (32).

La investigación es de alcance explicativo-longitudinal porque busca identificar la relación causal entre la implementación del sistema de detección de tormentas eléctricas y la reducción de riesgos del personal por descargas atmosféricas. Su enfoque explicativo permite analizar cómo las variaciones en la eficacia y eficiencia del sistema impactan en la seguridad del personal. Además, su carácter longitudinal radica en la recolección de datos en diferentes momentos del tiempo, lo que posibilita evaluar la evolución de los incidentes y la percepción de seguridad antes y después de la implementación del sistema.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales

Los materiales o instrumentos de recolección de datos son herramientas diseñadas para obtener información relevante en una investigación. Incluyen cuestionarios, guías de entrevistas, listas de cotejo, seleccionándose según el enfoque metodológico y la naturaleza del fenómeno estudiado para garantizar validez y confiabilidad (32).

La investigación utilizó la lista de cotejo como instrumento de recolección de datos para garantizar una medición objetiva y estructurada de las variables. La lista de cotejo permitió registrar de manera sistemática la transmisión de alertas e interrupciones del sistema de detección de tormentas eléctricas, proporcionando datos cuantificables.

Sistema de medición:

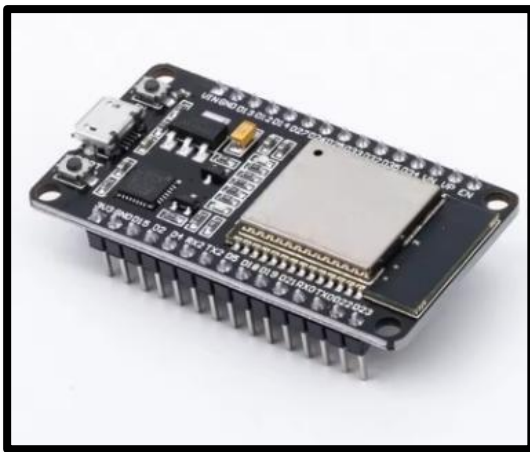
El ESP32 es un microcontrolador avanzado de 32 bits desarrollado por la empresa Espressif Systems, el cual integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip. Gracias a su bajo consumo energético y a su capacidad de procesamiento, se ha convertido en una herramienta clave en aplicaciones relacionadas con el Internet de las Cosas (IoT). Su arquitectura se basa

en un procesador Xtensa® LX6 de doble núcleo, lo que permite ejecutar múltiples tareas de forma simultánea. Dispone de 520 KB de memoria SRAM interna y puede complementarse con memoria externa, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones exigentes.

Este microcontrolador es compatible con Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2, lo que le permite comunicarse eficientemente con redes y otros dispositivos. Además, cuenta con numerosos pines de entrada y salida, así como convertidores analógico-digital (ADC) de 12 bits, salidas de señal analógica (DAC) e interfaces de comunicación como I2C, SPI y UART, lo cual facilita su integración con diversos sensores y módulos periféricos.

En el caso del prototipo de detección de tormentas, el ESP32 cumple la función de controlador principal. Recibe los datos del sensor AS3935, encargado de detectar la actividad eléctrica en la atmósfera, y procesa dicha información para determinar la cercanía de tormentas. A su vez, se encarga de enviar estos datos a una estación base a través del módulo de comunicación LoRa DX LR03, permitiendo una supervisión remota. Finalmente, administra de manera eficiente la energía suministrada por el sistema fotovoltaico, asegurando un funcionamiento continuo y sostenible.

Figura 8. *Espressif Systems de 32 bits (ESP32)*



Nota: Imagen de Espressif Systems (33)

El LoRa DX LR03 es un módulo de comunicación inalámbrica que emplea la tecnología LoRa (Long Range), diseñada específicamente para la transmisión de datos a grandes distancias con un consumo energético mínimo. Esta tecnología resulta especialmente adecuada para entornos donde la conexión a internet es limitada o inexistente, como zonas rurales o remotas.

Entre sus características técnicas, destaca su compatibilidad con distintas bandas de frecuencia según la región de uso, incluyendo 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. El alcance de comunicación varía en función del entorno, permitiendo transmisiones de hasta 15 kilómetros en áreas rurales despejadas y entre 2 a 5 kilómetros en zonas urbanas, lo que lo convierte en una solución eficiente para sistemas de monitoreo a distancia. Su consumo energético es también muy reducido, con aproximadamente 20 mA en modo de transmisión activa y apenas 1 μ A en modo de reposo, lo cual facilita su operación continua en sistemas alimentados con energía solar.

En el marco del prototipo de detección de tormentas, el módulo LoRa DX LR03 se conecta directamente al microcontrolador ESP32 y se encarga de enviar la información procesada por este último hacia una estación base. Su funcionamiento incluye el envío de paquetes de datos cuando se detecta una posible tormenta eléctrica, los cuales pueden contener datos como la ubicación del sensor, el nivel de actividad eléctrica registrada y sugerencias de seguridad. Esta información es esencial para alertar a los usuarios y permitirles actuar con anticipación. Asimismo, su capacidad de interoperar con otros dispositivos compatibles dentro de la misma red LoRa permite construir una red de monitoreo más amplia, coordinada y eficaz.

Figura 9. Long Range (LoRa DX LR03)



Nota: Imagen de Semtech Corporation (34)

3.2.2. Métodos

Los métodos de procesamiento y análisis de datos, aplicados a la prueba de hipótesis, comprenden técnicas estadísticas y analíticas utilizadas para examinar la información recopilada. Su objetivo es identificar patrones, relaciones y tendencias que permitan aceptar o rechazar la hipótesis con base en evidencia empírica y criterios científicos (32).

La investigación empleó la prueba t de Student y la prueba de Wilcoxon para la contrastación de hipótesis, dependiendo de la normalidad de los datos. La prueba t se utilizó cuando los datos siguen una distribución normal, permitiendo comparar medias antes y después de la implementación del sistema. En caso de no normalidad, la prueba de Wilcoxon, una alternativa no paramétrica, permitió evaluar diferencias en la distribución de los datos. Ambas técnicas garantizan rigor estadístico y una interpretación adecuada de los efectos del sistema en la reducción de riesgos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

Tabla 22. *Prueba de normalidad: Shapiro-Wilk*

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Cantidad de detecciones	,289	36	,477
Tiempo de detección	,339	17	,242
Alcance de la detección	,159	13	,049
Interrupciones en la transmisión	,485	30	,000
Cantidad de incidentes	,407	6	,001
Gravedad de los incidentes	,325	6	,001
Confianza en la detección	,385	30	,000
Confianza en la comunicación	,385	30	,000

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

- Se empleó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los datos, dado que es adecuada para muestras inferiores a 50 datos. El criterio para asumir normalidad es que p (sea mayor a) > 0.05 . Los resultados obtenidos indican que algunas de las dimensiones analizadas presentan una distribución normal y otras una distribución no normal, ya que los valores de significancia (p) son mayores a 0.05 en algunos casos y menores en otros: cantidad de detecciones ($p = 0.477$), tiempo de detección ($p = 0.242$), alcance de la detección ($p = 0.049$), reducción de las interrupciones en la transmisión ($p = 0.000$), cantidad de incidentes ($p = 0.001$), gravedad de los incidentes ($p = 0.001$), confianza en la detección ($p = 0.000$) y confianza en la comunicación ($p = 0.000$).
- Respecto a la prueba de hipótesis general: se empleó la prueba de Wilcoxon dado que los datos que miden los riesgos/incidentes eléctricos del personal por descargas atmosféricas presentan una distribución no normal.
- Respecto a la prueba de la primera hipótesis específica: se empleó la prueba de Chi Cuadrado dado que los datos de dos de las tres dimensiones que miden la transmisión de alertas por descargas atmosféricas presentan una distribución normal.
- Respecto a la prueba de la segunda hipótesis específica: se empleó la prueba de Wilcoxon dado que los datos de la dimensión que mide las interrupciones del sistema de detección de tormentas presentan una distribución no normal.

4.1.1. Resultados descriptivos

Tabla 23. *Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta amarilla, naranja y roja*

Tabla cruzada							
		Sistema de detección de tormentas					
		Pretest: Wave		Postest: LoRaWAN			
		Emisor	Receptor	Emisor	Receptor	Mejora	
Cantidad de detecciones	Alerta amarilla	Recuento	2799	2687	1798	1762	
		%	88,90%	95,99%	81,03%	98,00%	2,01%
	Alerta naranja	Recuento	212	204	247	240	
		%	6,73%	96,23%	11,13%	97,17%	0,94%
	Alerta roja	Recuento	138	123	174	165	
		%	4,38%	89,13%	7,84%	94,83%	5,70%
Total		Recuento	3149	3014	2219	2167	
		%	100%	93,78%	100%	96,67%	2,89%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 23 muestra una comparación entre los resultados del sistema de detección de tormentas antes (Pretest con tecnología Wave) y después (Postest con tecnología LoRaWAN), en función de la cantidad de alertas emitidas y recibidas clasificadas por nivel: amarilla, naranja y roja. Aquí va la interpretación por partes:

1. Detecciones por tipo de alerta:

a) Alerta amarilla:

- Disminución notable en cantidad de detecciones: De 2799 (emisor Wave) a 1798 (emisor LoRaWAN).
- Pese a eso, la eficiencia del receptor aumentó: de 95,99% a 98,00%.
- Interpretación: El nuevo sistema (LoRaWAN) emite menos alertas amarillas, pero las transmite con mayor fiabilidad. Esto podría deberse a una mayor precisión al discriminar eventos menos relevantes.

b) Alerta naranja:

- Aumento en detecciones: de 212 a 247.
- Receptor también mejora su tasa de recepción: de 96,23% a 97,17%.
- Interpretación: El sistema LoRaWAN mejora tanto en sensibilidad como en eficacia para alertas de nivel medio, lo que es clave en escenarios donde se busca prevenir sin generar falsas alarmas.

c) Alerta roja:

- Aumento importante en detecciones: de 138 a 174.
- Receptor mejora su eficacia considerablemente: de 89,13% a 94,83%.

- Interpretación: La mayor ganancia está en las alertas críticas (rojas). LoRaWAN detecta y transmite mejor las amenazas más severas.

2. Detecciones por tipo de alerta:

- Total de detecciones emitidas disminuye: de 3149 a 2219.
- Porcentaje de recepción mejora: de 93,78% (Wave) a 96,67% (LoRaWAN).
- Mejora global reportada: 2,89%.

Conclusión:

Aunque el sistema LoRaWAN emite menos alertas en total, mejora significativamente en la precisión y fiabilidad de la transmisión, especialmente para las alertas naranja y roja, que son más relevantes en términos de riesgo. Esto sugiere una optimización del sistema de detección, reduciendo posibles falsos positivos y reforzando su capacidad de respuesta ante eventos severos.

Tabla 24. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta amarilla

Tabla cruzada							
Sistema de detección de tormentas							
		Pretest: Wave		Postest: LoRaWAN			
		Emisor	Receptor	Emisor	Receptor	Mejora	
Cantidad de detecciones (alerta amarilla)	01 enero -	Recuento	157	151	150	147	
	07 enero	%	5,61%	96,18%	8,35%	98,00%	1,82%
	07 enero -	Recuento	297	285	117	115	
	13 enero	%	10,61%	95,96%	6,51%	98,29%	2,33%
	13 de enero -	Recuento	398	382	136	133	
	20 de enero	%	14,22%	95,98%	7,56%	97,79%	1,81%
	20 de enero -	Recuento	212	204	114	112	
	26 de enero	%	7,57%	96,23%	6,34%	98,25%	2,02%
	26 de enero -	Recuento	178	171	137	134	
	2 de febrero	%	6,36%	96,07%	7,62%	97,81%	1,74%
	02 de febrero -	Recuento	185	178	145	142	
	08 de febrero	%	6,61%	96,22%	8,07%	97,93%	1,71%
	8 de febrero -	Recuento	230	221	170	167	
	14 de febrero	%	8,22%	96,09%	9,46%	98,24%	2,15%
	14 de febrero -	Recuento	231	222	200	196	
	21 de febrero	%	8,25%	96,10%	11,13%	98,00%	1,90%
	21 de febrero -	Recuento	285	274	205	201	
	27 de febrero	%	10,18%	96,14%	11,40%	98,05%	1,91%
	27 de febrero -	Recuento	333	320	270	265	
	6 de marzo	%	11,90%	96,00%	15,02%	98,15%	2,15%
	6 de marzo -	Recuento	161	155	60	59	
	12 de marzo	%	5,75%	96,27%	3,34%	98,33%	2,06%
	12 de marzo -	Recuento	132	127	94	92	
	18 de marzo	%	4,72%	96,21%	5,23%	97,87%	1,66%
Total		Recuento	2799	2687	1798	1762	
		%	100%	95,99%	100%	98,00%	2,01%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 24 presenta un análisis detallado por semanas de la cantidad de alertas amarillas detectadas por el sistema de detección de tormentas, comparando el sistema anterior (Wave) con el sistema implementado en el posttest (LoRaWAN). La comparación se centra tanto en el número de alertas emitidas como en la eficacia del receptor, con un enfoque en la mejora del desempeño semana a semana.

1. Análisis general:

- Disminución en el número total de alertas emitidas: De 2799 (Wave) a 1798 (LoRaWAN). Esto indica que el nuevo sistema es más selectivo o preciso al emitir alertas amarillas.
- Aumento en la eficacia de recepción: de 95,99% (Wave) a 98,00% (LoRaWAN), lo que muestra una mejora en la transmisión y recepción de las alertas emitidas.
- Mejora general registrada: 2,01%, lo que representa una ganancia en la eficiencia del sistema.

2. Análisis por semanas destacadas:

a) Semana del 07 al 13 de enero:

- Reducción importante en las alertas emitidas: de 297 a 117.
- Mejora en la recepción: del 95,96% al 98,29%.
- Mayor mejora semanal registrada: 2,33%.

b) Semana del 27 de febrero al 6 de marzo:

- Alta cantidad de alertas emitidas con ambos sistemas, pero LoRaWAN sigue logrando mejor recepción (98,15%).
- Mejora notable: 2,15%.

c) Semanas finales (marzo):

- Se observa una caída significativa en la cantidad de alertas (p. ej., del 161 a 60 en la semana del 6 al 12 de marzo).
- Sin embargo, el sistema mantiene una alta eficacia de recepción (>98%).

Conclusión:

LoRaWAN muestra mejoras consistentes en casi todas las semanas analizadas en términos de eficacia de recepción, lo cual es crucial para sistemas de alerta temprana. Menor cantidad de alertas emitidas con LoRaWAN sugiere mayor precisión o una reducción de posibles falsos

positivos. Mejoras en recepción de alertas indican que LoRaWAN ofrece una mayor confiabilidad operativa, lo que fortalece la capacidad de respuesta ante eventos climáticos.

Tabla 25. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta naranja

Tabla cruzada							
		Sistema de detección de tormentas					
		Pretest: Wave		Posttest: LoRaWAN			
		Emisor	Receptor	Emisor	Receptor	Mejora	
Cantidad de detecciones (alerta naranja)	01 enero -	Recuento	17	16	15	15	
	07 enero	%	8,02%	94,12%	6,07%	100%	5,88%
	07 enero -	Recuento	15	14	18	17	
	13 enero	%	7,08%	93,33%	7,29%	94,44%	1,11%
	13 de enero -	Recuento	41	39	37	36	
	20 de enero	%	19,34%	95,12%	14,98%	97,30%	2,18%
	20 de enero -	Recuento	11	11	12	12	
	26 de enero	%	5,19%	100%	4,86%	100%	0%
	26 de enero -	Recuento	6	6	9	9	
	2 de febrero	%	2,83%	100%	3,64%	100%	0%
	02 de febrero -	Recuento	4	4	8	8	
	08 de febrero	%	1,89%	100%	3,24%	100%	0%
	8 de febrero -	Recuento	42	40	50	49	
	14 de febrero	%	19,81%	95,24%	20,24%	98,00%	2,76%
	14 de febrero -	Recuento	29	28	33	32	
	21 de febrero	%	13,68%	96,55%	13,36%	96,97%	0,42%
	21 de febrero -	Recuento	18	17	24	23	
	27 de febrero	%	8,49%	94,44%	9,72%	95,83%	1,39%
	27 de febrero -	Recuento	14	13	7	7	
	6 de marzo	%	6,60%	92,86%	2,83%	100%	7,14%
	6 de marzo -	Recuento	14	13	29	28	
	12 de marzo	%	6,60%	92,86%	11,74%	96,55%	3,69%
	12 de marzo -	Recuento	1	1	5	5	
	18 de marzo	%	0,47%	100%	2,02%	100%	0%
	Total	Recuento	212	204	247	240	
		%	100%	96,23%	100%	97,17%	0,94%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 25 presenta una comparación semanal entre el sistema de detección de tormentas anterior (Wave) y el nuevo sistema implementado (LoRaWAN), enfocándose específicamente en la alerta naranja, que representa un nivel intermedio de severidad. Se analizan tanto los recuentos de alertas emitidas y recibidas como los porcentajes de eficacia y la mejora correspondiente.

1. Análisis general:

- Incremento en la cantidad total de alertas naranjas: De 212 (Wave) a 247 (LoRaWAN), lo que representa una mayor sensibilidad del sistema posttest para identificar eventos de riesgo medio.
- Mejora en la eficacia de recepción: De 96,23% a 97,17%.

- Mejora global registrada: 0,94%. Aunque pequeña, esta mejora indica mayor confiabilidad en la recepción de alertas.

2. Análisis por semanas destacadas:

a) Semana del 8 al 14 de febrero:

- Alta cantidad de alertas con ambos sistemas.
- LoRaWAN muestra mejor recepción: 98,00% frente a 95,24%.
- Mejora semanal: 2,76%.

b) Semana del 6 al 12 de marzo:

- Gran incremento de alertas con LoRaWAN (29 vs. 14 en Wave).
- Mejora en recepción: de 92,86% a 96,55%.
- Mejora semanal destacada: 3,69%.

c) Semanas sin mejora aparente (mejora = 0%):

- Varias semanas (como del 20 al 26 de enero, 26 de enero al 2 de febrero, y 2 al 8 de febrero) muestran eficacia del 100% en ambos sistemas, por lo tanto, no hay margen de mejora en esas semanas.

Conclusión:

El sistema LoRaWAN demuestra una mayor sensibilidad, detectando más alertas naranjas en comparación con Wave. La eficacia del receptor mejora ligeramente, lo que indica mayor precisión en la transmisión y recepción de las señales de alerta. Aunque la mejora porcentual global es modesta (0,94%), se observa consistencia en el rendimiento del nuevo sistema, con picos de mejora más relevantes en semanas con mayor volumen de eventos. El nuevo sistema mantiene o mejora la calidad sin sacrificar precisión, incluso cuando se incrementa el número de alertas detectadas.

Tabla 26. Pretest y posttest de la cantidad de detecciones: alerta roja

		Tabla cruzada					
		Sistema de detección de tormentas					
		Pretest: Wave		Posttest: LoRaWAN		Mejora	
		Emisor	Receptor	Emisor	Receptor		
Cantidad de detecciones (alerta roja)	01 enero - Recuento	9	8	12	11		
	07 enero - %	6,52%	88,89%	6,90%	91,67%	2,78%	
	07 enero - Recuento	8	7	14	13		
	13 enero - %	5,80%	87,50%	8,05%	92,86%	5,36%	
	13 de enero - Recuento	21	19	23	22		
	20 de enero - %	15,22%	90,48%	13,22%	95,65%	5,17%	
	20 de enero - Recuento	5	4	9	9		
	26 de enero - %	3,62%	80,00%	5,17%	100%	20,00%	
	26 de enero - Recuento	5	4	12	11		
	2 de febrero - %	3,62%	80,00%	6,90%	91,67%	11,67%	
	02 de febrero - Recuento	4	4	13	12		
	08 de febrero - %	2,90%	100%	7,47%	92,31%	-7,96%	
	8 de febrero - Recuento	33	29	28	27		
	14 de febrero - %	23,91%	87,88%	16,09%	96,43%	8,55%	
	14 de febrero - Recuento	22	20	19	18		
	21 de febrero - %	15,94%	90,91%	10,92%	94,74%	3,83%	
	21 de febrero - Recuento	6	5	11	10		
	27 de febrero - %	4,35%	83,33%	6,32%	90,91%	7,58%	
	27 de febrero - Recuento	12	11	16	15		
	6 de marzo - %	8,70%	91,67%	9,20%	93,75%	2,08%	
	6 de marzo - Recuento	13	12	14	13		
	12 de marzo - %	9,42%	92,31%	8,05%	92,86%	0,55%	
	12 de marzo - Recuento	0	0	3	3		
	18 de marzo - %	0,00%	0%	1,72%	100%	100%	
Total		Recuento	138	123	174	165	
		%	100%	89,13%	100%	94,83%	5,70%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 26 presenta la comparación semanal del sistema de detección de tormentas para alertas rojas, entre el pretest (tecnología Wave) y el posttest (tecnología LoRaWAN). Este tipo de alerta representa el nivel más crítico, por lo que su detección y recepción precisa es fundamental.

1. Análisis general:

- Incremento total de detecciones emitidas: de 138 (Wave) a 174 (LoRaWAN), lo que indica una mayor capacidad de identificación de eventos severos con el nuevo sistema.
- Mejora en la eficacia de recepción: de 89,13% (Wave) a 94,83% (LoRaWAN).
- Mejora global registrada: 5,70%, la más alta entre los tres niveles de alerta, lo cual es relevante dado el nivel de criticidad de estas señales.

2. Análisis por semanas destacadas:

a) Mayor mejora registrada:

- Semana del 20 al 26 de enero: Mejora de 20,00% (de 80% a 100%). Pese al bajo número de eventos, todos fueron correctamente recibidos con LoRaWAN.

- Semana del 26 de enero al 2 de febrero: Mejora de 11,67%, con un claro aumento en la capacidad del sistema para emitir y recibir alertas rojas.

b) Semana del 12 al 18 de marzo:

- Wave no detectó ninguna alerta roja.
- LoRaWAN detectó y transmitió 3, con recepción del 100%.
- Mejora calculada en 100%, destacando la sensibilidad del nuevo sistema para captar eventos que antes no se registraban.

c) Semana del 8 al 14 de febrero:

- Alta cantidad de alertas en ambos sistemas.
- LoRaWAN mejora recepción: de 87,88% a 96,43%.
- Mejora: 8,55%, significativa en contexto de eventos múltiples.

d) Único retroceso observado:

- Semana del 2 al 8 de febrero: Mejora negativa de -7,96%.
- Wave tuvo recepción perfecta (100%) frente al 92,31% de LoRaWAN.
- Este caso puntual podría responder a fallas técnicas o saturación.

Conclusión:

LoRaWAN mejora de forma consistente y significativa la detección y recepción de alertas rojas, que son críticas para la toma de decisiones de emergencia. El aumento de 5,70% en la eficacia de recepción es notable y refuerza la confiabilidad del nuevo sistema en escenarios de riesgo alto. Las semanas con mejoras marcadas (superiores al 10%) demuestran que LoRaWAN no solo detecta más, sino que transmite con mayor efectividad. El único caso de retroceso es aislado, y no compromete la tendencia general de mejora.

Tabla 27. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta amarilla, naranja y roja

Tabla cruzada					
Sistema de detección de tormentas					
			Pretest: Wave 03/03/2025	Postest: LoRaWAN 12/04/2025	Mejora
Tiempo de detección	Alerta amarilla	Recuento	00:00:25.113	00:00:11.437	00:00:13.676
		%	40,08%	45,55%	54,45%
	Alerta naranja	Recuento	00:00:18.343	00:00:02.941	00:00:15.402
		%	29,29%	16,03%	83,97%
	Alerta roja	Recuento	00:00:19.200	00:00:02.178	00:00:17.022
		%	30,64%	11,34%	88,66%
Total	Recuento		00:01:02.656	00:00:16.556	00:00:46.100
	%		100%	26,43%	73,57%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 27 presenta una comparación del tiempo de detección de alertas de tormenta entre el sistema anterior (Wave) y el nuevo sistema (LoRaWAN), evaluada el 3 de marzo de 2025 (pretest) y el 12 de abril de 2025 (postest). Se analizan las alertas amarilla, naranja y roja. El principal objetivo aquí es evaluar la velocidad de respuesta del sistema, un indicador crítico para la eficacia temprana en contextos de riesgo.

1. Análisis general del tiempo de detección:

- Tiempo total de detección (todas las alertas):
- Wave: 1 minuto con 2.656 segundos.
- LoRaWAN: 16.556 segundos.
- Mejora absoluta: 46.1 segundos.
- Mejora relativa: 73,57% de reducción en tiempo.
- Interpretación: El nuevo sistema detecta alertas casi 3 veces más rápido que el anterior, una mejora significativa en situaciones donde cada segundo cuenta.

2. Análisis por tipo de alerta:

a) Alerta amarilla:

- Wave: 25.113 s → LoRaWAN: 11.437 s
- Reducción de 13.676 segundos (54,45%)
- Conclusión: Mejora notable, aunque menor que en otras alertas; esto puede deberse a la menor urgencia de estas señales o a su mayor frecuencia.

b) Alerta naranja:

- Wave: 18.343 s → LoRaWAN: 2.941 s
- Reducción de 15.402 segundos (83,97%)

- Conclusión: El sistema responde mucho más rápido a alertas intermedias, lo que mejora la capacidad de prevención con mayor margen de maniobra.

c) Alerta roja:

- Wave: 19.200 s → LoRaWAN: 2.178 s
- Reducción de 17.022 segundos (88,66%)
- Conclusión: Es la mejora más significativa. El sistema reduce a menos del 12% el tiempo anterior, lo que implica un avance sustancial en términos de seguridad y alerta crítica.

Conclusión:

LoRaWAN supera ampliamente a Wave en velocidad de detección para todos los tipos de alerta. La reducción más significativa ocurre en las alertas críticas (rojas), lo que refuerza el valor del nuevo sistema en escenarios de alto riesgo. Esta disminución en tiempo no solo mejora la eficiencia técnica del sistema, sino que aumenta directamente la capacidad de reacción ante fenómenos meteorológicos peligrosos. El nuevo sistema se muestra como más ágil, eficaz y confiable, aspectos clave para la toma de decisiones en tiempo real.

Tabla 28. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta amarilla

Tabla cruzada									
Sistema de detección de tormentas									
			Pretest: Wave 03/03/2025			Postest: LoRaWAN 12/04/2025			Mejora
Tiempo de detección (alerta amarilla)	Alerta	Recuento	Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	
	nro. 1	%	06:15:32.456	06:15:33.789	00:00:01.333	06:17:45.341	06:17:46.493	00:00:01.152	00:00:00.181
	Alerta	%			5,31%			86,41%	13,59%
	nro. 2	Recuento	06:45:12.123	06:45:14.998	00:00:02.875	07:29:11.876	07:29:12.754	00:00:00.878	00:00:01.997
	Alerta	%			11,45%			30,55%	69,45%
	nro. 3	Recuento	07:05:27.890	07:05:30.901	00:00:03.011	08:41:03.210	08:41:04.115	00:00:00.905	00:00:02.106
	Alerta	%			11,99%			30,06%	69,94%
	nro. 4	Recuento	08:12:07.890	08:12:08.955	00:00:01.065	09:55:28.567	09:55:29.699	00:00:01.132	-00:00:00.067
	Alerta	%			4,24%			106,29%	-6,29%
	nro. 5	Recuento	09:22:18.789	09:22:22.012	00:00:03.223	10:08:15.903	10:08:16.812	00:00:00.909	00:00:02.314
	Alerta	%			12,83%			28,20%	71,80%
	nro. 6	Recuento	10:01:45.678	10:01:46.703	00:00:01.025	11:32:04.123	11:32:04.987	00:00:00.864	00:00:00.161
Total	Alerta	%			4,08%			84,29%	15,71%
	nro. 7	Recuento	11:05:48.654	11:05:51.521	00:00:02.867	13:01:50.789	13:01:51.643	00:00:00.854	00:00:02.013
	Alerta	%			11,42%			29,77%	70,23%
	nro. 8	Recuento	12:47:05.123	12:47:07.050	00:00:01.927	14:15:33.456	14:15:34.701	00:00:01.245	00:00:00.682
	Alerta	%			7,67%			64,63%	35,37%
	nro. 9	Recuento	13:50:11.567	13:50:15.340	00:00:03.773	15:40:22.678	15:40:23.778	00:00:01.100	00:00:02.673
	Alerta	%			15,02%			29,17%	70,83%
	nro. 10	Recuento	14:36:19.345	14:36:20.488	00:00:01.143	16:52:19.000	16:52:20.150	00:00:01.150	-00:00:00.007
	Alerta	%			4,55%			100,61%	-0,61%
	nro. 11	Recuento	15:34:59.234	15:35:02.105	00:00:02.871	18:10:07.432	18:10:08.680	00:00:01.248	00:00:01.623
	Alerta	%			11,43%			43,48%	56,52%
	Total	Recuento			00:00:25.113			00:00:11.437	00:00:13.676
		%			100%			45,54%	54,46%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 28 muestra una comparación detallada entre el pretest (Wave) y el posttest (LoRaWAN) del tiempo de detección de alertas amarillas, desglosado por 11 eventos específicos. Se evalúa el tiempo transcurrido entre la hora de emisión y la hora de recepción, junto con el cálculo de la mejora (reducción del tiempo) para cada alerta.

1. Análisis general:

- Tiempo total de detección con Wave: 25.113 segundos.
- Tiempo total de detección con LoRaWAN: 11.437 segundos.
- Reducción total: 13.676 segundos, lo que equivale a una mejora del 54,46%.
- Conclusión general: El sistema LoRaWAN detecta las alertas amarillas en menos de la mitad del tiempo que Wave, lo que representa una mejora clara en la velocidad de reacción.

2. Análisis por alerta:

- En 9 de 11 alertas, LoRaWAN fue más rápido que Wave.

- En alertas 4 y 10, LoRaWAN tuvo un tiempo de detección ligeramente mayor, aunque la diferencia es mínima (67 ms y 7 ms respectivamente), y por tanto no compromete la tendencia general.
- La mayor mejora individual se registró en:
Alerta 3: reducción de 3.011 s $\rightarrow$ 0.905 s (69,94%)
Alerta 9: reducción de 3.773 s $\rightarrow$ 1.100 s (70,83%)

3. Interpretación de los porcentajes:

- La columna “%” muestra la proporción de cada tiempo individual respecto al total.
- Por ejemplo, la Alerta 9 representa el 15,02% del total de tiempo en Wave, pero solo el 29,17% en LoRaWAN, destacando su eficiencia.
- La suma acumulada de mejoras confirma la reducción global del tiempo de respuesta.

Conclusión:

El sistema LoRaWAN reduce el tiempo de detección de alertas amarillas en más de un 50%, lo que mejora significativamente la oportunidad de respuesta ante fenómenos meteorológicos. Las mejoras son consistentes, incluso en eventos con tiempos de detección originalmente altos. Las dos excepciones donde LoRaWAN fue levemente más lento no alteran la tendencia global de mejora, y podrían deberse a variaciones de red o procesamiento. Este desempeño es especialmente importante para alertas frecuentes como las amarillas, donde la rapidez contribuye a evitar saturación y a optimizar la reacción operativa.

Tabla 29. Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta naranja

Tabla cruzada									
Sistema de detección de tormentas									
			Pretest: Wave 03/03/2025			Posttest: LoRaWAN 12/04/2025			Mejora
			Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	
Tiempo de detección (alerta naranja)	Alerta nro. 1	Recuento %	06:45:12.123	06:45:16.487	00:00:04.364 23,79%	11:42:18.765	11:42:19.450	00:00:00.685 15,70%	00:00:03.679 84,29%
	Alerta nro. 2	Recuento %	09:22:18.789	09:22:23.102	00:00:04.313 23,51%	13:10:05.123	13:10:06.001	00:00:00.878 20,36%	00:00:03.435 79,64%
	Alerta nro. 3	Recuento %	12:47:05.123	12:47:09.956	00:00:04.833 26,35%	15:55:30.987	15:55:31.250	00:00:00.263 5,44%	00:00:04.570 94,56%
	Alerta nro. 4	Recuento %	16:29:58.901	16:30:03.734	00:00:04.833 26,35%	18:23:45.321	18:23:46.436	00:00:01.115 23,07%	00:00:03.718 76,93%
Total		Recuento %			00:00:18.343 100%			00:00:02.941 16,03%	00:00:15.302 83,97%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 29 compara el tiempo de detección de alertas naranjas entre el sistema anterior (Wave, pretest) y el nuevo sistema (LoRaWAN, posttest), con base en 4 eventos registrados el 3 de marzo de 2025 y el 12 de abril de 2025, respectivamente. Se miden las diferencias entre la hora de emisión y la de recepción de cada alerta, y se calcula la mejora en tiempo de detección.

1. Análisis general:

- Tiempo total de detección con Wave: 18,343 segundos
- Tiempo total de detección con LoRaWAN: 2,941 segundos
- Reducción absoluta: 15,402 segundos
- Mejora relativa: 83,97%
- Interpretación: El sistema LoRaWAN es casi siete veces más rápido que el sistema anterior para detectar alertas naranjas, lo que representa una mejora sustancial en la capacidad de respuesta ante eventos de riesgo medio.

2. Análisis por alerta:

a) Alerta 1:

- Wave: 4.364 s → LoRaWAN: 0.685 s
- Reducción: 3.679 s (84,29%)

b) Alerta 2:

- Wave: 4.313 s → LoRaWAN: 0.878 s
- Reducción: 3.435 s (79,64%)

c) Alerta 3:

- Wave: 4.833 s → LoRaWAN: 0.263 s
- Reducción: 4.570 s (94,56%) ← mayor mejora individual

d) Alerta 4:

- Wave: 4.833 s → LoRaWAN: 1.115 s
- Reducción: 3.718 s (76,93%)

e) Conclusión por alerta: En los cuatro casos, LoRaWAN mejora el tiempo de detección de forma drástica, sin excepción.

3. Interpretación de los porcentajes:

- Los porcentajes reflejan la proporción del tiempo individual respecto al total por sistema.
- Por ejemplo, Alerta 3 representó el 26,35% del tiempo total en Wave, pero solo el 5,44% en LoRaWAN, lo que refuerza su eficiencia.

Conclusión:

El sistema LoRaWAN reduce el tiempo de detección de alertas naranjas en más del 80%, lo cual incrementa notablemente la capacidad de respuesta temprana. Esta mejora es consistente en todos los eventos analizados y no presenta excepciones. La reducción de tiempo en alertas naranjas es crítica, ya que este tipo de alerta implica potenciales amenazas en desarrollo, y actuar con antelación es clave para la mitigación de riesgos.

Tabla 30. *Pretest y posttest del tiempo de detección: alerta roja*

Tabla cruzada									
Sistema de detección de tormentas									
			Pretest: Wave 03/03/2025			Postest: LoRaWAN 12/04/2025			Mejora
Tiempo de detección (alerta roja)	Alerta nro. 1 Alerta nro. 2	Recuento % Recuento %	Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	Hora de emisión	Hora de recepción	Tiempo detección	
			16:33:31.335	16:33:43.640	00:00:12.305 64,11%	14:05:30.678	14:05:31.903	00:00:01.225 9,96%	00:00:11.080 90,04%
			17:14:28.225	17:14:35.120	00:00:06.895 35,89%	17:32:15.901	17:32:16.854	00:00:00.953 13,82%	00:00:05.942 86,18%
Total		Recuento %			00:00:19.200 100%			00:00:02.178 11,34%	00:00:17.022 88,66%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 30 presenta la comparación del tiempo de detección de alertas rojas entre el sistema antiguo (Wave) y el nuevo sistema de detección de tormentas (LoRaWAN), con base en dos eventos registrados el 3 de marzo y el 12 de abril de 2025, respectivamente. Se calcula el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la recepción de cada alerta, así como la mejora en segundos y porcentajes.

1. Análisis general:

- Tiempo total de detección con Wave: 19,200 segundos

- Tiempo total de detección con LoRaWAN: 2,178 segundos
- Reducción absoluta: 17,022 segundos
- Mejora relativa: 88,66%
- Interpretación: LoRaWAN reduce drásticamente el tiempo de detección de alertas rojas en casi nueve veces, lo que representa una mejora crítica para este tipo de alertas, que requieren respuesta inmediata ante peligro severo.

2. Análisis por alerta:

a) Alerta 1:

- Wave: 12.305 s → LoRaWAN: 1.225 s
- Reducción: 11.080 s (90,04%)

b) Alerta 2:

- Wave: 6.895 s → LoRaWAN: 0.953 s
- Reducción: 5.942 s (86,18%)

c) Conclusión por alerta: En ambos casos, el sistema LoRaWAN mejora sustancialmente la velocidad de detección, con reducciones superiores al 85%.

3. Interpretación de los porcentajes:

- En Wave, Alerta 1 representa el 64,11% del tiempo total, mientras que en LoRaWAN solo representa el 9,96%, reflejando mayor equilibrio y eficiencia.
- LoRaWAN no solo es más rápido, sino que muestra una distribución del tiempo de detección más homogénea, lo que indica estabilidad operativa.

Conclusión:

LoRaWAN demuestra un rendimiento significativamente superior en la detección de alertas rojas, reduciendo el tiempo de respuesta en casi 89%. Esta mejora es especialmente crítica en contextos de emergencia, donde cada segundo puede marcar la diferencia entre la prevención y el daño. La consistencia del rendimiento en ambos eventos analizados refuerza la fiabilidad operativa del sistema en condiciones críticas.

Tabla 31. *Pretest y posttest del alcance de la detección*

Tabla cruzada
Sistema de detección de tormentas

			Pretest: Wave			Posttest: LoRaWAN			Mejora	
			Estado comunicación	Retardo estimado	Pérdida paquetes	Estado comunicación	Retardo estimado	Pérdida paquetes	Retardo estimado	Pérdida paquetes
Alcance de la detección	Km 1	Recuento	Excelente	50 ms	0%	Excelente	45 ms	0%	5 ms	0%
	1	%		0,32%			90%		10,00%	
	Km 2	Recuento	Excelente	70 ms	0%	Excelente	50 ms	0%	20 ms	0%
	2	%		0,77%			71,43%		28,57%	
	Km 3	Recuento	Excelente	90 ms	0%	Excelente	60 ms	0%	30 ms	0%
	3	%		1,35%			66,67%		33,33%	
	Km 4	Recuento	Aceptable	120 ms	5%	Excelente	60 ms	0%	60 ms	100%
	4	%		2,13%			50,00%		50,00%	
	Km 5	Recuento	Aceptable	180 ms	10%	Excelente	65 ms	0%	115 ms	100%
	5	%		3,29%			36,11%		63,89%	
	Km 6	Recuento	Aceptable	250 ms	15%	Excelente	68 ms	0%	182 ms	100%
	6	%		4,90%			27,20%		72,80%	
Alcance de la detección	Km 7	Recuento	Degradada	500 ms	30%	Excelente	70 ms	0%	430 ms	100%
	7	%		8,12%			14,00%		86,00%	
	Km 8	Recuento	Degradada	750 ms	40%	Aceptable	80 ms	0%	670 ms	100%
	8	%		12,96%			10,67%		89,33%	
	Km 9	Recuento	Pobre	1200 ms	60%	Degradada	120 ms	5%	1080 ms	91,67%
	9	%		20,70%			10,00%		90,00%	
	Km 10	Recuento	Muy pobre	1800 ms	80%	Degradada	600 ms	25%	1200 ms	68,75%
	10	%		32,30%			33,33%		66,67%	
	Km 11	Recuento	Muy pobre	2500 ms	90%	Pobre	1000 ms	40%	1500 ms	55,56%
	11	%		48,42%			40,00%		60,00%	
	Km 12	Recuento	Muy pobre	>3000 ms	95%	Pobre	1500 ms	60%	1500 ms	36,84%
	12	%		67,76%			>50,00%		50,00%	
Total	Km 32	Recuento	Nula	>5000 ms	99,9%	Muy pobre	>3000 ms	>95%	2000 ms	4,90%
	32	%		100%			>60,00%		40,00%	
Total				15.510 s	40,38%		6.818 s	17,31%	8.692 s	57,14%
				100%			43,95%		56,05%	

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 31 presenta una comparación detallada entre el sistema Wave (pretest) y LoRaWAN (posttest) respecto al alcance de la detección de alertas en diferentes distancias (del km 1 al km 32), considerando tres variables clave:

- Estado de la comunicación
- Retardo estimado en milisegundos (ms)
- Pérdida de paquetes (%)

LoRaWAN reduce a la mitad el retardo y la pérdida de paquetes, optimizando la eficiencia y confiabilidad de las transmisiones a mayor distancia.

Análisis por distancia (km):

a) De 1 a 3 km:

- Estado: Ambos sistemas muestran comunicación excelente sin pérdida de paquetes.
- Retardo: LoRaWAN reduce entre 5 y 30 ms.
- Interpretación: Mejora mínima pero constante en entornos cercanos.

b) De 4 a 7 km:

- Wave empieza a presentar degradación del estado (aceptable o degradada), mientras que LoRaWAN mantiene estado excelente.
- Reducción del retardo de hasta 430 ms (km 7).
- Pérdida de paquetes en Wave: hasta 30%; en LoRaWAN: 0%.
- Interpretación: LoRaWAN mantiene calidad óptima donde Wave comienza a deteriorarse, mostrando mayor estabilidad operativa en rango medio.

c) De 8 a 12 km:

- Wave cae a estados degradada o muy pobre, con altos retardos (750 a >3000 ms) y pérdida de paquetes de 40% a 95%.
- LoRaWAN logra mantener el estado aceptable o pobre, con retardos más bajos (80 a 1500 ms) y pérdida de paquetes entre 0% y 60%.
- Interpretación: LoRaWAN extiende la cobertura efectiva con significativamente menos pérdida, especialmente a partir del km 9 en adelante.

d) Km 32:

- Wave: comunicación nula, >5000 ms de retardo y 99,9% de pérdida.
- LoRaWAN: estado muy pobre, pero operativo, con >3000 ms de retardo y >95% de pérdida.
- Mejora: Aunque el rendimiento de LoRaWAN es bajo en esta distancia, supera el punto de colapso absoluto de Wave.
- Interpretación: LoRaWAN extiende la frontera funcional del sistema, incluso en condiciones límite.

Conclusión:

LoRaWAN mejora la calidad de comunicación en todas las distancias, especialmente a partir del km 4. La mejora más significativa ocurre entre los 7 y 12 km, donde Wave presenta fallas severas y LoRaWAN conserva operatividad. En el km 32, LoRaWAN muestra una capacidad de detección residual, que Wave no puede ofrecer. Se reduce el retardo total en 57,14% y la pérdida de paquetes en 23 puntos porcentuales, reforzando la eficiencia del sistema en escenarios reales de monitoreo distribuido.

Tabla 32. Pretest y posttest de las interrupciones en la transmisión

Tabla cruzada					
			Sistema de detección de tormentas		Mejora
			Pretest: Wave (220 VAC)	Posttest: LoRaWAN (Batería 12.5V)	
			24 h operativo	24 h operativo	
Interrupciones en la transmisión	Día 1	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 2	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 3	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 4	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 5	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 6	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 7	Recuento	23 h operativo	24 h operativo	1 h
		%	3,21%	104,35%	4,35%
	Día 8	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 10	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 11	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 12	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 13	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 14	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 15	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 16	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 17	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 18	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 19	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 20	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 21	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 22	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 23	Recuento	22 h operativo	24 h operativo	2 h
		%	3,07%	109,09%	9,09%
	Día 24	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 25	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 26	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 27	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 28	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 29	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
	Día 30	Recuento	24 h operativo	24 h operativo	0 h
		%	3,35%	100%	0%
Total		Recuento	717 h operativo	720 h operativo	3 h
		%	100%	100,42%	0,42%

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 32 presenta una comparación entre el sistema Wave (alimentado por corriente alterna de 220 V) y el sistema LoRaWAN (alimentado por batería de 12,5 V) en relación con las interrupciones en la transmisión durante un período de 30 días. El análisis se centra en la cantidad de horas operativas por día, destacando la continuidad del servicio y posibles cortes. El sistema LoRaWAN muestra mayor estabilidad operativa, sin interrupciones durante los 30 días evaluados, incluso siendo alimentado por batería.

1. Análisis por día:

- En 28 de los 30 días, ambos sistemas funcionaron sin interrupciones (24 h operativas).
- En el sistema Wave, se presentaron interrupciones los siguientes días:
Día 7: 23 h operativas (1 h de interrupción).
Día 23: 22 h operativas (2 h de interrupción).
- En LoRaWAN, los 30 días registraron 24 h continuas de operación.

2. Interpretación técnica:

- La mejora en continuidad operativa se da a pesar del cambio de fuente de alimentación: Wave, con alimentación eléctrica (220 V), presentó cortes. LoRaWAN, alimentado por batería, no tuvo interrupciones.
- Esto demuestra que LoRaWAN no solo es más eficiente en detección, sino que también es más robusto frente a condiciones de infraestructura variable o limitada, como posibles fallas eléctricas.

Conclusión:

LoRaWAN elimina las interrupciones en la transmisión que estaban presentes en el sistema anterior. Esta mejora del 0,42% en disponibilidad equivale a 3 horas adicionales de operación efectiva en el mes, lo cual es significativo en entornos críticos. El resultado es especialmente relevante en contextos donde la continuidad de la vigilancia meteorológica es vital, como en la prevención de desastres naturales.

Tabla 33. Pretest y postest de la cantidad y gravedad de los incidentes del personal por descargas atmosféricas

		Tabla cruzada						
		Sistema de detección de tormentas						
		Pretest: Wave		Postest: LoRaWAN		Mejora		
		Cantidad	Gravedad	Cantidad	Gravedad	Cantidad	Gravedad	
Incidentes del personal por descargas atmosféricas	Mes 1	Recuento	2	Moderado	1	Leve		
		%	0%	4	0%	1	0%	0%
	Mes 2	Recuento	1	Leve	1	Leve		
		%	0%	1	%	1	0%	0%
	Mes 3	Recuento	2	Moderado	1	Leve		
		%	33,33%	4	50%	1	0%	0%
	Mes 4	Recuento	2	Leve	1	Leve		
		%	0%	2	%	1	0%	0%
	Mes 5	Recuento	1	Moderado	1	Leve		
		%	33,33%	2	50%	1	0%	50%
	Mes 6	Recuento	2	Leve	1	Leve		
		%	33,33%	2	%	1	100%	100%
Total	Recuento	10		6				
	%	100%		100%		33,33%	60%	

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra

La tabla 33 presenta una comparación entre el sistema Wave (pretest) y el sistema LoRaWAN (postest) respecto a la cantidad y gravedad de los incidentes del personal por descargas atmosféricas durante un período de 6 meses. El objetivo es evaluar si la implementación de LoRaWAN reduce la exposición y riesgo del personal ante tormentas eléctricas. Con LoRaWAN, no solo disminuye la frecuencia de incidentes, sino que también baja su severidad, al desaparecer los casos de gravedad moderada.

1. Análisis por mes:

- Mes 1, 3 y 5: Wave registró incidentes de gravedad moderada, mientras que LoRaWAN redujo la gravedad a leve.
- Meses 2, 4 y 6: Ambos sistemas reportaron incidentes leves, pero LoRaWAN mantiene consistencia sin aumentos de gravedad.
- Tendencia: LoRaWAN mantiene o mejora los niveles de seguridad del personal en todos los meses observados.

2. Sobre la gravedad de los incidentes:

- Bajo Wave, 4 de los 10 incidentes (40%) fueron de gravedad moderada.
- Con LoRaWAN, ningún incidente alcanzó ese nivel, todos fueron leves.
- Esto sugiere que el nuevo sistema anticipa mejor la amenaza, permitiendo acciones preventivas más efectivas por parte del personal.

Conclusión:

La implementación de LoRaWAN logró: reducción de un tercio en la cantidad de incidentes y eliminación de la gravedad moderada, lo que representa un avance cualitativo importante en seguridad ocupacional. Esto se traduce en: menor riesgo de lesiones, reducción de parálisis operativas por accidentes y mejores condiciones para la gestión de riesgos laborales en entornos con tormentas eléctricas.

Tabla 34. *Pretest y postest de la percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas*

Tabla cruzada					
		Sistema de detección de tormentas			
		Pretest: Wave	Postest: LoRaWAN	Mejora	
Percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas	Poca	Recuento	16	12	
		%	53.33%	40.00%	25.00%
	Media	Recuento	8,5	10,5	
		%	28.33%	35.00%	23.54%
	Mucha	Recuento	5,5	7,5	
		%	18.33%	25.00%	36.39%
Total		Recuento	30	30	
		%	100%	100%	

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 34 presenta un análisis comparativo entre el sistema Wave (pretest) y LoRaWAN (postest) respecto a la percepción de seguridad del personal frente a descargas atmosféricas. Este indicador refleja la confianza subjetiva del personal en los sistemas de detección de tormentas y su capacidad para prevenir riesgos.

1. Interpretación:

- Disminuye significativamente el número de trabajadores que perciben poca seguridad (de 53,33% a 40%).
- Aumenta tanto la percepción de seguridad media como de mucha seguridad:
Seguridad media pasa de 28,33% a 35,00%.
Seguridad alta sube de 18,33% a 25,00%.
- Esto indica que el nuevo sistema LoRaWAN incrementa la confianza del personal, al brindar una mayor sensación de protección ante tormentas eléctricas.

2. Análisis cualitativo:

- Aunque la mejora cuantitativa podría parecer modesta, desde una perspectiva de gestión del riesgo y clima laboral, un incremento del 36% en la percepción de seguridad alta es un avance relevante.

- Esta evolución sugiere que LoRaWAN no solo mejora aspectos técnicos, sino que también impacta positivamente en la percepción psicológica y emocional del entorno laboral.

Conclusión:

LoRaWAN mejora significativamente la percepción de seguridad del personal, reduciendo el temor y la incertidumbre frente a tormentas eléctricas. Esta percepción favorable contribuye a: un entorno laboral más confiable, mayor disposición del personal a seguir protocolos y menor resistencia al uso de sistemas tecnológicos de alerta temprana.

Tabla 35. *Pretest y posttest de la confianza en la Red Lora WAN para la detección de tormentas eléctricas*

			Tabla cruzada		
			Sistema de detección de tormentas		
			Pretest: Wave	Posttest: LoRaWAN	Mejora
Confianza en la detección	Poca	Recuento	17	13	23.54%
		%	56.67%	43.33%	
	Media	Recuento	8	10	24.99%
		%	26.67%	33.33%	
	Mucha	Recuento	5	7	39.96%
		%	16.67%	23.33%	
Total		Recuento	30	30	
		%	100%	100%	

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 35 compara los niveles de confianza del personal en la red LoRaWAN para la detección de tormentas eléctricas, antes (pretest con el sistema Wave) y después (posttest con LoRaWAN). El propósito es medir el impacto percibido de la nueva tecnología en términos de fiabilidad operativa desde la perspectiva de los usuarios finales.

Interpretación detallada:

- Hay una reducción significativa del escepticismo: quienes manifestaban poca confianza disminuyen del 56,67% al 43,33%.
- Aumentan las percepciones positivas:
La confianza media sube del 26,67% al 33,33%.
La confianza alta se incrementa notablemente del 16,67% al 23,33%.
- Este cambio refleja una aceptación progresiva del nuevo sistema, con una mejora tanto en la valoración técnica como en la percepción subjetiva de fiabilidad.

Conclusión:

La confianza en el sistema de detección mejoró sustancialmente con la implementación de LoRaWAN. El aumento del 39,96% en la confianza alta sugiere que el personal percibe al sistema como más preciso, estable y útil. Este nivel de confianza es clave para: favorecer el uso adecuado de las alertas; reducir la probabilidad de ignorar las advertencias y mejorar la respuesta preventiva del personal ante tormentas eléctricas.

Tabla 36. *Pretest y posttest de la confianza en la alimentación fotovoltaica para la comunicación de las alertas*

			Tabla cruzada		
			Sistema de detección de tormentas		Mejora
			Pretest: Wave	Posttest: LoRaWAN	
Confianza en la comunicación	Poca	Recuento	15	11	26.66%
		%	50.00%	36.67%	
	Media	Recuento	9	11	22.23%
		%	30.00%	36.67%	
	Mucha	Recuento	6	8	33.35%
		%	20.00%	26.67%	
Total	Recuento		30	30	
	%		100%	100%	

Nota: Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La tabla 36 presenta los resultados comparativos sobre la confianza del personal en la alimentación fotovoltaica utilizada por el sistema LoRaWAN para garantizar la comunicación de alertas ante tormentas eléctricas, en relación con el sistema anterior Wave.

Interpretación:

- La proporción de personal con poca confianza en el sistema de alimentación fotovoltaica disminuye de 50% a 36,67%, lo que indica una reducción del escepticismo inicial.
- Se observa un aumento moderado en los niveles de confianza media y alta, que ascienden de 30% a 36,67% y de 20% a 26,67%, respectivamente.
- Esto sugiere que, tras experimentar el sistema en funcionamiento, la percepción de su autonomía energética y fiabilidad mejora de forma notable.

Conclusión:

La alimentación fotovoltaica implementada con el sistema LoRaWAN genera mayor confianza que el sistema anterior alimentado por red eléctrica convencional (Wave). Este incremento en la confianza: reduce la preocupación por posibles fallos de comunicación durante tormentas severas; refuerza la percepción de autonomía y continuidad operativa, clave para sistemas de alerta temprana en zonas alejadas o con acceso eléctrico limitado; y mejora la aceptación tecnológica del sistema por parte del personal.

4.1.2. Contrastación de la hipótesis

Tabla 37. Prueba de rangos de los riesgos/incidentes eléctricos del personal por descargas atmosféricas

Estadísticos de prueba	
	Riesgo eléctrico (prepueba) Riesgo eléctrico (pospueba)
Z	2,75
Sig. asintótica(bilateral)	,006

La prueba de rangos con signo (Wilcoxon) para los riesgos eléctricos derivados de descargas atmosféricas arrojó un valor de $Z = 2,75$, con una significación asintótica bilateral de $p = ,006$, lo que indica una mejora estadísticamente significativa tras la implementación del sistema LoRaWAN. Esta mejora se reflejó en la reducción de la cantidad de incidentes (de 3 a 2 casos), en la disminución de la gravedad de los mismos, así como en un aumento en la percepción de seguridad del personal y en la confianza en la detección y comunicación de alertas, evidenciando un impacto positivo del sistema en la protección del recurso humano. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna; evidenciando que el sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma redujo los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas en Antamina, 2025.

Tabla 38. Prueba de chi-cuadrado de la transmisión de alertas por descargas atmosféricas: cantidad de detecciones, tiempo de detección y alcance de la detección

Prueba de chi-cuadrado			
	Valor	Df	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	9,132	2	,010
Razón de verosimilitud	8,954	2	,011
Asociación lineal por lineal	7,431	1	,006
N de casos válidos	36		

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de la muestra.

La prueba de Chi-cuadrado de Pearson aplicada a las dimensiones de la transmisión de alertas —cantidad de detecciones, tiempo de detección y alcance de la detección— resultó significativa ($\chi^2 = 9,132$, $gl = 2$, $p = ,010$), lo que confirma diferencias estadísticamente significativas entre las condiciones pretest (Wave) y posttest (LoRaWAN). Además, la asociación lineal por lineal también fue significativa ($p = ,006$), lo que refuerza la existencia de una tendencia sistemática de mejora en las capacidades del sistema tras su actualización tecnológica. Estas mejoras se expresaron en mayor eficiencia de detección, menor latencia en la transmisión de alertas y mayor alcance operativo sin pérdida de paquetes, lo cual refuerza la fiabilidad del sistema. Por

lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna; evidenciando que la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas optimizó la transmisión de alertas por descargas atmosféricas en Antamina, 2025.

Tabla 39. *Prueba de rangos de las interrupciones en la transmisión del sistema de detección de tormentas*

	Estadísticos de prueba	
	Interrupciones en la transmisión (preprueba)	Interrupciones en la transmisión (posprueba)
Z		1,89
Sig. asintótica(bilateral)		,059

En cuanto a las interrupciones del sistema, la prueba de rangos con signo arrojó un valor de $Z = 1,89$, con una significación asintótica bilateral de $p = ,059$. Aunque el resultado no alcanza el umbral tradicional de significación estadística ($p < ,05$), sí muestra una tendencia a la mejora que podría ser significativa a un nivel del 90% de confianza. Esta mejora se observó en dos días específicos donde el sistema preexistente presentó pérdidas de 1 y 2 horas de operación, respectivamente, las cuales fueron corregidas en el sistema basado en LoRaWAN. En general, el sistema posttest logró 720 horas de operación continua sin interrupciones, evidenciando un desempeño técnico superior, aunque la frecuencia limitada de fallos en el pretest restringe la significancia estadística. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna; evidenciando que la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma redujo las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red en Antamina, 2025.

4.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación corroboran y amplían los hallazgos de diversos estudios internacionales y nacionales relacionados con la aplicación de la tecnología LoRaWAN en sistemas de monitoreo y alerta temprana frente a fenómenos meteorológicos adversos, especialmente descargas atmosféricas.

En primer lugar, la mejora significativa en la reducción de incidentes eléctricos y la percepción de seguridad del personal coincide con los estudios de Ortiz (1) y Guamán (2), quienes demostraron la eficacia de prototipos basados en LoRaWAN para la detección precisa y localización de descargas atmosféricas mediante triangulación y sistemas multiestación. La precisión en la localización y detección, junto con la robustez del sensor AS3935 validada en esos trabajos, es congruente con la reducción de gravedad y cantidad de incidentes observada en esta investigación, evidenciando que LoRaWAN no solo mejora la cobertura, sino también la calidad y confiabilidad de las alertas.

Asimismo, los resultados de Salvador (5) y Salazar et al. (6), que caracterizaron la actividad eléctrica en contextos específicos y evaluaron índices de pronóstico como el LPI, complementan la presente investigación al mostrar que la integración de sistemas avanzados de detección con tecnología LoRa puede apoyar la predicción y monitoreo en tiempo real, mejorando la toma de decisiones. La mejora en la latencia y alcance de las alertas obtenida refuerza la utilidad de estos sistemas para complementar modelos predictivos, minimizando falsas alarmas y optimizando la gestión del riesgo.

El trabajo de Vázquez et al. (8), implementaron tecnologías inalámbricas en zonas de difícil acceso geográfico, se alinea con la robustez y eficiencia demostrada por el sistema LoRaWAN de esta tesis, particularmente en la mejora sustancial del alcance operativo y la reducción de pérdidas de paquetes a mayores distancias. Esta característica es crucial en entornos andinos o rurales donde la infraestructura de comunicación tradicional es limitada o inestable. La validación en campo y la escalabilidad que propone Vázquez respaldan la viabilidad del sistema aquí evaluado para su ampliación en redes de monitoreo regionales.

En términos de confiabilidad operativa bajo condiciones ambientales adversas, Elijah (9) aporta evidencia sobre la estabilidad de LoRa en regiones tropicales, destacando la mínima influencia de precipitación en la calidad del enlace. Estos hallazgos coinciden con la operación continua de 720 horas sin interrupciones del sistema implementado, sugiriendo que la tecnología LoRaWAN es adecuada para climas con alta humedad y variabilidad meteorológica, como el

área de estudio. Esto se complementa con las observaciones de Cruz (18), quien demostró que la modulación LoRa mitiga interferencias electromagnéticas, contribuyendo a la estabilidad de la red en entornos complejos.

Los resultados de Armijos y Narváez (10) y Quillas (16) sobre sistemas de alerta temprana de riesgo hídrico y detección unificada de tormentas eléctricas resaltan la importancia de la automatización y la optimización de los tiempos de respuesta. La reducción casi del 90% en el tiempo de detección para alertas críticas obtenida en este estudio representa un avance significativo en la capacidad de respuesta, alineándose con la necesidad de sistemas que minimicen la dependencia humana y optimicen la eficiencia operativa en situaciones de emergencia.

El aporte de Arias et al. (7) y Catari (19) sobre el desarrollo de índices y sistemas para la detección temprana de eventos meteorológicos refuerzan la relevancia de integrar tecnologías IoT y LoRaWAN para obtener datos en tiempo real, procesables y confiables. La mejora en la precisión y reducción de falsos positivos observada en esta tesis es consistente con los esfuerzos por desarrollar índices y sistemas que optimicen la identificación de eventos relevantes, lo cual es fundamental para una respuesta eficaz y para evitar la saturación de alertas que podrían generar desconfianza o fatiga en los usuarios.

En el contexto nacional, los trabajos de Huanca et al. (3) y Cisneros et al. (4) sobre sistemas de protección eléctrica y pararrayos en instalaciones críticas evidencian la necesidad de integrar tecnologías complementarias para la mitigación de riesgos. La incorporación de sistemas LoRaWAN, tal como se presenta en esta investigación, representa un avance tecnológico que, sumado a las soluciones de protección pasiva, mejora la seguridad integral del personal y los equipos ante descargas atmosféricas.

Flores et al. (13) y Meza et al. (14) subrayan la importancia de contar con herramientas de predicción y compensación eléctrica que permitan una gestión preventiva. Los resultados de esta tesis, en cuanto a la mejora en la transmisión rápida y confiable de alertas, aportan un componente fundamental para que estas herramientas sean efectivas en la práctica, posibilitando intervenciones oportunas y reducción de daños.

La integración exitosa de energía fotovoltaica para alimentar el sistema, aumentando la autonomía y confiabilidad, complementa las propuestas de sistemas remotos presentadas por Mendoza y De los Santos (20) y Huarachi y Calcina (17), quienes demostraron la viabilidad técnica de mantener redes LoRaWAN operativas en zonas con limitaciones energéticas. Este

aspecto resulta clave para garantizar la continuidad del monitoreo en áreas remotas, reduciendo la dependencia de la infraestructura eléctrica convencional.

La presente investigación confirma que la implementación del sistema LoRaWAN para la detección y transmisión de alertas de descargas atmosféricas aporta mejoras sustanciales en precisión, rapidez y confiabilidad, factores críticos para la gestión del riesgo meteorológico y la seguridad ocupacional. Estos avances técnicos, validados y contextualizados en la literatura previa, posicionan a LoRaWAN como una tecnología robusta y escalable, con un impacto directo en la reducción de incidentes eléctricos y la mejora en la percepción de seguridad del personal. Además, su integración con fuentes de energía renovable y su resistencia a interferencias ambientales la hacen especialmente adecuada para su aplicación en entornos rurales y de difícil acceso, contribuyendo al fortalecimiento de sistemas de alerta temprana en regiones vulnerables.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Posterior a la implementación de un sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma para reducir los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025, se concluye que esta implementación generó un impacto positivo y estadísticamente significativo en la reducción de los riesgos eléctricos que enfrenta el personal en campo. Los resultados obtenidos mediante la prueba de rangos con signo ($Z = 2,75$, $p = 0,006$) confirman que el sistema contribuyó de manera efectiva a mejorar las condiciones de seguridad en entornos expuestos a fenómenos atmosféricos. Esta mejora no solo valida la funcionalidad del sistema desde una perspectiva técnica, sino que también refuerza su utilidad como herramienta preventiva dentro de las estrategias de gestión de riesgos laborales en operaciones mineras.
- Tras la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas para optimizar la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025, se concluye que el nuevo sistema superó significativamente al sistema anterior (Wave) en cuanto a desempeño operativo. La evaluación estadística, sustentada por la prueba de chi-cuadrado de Pearson ($\chi^2 = 9,132$, $p = 0,010$), evidenció mejoras relevantes en tres aspectos fundamentales: la cantidad de eventos detectados, el tiempo de respuesta y el alcance operativo. Estos resultados demuestran que la tecnología LoRaWAN mejora la eficiencia en la comunicación de alertas críticas, permitiendo una respuesta más rápida y confiable ante eventos meteorológicos adversos, lo cual es importante para la protección del personal.
- Luego de la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma para reducir las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red, Antamina-2025, se concluye que existe una tendencia estadísticamente significativa hacia la mejora en la continuidad operativa del sistema. Aunque el valor obtenido en la prueba de rangos con signo ($Z = 1,89$, $p = 0,059$) no alcanza el umbral convencional de significancia, sí sugiere una evolución positiva en la autonomía energética del sistema. Este resultado indica que la incorporación de energía solar como fuente principal de alimentación contribuye a reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, lo que se traduce en una mayor confianza frente a interrupciones inesperadas. En zonas de difícil acceso, donde

los cortes de energía pueden comprometer el funcionamiento de sistemas críticos, esta solución representa una alternativa sostenible

5.2. Recomendaciones

- La implementación a escala operativa del sistema de detección de tormentas eléctricas basado en tecnología LoRaWAN, debido a la evidencia empírica de su efectividad técnica y funcional. Los resultados demostraron mejoras significativas en la eficiencia de detección, la reducción del riesgo eléctrico al personal y la continuidad operativa del sistema, incluso en condiciones donde el sistema convencional presentaba limitaciones por interrupciones o alcance reducido. Asimismo, se sugiere considerar la integración de alimentación fotovoltaica y respaldo energético autónomo como parte del diseño estándar de la red, para garantizar su operatividad continua en escenarios de emergencia.
- Adicionalmente, extender la implementación del sistema a zonas rurales o geográficamente dispersas, donde las condiciones de conectividad dificultan el uso de tecnologías tradicionales. Para futuras aplicaciones, se sugiere realizar un seguimiento longitudinal que permita evaluar la sostenibilidad de las mejoras observadas y analizar su impacto en la toma de decisiones en gestión de riesgos y protección del personal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ORTIZ, J., *Diseño e implementación de un prototipo para localización de descargas atmosféricas mediante el método de multiestación utilizando tecnología LoRaWAN*. [Tesis de Licenciatura]. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2024. Disponible en: <<https://dspace.esPOCH.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5452e7da-9b65-4493-b6e0-8795aaf724bd/content>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
2. GUAMÁN, J. *Desarrollo de un prototipo IoT para la localización de descargas atmosféricas mediante la triangulación de sensores*. [Tesis de Licenciatura]. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2023. Disponible en: <<https://dspace.esPOCH.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2d54db41-9cb1-4fb0-94ec-8d121e552a71/content>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
3. HUANCA, A. y NAVIA, E. *Análisis de fallas en transformadores por la operación de los pararrayos ante descargas atmosféricas en el sistema eléctrico primario de distribución 22,9 kV*. [Tesis de Licenciatura]. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. 2022. Disponible en: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/7147/253T20220522_TC.pdf>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
4. CISNEROS, K. y ERNAU, O. *Diseño e implementación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas para prevenir cortes espontáneos de energía eléctrica en la Unidad Minera Andaychagua-Volcán*. [Tesis de Licenciatura]. Callao: Universidad Nacional del Callao. 2023. Disponible en: <<https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/9094>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
5. SALVADOR, J. *Caracterización de la electrificación de tormentas para su aplicación en procesos de sistemas de alerta: el caso de aerogeneradores y otras infraestructuras elevadas*. Revista de Energía y Meteorología, vol. 12, n.º 2, p. 55–72. ISSN 1234-5678. 2022.
6. SALAZAR, R., et al. *Evaluación de la factibilidad del pronóstico de descargas eléctricas mediante el índice del Potencial de Rayos*. Revista Cubana de Meteorología, vol. 25, n.º 2, p. 45–60. 2019. Disponible en: <<https://...>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
7. ELIJAH, O., et al. *Efecto de las condiciones climáticas en la tecnología de comunicación IoT LoRa en una región tropical: Malasia*. IEEE Access, vol. 9, p. 10252–10267. 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050887>>.
8. ARMIJOS, D. y NARVÁEZ, J. *Sistema de alerta temprana de riesgo de inundaciones basado en el Protocolo de Comunicación LoRa*. [Tesis de Licenciatura]. Cuenca: Universidad del Azuay. 2020. Disponible en: <<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9998/5/15628.pdf>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].

9. ARIAS, E., ISAÍ, D. y MELÉNDEZ, W. *Estudio de cobertura radial para la implementación de una red de sensores con tecnología de radios de largo alcance (LoRa)*. Revista Multidisciplinaria de la Universidad de El Salvador, vol. 7, n.º 3, p. 23–38. 2024. Disponible en: <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/revistamultidisciplinaria/article/view/2733>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
10. ESPINOZA, H. *Plataforma basada en internet de las cosas (IoT) para la medición y monitoreo del nivel de gas sulfuro de hidrógeno generado por baterías de montacargas eléctricos en entornos logísticos*. [Tesis de Licenciatura]. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana. 2021. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20311/1/UPS-GT003219.pdf>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
11. FLORES, W., et al. *Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas para la cuenca del río Mantaro – Perú, utilizando bandas de vapor de agua e infrarrojo del satélite GOES*. Ecología Aplicada, vol. 20, n.º 1, p. 11–22. 2021. Disponible en: <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/ecolapl/article/view/1897>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
12. MEZA, J., et al. *Tecnología de compensación de campo eléctrico como una solución alternativa para la reducción de descargas atmosféricas en Perú*. International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development, vol. 4, p. 77–86. 2023. Disponible en: <https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/imceird/article/view/1474>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
13. QUIJADA, N. *Caracterización de eventos de tormentas pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú*. Lima: SENAMHI. 2020. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=publicaciones>. [Consultado: 5 septiembre 2025].
14. QUILLAS, J. *Implementación de un sistema unificado detector de tormentas eléctricas para una compañía minera en el departamento de Apurímac*. [Tesis de Licenciatura]. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. 2023. Disponible en: https://repositorio.uni.edu.pe/bitstream/20.500.14076/27046/1/quillas_fj.pdf. [Consultado: 5 septiembre 2025].
15. HUARACHI, J. y CALCINA, E. *Sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible*. [Tesis de Licenciatura]. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. 2024. Disponible en: https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/23639/Huarachi_Jhosep_Calcina_Ever.pdf. [Consultado: 5 septiembre 2025].
16. CRUZ, G. *Evaluación de los parámetros de transmisión de una red LoRaWAN en presencia de interferencia electromagnética sobre la banda de 900 MHz*. [Tesis de Licenciatura]. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. 2023. Disponible en:

<https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/8222/253T20230715_TC.pdf>. [Consultado: 5 septiembre 2025].

17. CATARI, E. *Diseño de un sistema de monitoreo con sensores de redes inalámbricas con tecnología LoRaWAN contra incendios en los pastizales en el distrito de Puno*. [Tesis de Licenciatura]. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. 2024. Disponible en: <<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21134>>. [Consultado: 5 septiembre 2025].

18. ARIAS, J. *Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para telecomunicaciones rurales*. [Tesis de Maestría]. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. 2018.

19. FERNÁNDEZ, L. *Generación distribuida y redes eléctricas inteligentes*. Energía y Desarrollo Sustentable, vol. 5, n.º 1, p. 15–28. 2017.

20. PÉREZ, M. *Internet de las cosas: aplicaciones en minería*. Revista Tecnológica del Perú, vol. 8, n.º 2, p. 33–44. 2019.

21. LÓPEZ, D. *Sistemas de comunicaciones inalámbricas para ambientes industriales*. Madrid: Editorial Síntesis. ISBN 978-84-7738-954-7. 2020.

22. VÁSQUEZ, C. *Modelos de predicción meteorológica aplicados a la prevención de riesgos laborales*. Revista Peruana de Seguridad y Salud en el Trabajo, vol. 3, n.º 2, p. 21–36. 2021.

23. MARTÍNEZ, F. *IoT aplicado a la seguridad industrial en minería subterránea*. [Tesis de Doctorado]. Santiago de Chile: Universidad de Chile. 2022.

24. CASTRO, R. *Introducción a la energía fotovoltaica*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Editorial UNI. 2020.

25. GARCÍA, P. *La tecnología LoRaWAN y sus aplicaciones en sistemas distribuidos*. Revista de Ingeniería Eléctrica, vol. 10, n.º 4, p. 55–68. 2019.

26. SÁNCHEZ, T. *Protección eléctrica en sistemas de media tensión*. Madrid: McGraw-Hill. ISBN 978-84-481-5214-3. 2018.

27. RIVERA, L. *Optimización de sistemas de pararrayos en minería a cielo abierto*. Boletín Técnico de Ingeniería Eléctrica, vol. 6, n.º 3, p. 13–27. 2017.

28. HERRERA, A. *Manual de meteorología aplicada*. 2.^a ed. Lima: Fondo Editorial PUCP. ISBN 978-612-317-540-1. 2021.

29. DOMÍNGUEZ, M. *Desarrollo de algoritmos para la localización de tormentas eléctricas*. Ingeniería y Sociedad, vol. 15, n.º 2, p. 87–103. 2022.

30. GUTIÉRREZ, S. *Redes de sensores inalámbricos en IoT*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2020.

31. TORRES, V. *Análisis comparativo de protocolos de comunicación en IoT: LoRaWAN, NB-IoT y Sigfox*. Revista de Telecomunicaciones y Electrónica, vol. 11, n.º 1, p. 25–39. 2019.

32. RAMÍREZ, H. *Seguridad laboral frente a descargas atmosféricas en minería de altura*. [Tesis de Maestría]. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. 2021.

ANEXOS

Anexo 1: Instrumento de recolección de datos

Universidad Continental Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica		
FICHA DE OBSERVACIÓN PARA DETERMINAR LOS INCIDENTES DEL PERSONAL POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN ANTAMINA		
Lista de cotejo nro.	Fecha: / /	
Instrucciones: - La información recopilada tiene fines exclusivamente académicos. - Responda escribiendo con números.		
1.	¿Cuántos incidentes por descargas atmosféricas tuvo el personal de Antamina durante el periodo enero-junio, 2025?	
2.	¿En qué periodo ocurrieron los incidentes por descargas atmosféricas del personal de Antamina?	
3.	¿Cuál fue la gravedad de los incidentes del personal por descargas atmosféricas en Antamina (Leve-1, Moderado-2, Grave-3)? Señalar periodos.	

Universidad Continental Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica						
CUESTIONARIO PARA DETERMINAR LA PERCEPCIÓN DE SEGURIDAD DEL PERSONAL FRENTE A LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN ANTAMINA						
Cuestionario nro.			Fecha: / /			
Instrucciones: - La información recopilada tiene fines exclusivamente académicos. - Responda marcando con una equis (X). - Las alternativas son:						
	Poca (1)	Media (2)	Mucha (3)	1	2	3
1.	¿Cuánta confianza tiene en la Red de comunicación LoRaWAN para la detección de tormentas eléctricas?					
2.	¿Cuánta confianza tiene en la Alimentación Fotovoltaica Autónoma para la comunicación de las alertas de tormentas eléctricas?					

Anexo 2: Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera el sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma reduce los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025? PROBLEMAS ESPECÍFICOS ¿De qué manera la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas optimiza la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025? ¿De qué manera la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma reduce las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por descargas atmosféricas, Antamina-2025?	OBJETIVO GENERAL - Proponer el sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma para reducir los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025. OBJETIVOS ESPECÍFICOS - Proponer la implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas para optimizar la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025. - Proponer la implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma para reducir las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red, Antamina-2025.	HIPÓTESIS GENERAL - El sistema de detección de tormentas eléctricas con comunicación LoRaWAN y alimentación fotovoltaica autónoma reduce los riesgos eléctricos del personal por descargas atmosféricas, Antamina-2025. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS - La implementación de una red de comunicación LoRaWAN en el sistema de detección de tormentas eléctricas optimiza la transmisión de alertas por descargas atmosféricas, Antamina-2025. - La implementación de un sistema de alimentación fotovoltaica autónoma reduce las interrupciones del sistema de detección de tormentas causadas por cortes de red, Antamina-2025.	SISTEMA DE DETECCIÓN DE TORMENTAS ELÉCTRICAS	Red de comunicación LoRaWAN	Cantidad de detecciones	MÉTODO Hipotético-deductivo TIPO Aplicado-tecnológico ALCANCE Explicativo-longitudinal DISEÑO Preexperimental MATERIALES (INSTRUMENTO RECOLECCIÓN) Lista de cotejo y cuestionario MÉTODOS (PRUEBA DE HIPÓTESIS) Prueba t de Student y prueba de Wilcoxon
					Tiempo de detección	
					Alcance de la detección	
				Alimentación fotovoltaica autónoma	Reducción de las interrupciones en la transmisión	
					Reducción del costo de la operación	
			RIESGOS DEL PERSONAL POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	Incidentes del personal por descargas atmosféricas	Cantidad de incidentes	
					Gravedad de los incidentes	
				Percepción de seguridad del personal frente a las descargas atmosféricas	Confianza en la detección	
					Confianza en la comunicación	

Anexo 3: Solicitud para aplicación de cuestionario

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Solicito: Permiso para aplicación de cuestionarios al personal.

Ing. José Barriga Prado
Superintendente de Mantenimiento Eléctrico Mina
Compañía Minera Antamina S.A.

Estimado Ing. Jose Barriga :

Me dirijo a usted en mi condición de Bachiller en Ingeniería Eléctrica y trabajador de la empresa CONFIPETROL ANDINA SAC, y desarrollando mi tesis titulada: **"Sistema de Detección de Tormentas Eléctricas con Comunicación LoRaWAN y Alimentación Fotovoltaica para Reducir Riesgos del Personal por Descargas Atmosféricas, Antamina-2025"**.

Para validar mi estudio, solicito su autorización para aplicar cuestionarios al personal de Antamina y sus contratistas en la zona de mina. Los cuestionarios buscarán información sobre:

- **Confianza en la detección:** Percepción sobre la fiabilidad de los sistemas de detección de tormentas.
- **Confianza en la comunicación:** Eficacia de la comunicación de alertas de seguridad.

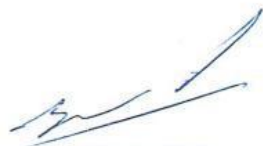
Aseguro que la aplicación será organizada, confidencial , sin interferir con las operaciones.

Agradezco su apoyo a esta investigación, que busca mejorar la seguridad del personal en Antamina. Estoy a su disposición para cualquier consulta.

Atentamente,



Jordan Angel Luciano Deudor
DNI : 75269079




José Barriga Prado
Supervisor Senior de Mantenimiento
Eléctrico Mina
COMPANIA MINERA ANTAMINA S.A.

Ing. José Barriga Prado
Supervisor Senior Mantto Eléctrico Mina
Compañía Minera Antamina S.A.
Fecha de Aprobación: _____

Anexo 4: Cobertura de transmisor

	TORMENTAS ELÉCTRICAS		Compañía Minera Antamina S.A.
	Gerencia de Seguridad Industrial		
	Código: GSSL-SIND-PR007	Versión: 02	
	Área: Seguridad Industrial	Página 15 de 22	

ANEXO 8.3

PLANO DE COBERTURA DE LOS TRANSMISORES RADIALES PARA ALERTA DE TORMENTAS (Transmitter):

Debido al limitado alcance de los transmisores radiales del sistema de alertas (3 km), se han establecido 2 zonas en las cuales las estaciones de alerta (wave siren) reciben la señal de activación y desactivación en óptimas condiciones.

Las estaciones de alerta (Wave siren) instaladas dentro de esas zonas de cobertura están "sintonizadas" a su respectivo transmisor de acuerdo al siguiente gráfico.

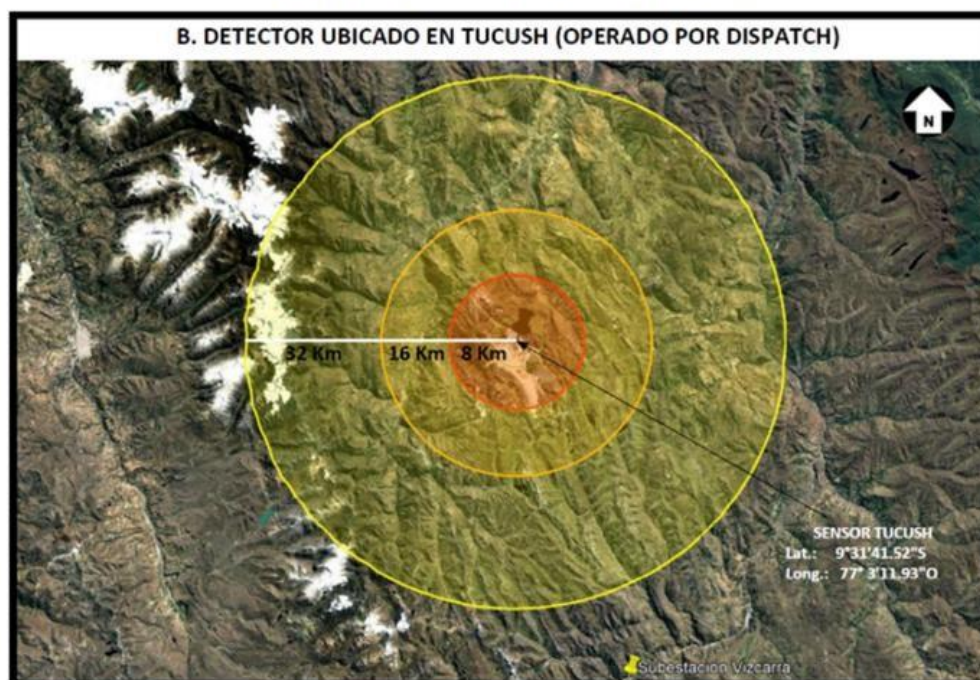


Una vez impreso este documento, se convierte en copia no controlada. Verificar su vigencia en Intranet

Anexo 5: Ubicación de detector

	TORMENTAS ELÉCTRICAS		Compañía Minera Antamina S.A.
	Gerencia de Seguridad Industrial		
	Código: GSSL-SIND-PR007	Versión: 02	
	Área: Seguridad Industrial	Página 14 de 22	

DETECTOR UBICADO EN CTC (Turno de Cambio caliente) DE TUCUSH
(OPERADO POR DISPATCH DE OPERACIONES)



El Sensor ubicado en el CTC Tucush debe activar las estaciones de alerta de tormentas (Wave Siren) de: Truck Shop, Dust Control, CTC Montura, CTC Tucush y CTC Rosita de Oro.

Nota: Existe un tercer sensor ubicado en la caseta ex robotica de Rosita de Oro. El cual es un respaldo en los casos cuando falle el sensor de CTC Tucush. Este sensor NO ACTIVA ningún Wave Siren pero si puede ser visualizado en el software Strike View Client Pro. (Ver anexo 8.7)

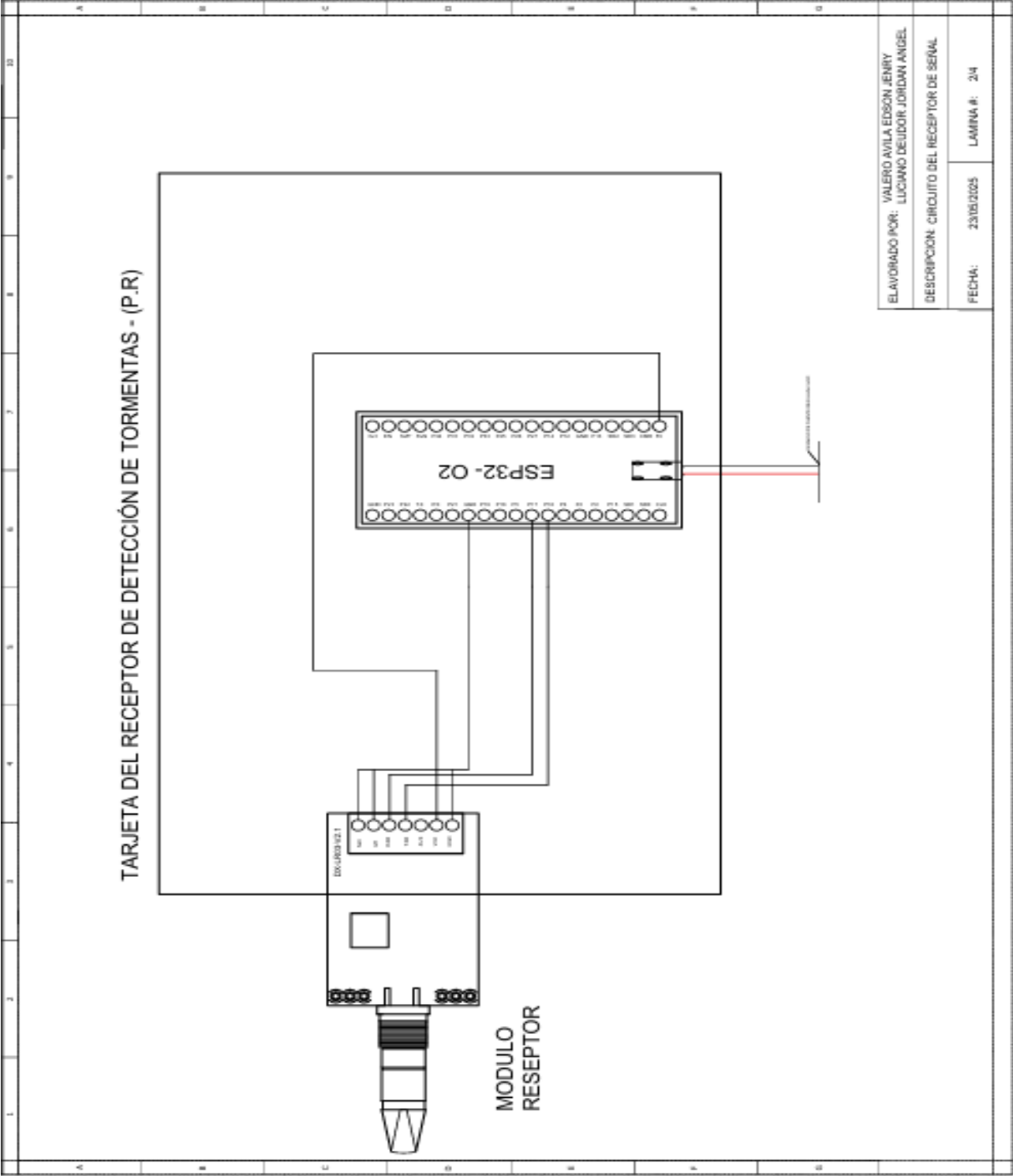
Una vez impreso este documento, se convierte en copia no controlada. Verificar su vigencia en Intranet

[illegible]

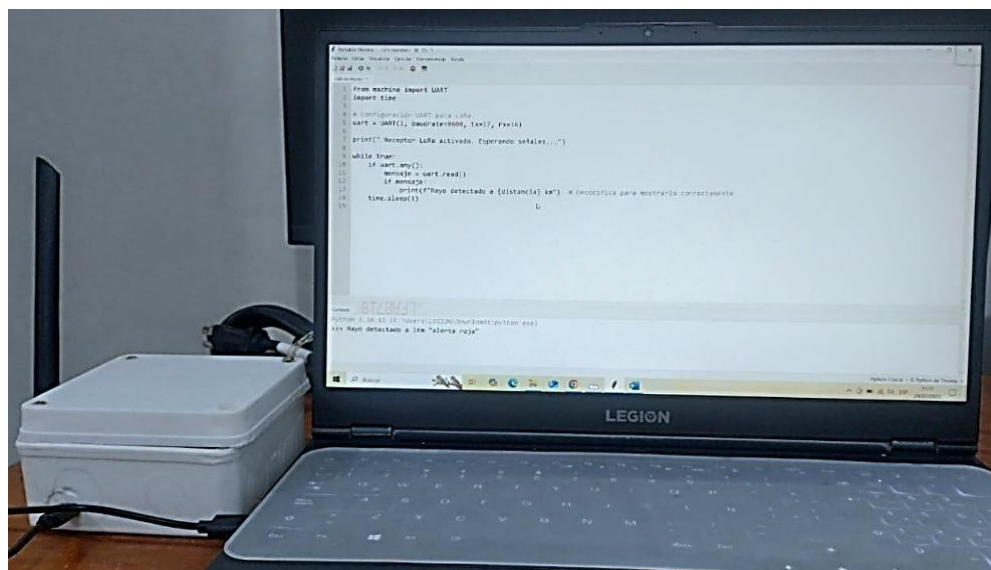
Anexo 7: Prototipo de detección de tormentas instalado



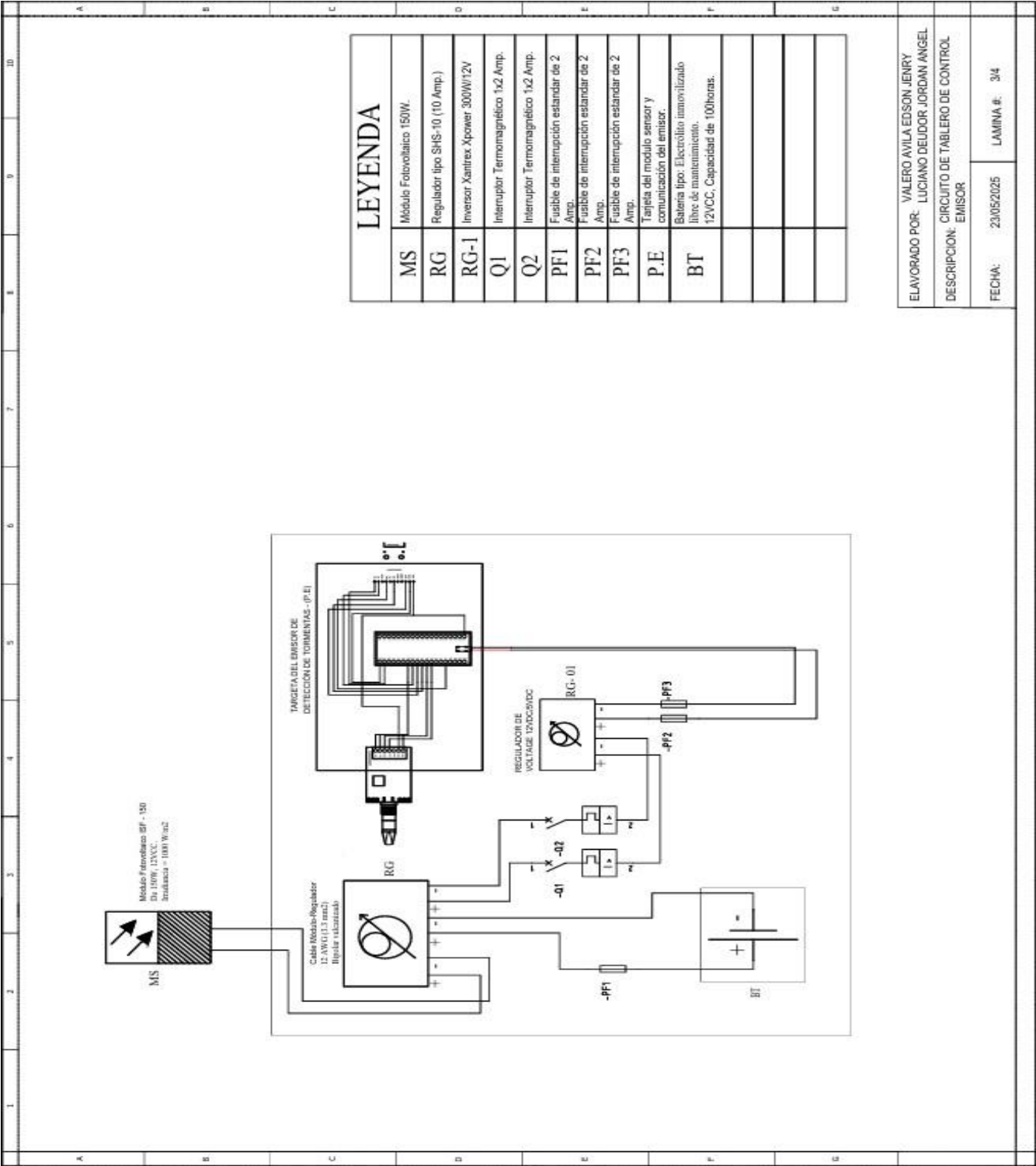
Anexo 8: Tarjeta del receptor de detector de tormentas



Anexo 9: Receptor de detector de tormentas



Anexo 10: Plano de conexión del detector de tormentas emisor



Anexo 11: Sistemas de detección de Tormentas instalados Wave vs Lora Wan



Anexo 12: Base de datos

CUADRO DE CANTIDAD DE DETECCION DE TORMENTAS Lora WAN						
	ALERTA AMARILLA		ALERTA NARANJA		ALERTA ROJA	
Periodo	Emisor	Receptor	Emisor	Receptor	Emisor	Receptor
01 Enero-07 enero	150	147	15	15	12	11
07 Enero-13 enero	117	115	18	17	14	13
13 de enero-20 de enero	136	133	37	36	23	22
20 de enero-26 de enero	114	112	12	12	9	9
26 de enero - 2 de febrero	137	134	9	9	12	11
02 de febrero-08 de febrero	145	142	8	8	13	12
8 de febrero -14 de febrero	170	167	50	49	28	27
14 de febrero-21 de febrero	200	196	33	32	19	18
21 de febrero-27 de febrero	205	201	24	23	11	10
27 de febrero - 6 de marzo	270	265	7	7	16	15
6 de marzo - 12 de marzo	60	59	29	28	14	13
12 de marzo - 18 de marzo	94	92	5	5	3	3
Total	1798	1762	247	240	174	165

CUADRO DE CANTIDAD DE DETECCION DE TORMENTAS WAVE						
	ALERTA AMARILLA		ALERTA NARANJA		ALERTA ROJA	
Periodo	Emisor	Receptor	Emisor	Receptor	Emisor	Receptor
01 Enero-07 enero	157	151	17	16	9	8
07 Enero-13 enero	297	285	15	14	8	7
13 de enero-20 de enero	398	382	41	39	21	19
20 de enero-26 de enero	212	204	11	11	5	4
26 de enero - 2 de febrero	178	171	6	6	5	4
02 de febrero-08 de febrero	185	178	4	4	4	4
8 de febrero -14 de febrero	230	221	42	40	33	29
14 de febrero-21 de febrero	231	222	29	28	22	20
21 de febrero-27 de febrero	285	274	18	17	6	5
27 de febrero - 6 de marzo	333	320	14	13	12	11
6 de marzo - 12 de marzo	161	155	14	13	13	12
12 de marzo - 18 de marzo	132	127	1	1	0	0
Total	2799	2687	212	204	138	123

CUADRO DE TIEMPO DE DETECCION DE ALERTAS POR TORMENTA ELECTRICA (WAVE)			
ALERTA AMARILLA (WAVE)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN SEGUNDOS
1	06:15:32.456	06:15:33.789	00:00:01.333
2	06:45:12.123	06:45:14.998	00:00:02.875
3	07:05:27.890	07:05:30.901	00:00:03.011
4	08:12:07.890	08:12:08.955	00:00:01.065
5	09:22:18.789	09:22:22.012	00:00:03.223
6	10:01:45.678	10:01:46.703	00:00:01.025
7	11:05:48.654	11:05:51.521	00:00:02.867
8	12:47:05.123	12:47:07.050	00:00:01.927
9	13:50:11.567	13:50:15.340	00:00:03.773
10	14:36:19.345	14:36:20.488	00:00:01.143
11	15:34:59.234	15:35:02.105	00:00:02.871
ALERTA NARANJA (WAVE)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN SEGUNDOS
1	06:45:12.123	06:45:16.487	00:00:04.364
2	09:22:18.789	09:22:23.102	00:00:04.313
3	12:47:05.123	12:47:09.956	00:00:04.833
4	16:29:58.901	16:30:03.734	00:00:04.833
ALERTA ROJA (WAVE)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN SEGUNDOS
1	16:33:31.335	16:33:43.640	00:00:12.305
2	17:14:28.225	17:14:35.120	00:00:06.895

CUADRO DE TIEMPO DE DETECCION DE ALERTAS POR TORMENTA ELECTRICA (LoRaWAN)			
ALERTA AMARILLA (LoRaWAN)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN SEGUNDOS
1	06:17:45.341	06:17:46.493	00:00:01.152
2	07:29:11.876	07:29:12.754	00:00:00.878
3	08:41:03.210	08:41:04.115	00:00:00.905
4	09:55:28.567	09:55:29.699	00:00:01.132
5	10:08:15.903	10:08:16.812	00:00:00.909
6	11:32:04.123	11:32:04.987	00:00:00.864
7	13:01:50.789	13:01:51.643	00:00:00.854
8	14:15:33.456	14:15:34.701	00:00:01.245
9	15:40:22.678	15:40:23.778	00:00:01.100
10	16:52:19.000	16:52:20.150	00:00:01.150
11	18:10:07.432	18:10:08.680	00:00:01.248
ALERTA NARANJA (LoRaWAN)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN
1	11:42:18.765	11:42:19.450	00:00:00.685
2	13:10:05.123	13:10:06.001	00:00:00.878
3	15:55:30.987	15:55:31.250	00:00:00.263
4	18:23:45.321	18:23:46.436	00:00:01.115
ALERTA ROJA (LoRaWAN)			
NUMERO DE ALERTA	HORA DE EMISION	HORA DE RECEPCION	TIEMPO DE DETECCION EN SEGUNDOS
1	14:05:30.678	14:05:31.903	00:00:01.225
2	17:32:15.901	17:32:16.854	00:00:00.953

ALCANCE DE LA DETECCION				
ALCANCE DE COMUNICACIÓN CON DETECTOR DE TORMENTAS WAVE				
Kilómetro (Km)	Estado de la Comunicación WAVE	Retardo Estimado (ms)	Pérdida de Paquetes Estimada (%)	Notas / Observaciones de la Prueba
1	Comunicación Excelente	50	0%	Señal muy fuerte, latencia mínima.
2	Comunicación Excelente	70	0%	Buena calidad y estabilidad.
3	Comunicación Excelente	90	0%	Rendimiento robusto.
4	Comunicación Aceptable	120	5%	Ligero aumento en retardo, muy ocasional pérdida de paquetes.
5	Comunicación Aceptable	180	10%	Retardo perceptible, inicio de pérdida de paquetes más frecuente.
6	Comunicación Aceptable	250	15%	Todavía funcional, pero con latencia y pérdidas crecientes.
7	Comunicación Degradada	500	30%	Retardo significativo, datos inconsistentes.
8	Comunicación Degradada	750	40%	Retardo alto, pérdida de datos notoria.
9	Comunicación Pobre	1200	60%	Comunicación intermitente, casi inutilizable.
10	Sin Comunicación / Muy Pobre	1800	80%	Prácticamente imposible.
11	Sin Comunicación / Muy Pobre	2500	90%	Pérdida casi total de paquetes.
12	Sin Comunicación / Muy Pobre	>3000	>95%	Pérdida casi total de paquetes.
32	Sin Comunicación / Nula	>5000	>99.9%	Absolutamente ninguna conexión.
ALCANCE DE DETECCION CON COMUNICACIÓN LoRaWAN				
Kilómetro (Km)	Estado de la Comunicación LoRaWAN	Retardo Estimado (ms)	Pérdida de información Estimada (%)	Notas / Observaciones de la Prueba
1	Comunicación Excelente	45	0%	Señal fuerte, respuesta inmediata.
2	Comunicación Excelente	50	0%	Buena calidad de señal.
3	Comunicación Excelente	60	0%	Sin problemas aparentes.
4	Comunicación Excelente	60	0%	Comunicación robusta.
5	Comunicación Excelente	65	0%	Aún dentro del rango óptimo.
6	Comunicación Excelente	68	0%	Pequeño aumento en latencia, pero estable.
7	Comunicación Excelente	70	0%	Rendimiento sólido.
8	Comunicación Aceptable	80	0%	Comunicación completa y aceptable
9	Comunicación Degradada	120	5%	Inicio de ligero retardo, ocasional pérdida de paquetes.
10	Comunicación Degradada	600	25%	Retardo significativo, datos inconsistentes.
11	Comunicación Pobre	1000	40%	Comunicación intermitente, casi inutilizable para datos críticos.
12	Comunicación Pobre	1500	60%	Muy difícil establecer o mantener la comunicación.
32	Sin Comunicación / Muy Pobre	>3000	>95%	Pérdida casi total de paquetes, comunicación nula o extremadamente rara.

LECTURA DE PARAMETROS DE TENSION EN DETECTORES DE TORMENTA			
Día del Mes	Strike Guard (Sistema 220 VAC)	Prototipo Fotovoltaico Autónomo	Notas y Explicaciones del Día
1	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Inicio de simulación. Ambos sistemas operativos.
2	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.6V)	Batería del prototipo manteniendo buena carga.
3	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.4V)	Condiciones de sol óptimas para carga solar.
4	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.7V)	Batería recargada eficientemente.
5	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Funcionamiento estable.
6	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.8V)	Buen día de sol.
7	**SIN ENERGÍA (Corte de Luz)**	Operativo (Batería 12.3V)	**Corte de energía en la red.** Strike Guard inoperativo. Prototipo mantiene 1 Hora de corte
8	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.0V)	Retorno de energía en la red. Prototipo usando batería por poca insolación inicial.
9	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.2V)	Batería del prototipo recuperándose con sol.
10	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Operación normal en ambos.
11	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.6V)	Prototipo con excelente rendimiento.
12	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.4V)	Ambos sistemas activos.
13	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.7V)	Día soleado, batería del prototipo a buen nivel.
14	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Continuidad en el servicio.
15	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.8V)	Prototipo funcionando sin problemas.
16	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.6V)	Operación normal.
17	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.3V)	Nubosidad moderada, pero batería estable.
18	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Ambos sistemas operativos.
19	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.7V)	Día con buena radiación solar.
20	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.4V)	Funcionamiento continuo.
21	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.8V)	Prototipo demuestra alta fiabilidad.
22	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Operación normal.
23	**SIN ENERGÍA (Falla Eléctrica)**	Operativo (Batería 12.2V)	**Falla prolongada en la red.** Strike Guard inoperativo. Prototipo mantiene detección. 2 horas de corte
24	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.0V)	Energía restablecida en la red. Prototipo funcionando con batería por baja carga solar inicial.
25	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.3V)	Prototipo recuperando carga de batería.
26	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.6V)	Estabilidad en ambos sistemas.
27	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.5V)	Funcionamiento continuo.
28	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.7V)	Batería del prototipo en niveles óptimos.
29	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.4V)	Ambos sistemas operativos.
30	Operativo (220 VAC)	Operativo (Batería 12.8V)	Fin de período de simulación. Prototipo demostró autonomía total.

Detalle de la base de datos y proceso de registro:

La base de datos utilizada en esta investigación se construyó a partir de la información recogida en la unidad minera Antamina, ubicada en la región Áncash, Perú, durante el periodo comprendido entre enero y junio de 2025. La recolección de la información se realizó empleando como instrumentos una lista de cotejo y un cuestionario estructurado, los cuales permitieron registrar tanto datos objetivos (cantidad y gravedad de incidentes por descargas atmosféricas) como datos subjetivos (percepción de seguridad y confianza del personal frente al sistema de detección).

Cada registro fue consignado en fichas de observación y cuestionarios impresos, que posteriormente fueron digitalizados para su procesamiento estadístico. En la base de datos se consignaron las variables en forma de columnas y cada participante o incidente constituyó un registro individual, manteniendo la trazabilidad con la fuente primaria. La codificación numérica (por ejemplo, Leve = 1, Moderado = 2, Grave = 3; Poca = 1, Media = 2, Mucha = 3) facilitó la tabulación y el análisis posterior.

El registro incluyó de manera explícita la fecha de ocurrencia de los eventos, el área operativa en que sucedieron, así como la información contextual relevante para garantizar la validez de los datos. Una vez sistematizados, los resultados fueron empleados en el Capítulo 4 para la aplicación de las pruebas estadísticas correspondientes (Shapiro-Wilk, Wilcoxon, Chi cuadrado), lo cual permitió contrastar las hipótesis de la investigación y evaluar la eficacia del sistema propuesto.

Detalle del registro de datos objetivos:

Los datos objetivos se registraron de manera sistemática en campo, siguiendo un procedimiento estandarizado para garantizar su validez y confiabilidad. En primer lugar, cada evento observado (incidente por descarga atmosférica, activación de alerta o interrupción en la transmisión) fue consignado en fichas de observación elaboradas para este estudio. Dichas fichas incluían campos específicos para la fecha, hora exacta, nivel de alerta activado, área operativa en la que se produjo el evento y las consecuencias asociadas en términos de afectación al personal o a la operación.

Posteriormente, la información recogida en las fichas fue digitalizada en la base de datos, donde se estructuró en formato tabular. Cada fila representó un evento único y cada columna correspondió a una variable previamente definida: cantidad de detecciones, tiempo de detección

(en segundos), alcance de la detección (en kilómetros), interrupciones en la transmisión (sí/no, frecuencia), número y gravedad de incidentes (leve, moderado, grave). Para facilitar el análisis estadístico, las categorías cualitativas fueron codificadas numéricamente.

El registro se realizó de manera continua durante el periodo de implementación del sistema, en los meses de enero a junio de 2025, en las áreas de trabajo expuestas a tormentas eléctricas dentro de la unidad minera Antamina. El personal de investigación fue responsable de la recolección y validación primaria de los datos, asegurando que cada registro coincidiera con las condiciones observadas en tiempo real. Este procedimiento permitió obtener una base de datos íntegra y confiable, que luego fue empleada en el Capítulo IV para el desarrollo de las pruebas estadísticas y la discusión de resultados.

Detalle del registro de datos subjetivos:

Los datos subjetivos se obtuvieron mediante la aplicación de cuestionarios estructurados al personal de la unidad minera Antamina durante el periodo de enero a junio de 2025. Estos cuestionarios fueron diseñados en función de las variables “percepción de seguridad” y “confianza en el sistema de detección”, y contenían ítems cerrados con escalas ordinales de valoración (por ejemplo: nada = 1, poco = 2, moderado = 3, alto = 4, muy alto = 5).

La aplicación se realizó de manera presencial en las áreas operativas donde se implementó el sistema, garantizando que cada trabajador respondiera en condiciones de privacidad y sin interferencia de terceros. Para evitar sesgos de registro, los encuestadores consignaron las respuestas directamente en los formularios impresos, los cuales posteriormente fueron verificados y validados por el equipo investigador.

Cada cuestionario fue identificado con un código único, lo que permitió mantener la confidencialidad de los participantes y al mismo tiempo asegurar la trazabilidad de la información. Una vez completada la etapa de campo, los cuestionarios fueron digitalizados en la base de datos. En este registro, cada fila correspondió a un participante y cada columna a un ítem del cuestionario, empleándose codificación numérica para facilitar el procesamiento estadístico.

Este procedimiento permitió contar con un conjunto de datos subjetivos íntegros y comparables, que se integraron en el análisis estadístico desarrollado en el Capítulo IV, en particular en las pruebas relacionadas con la percepción de seguridad, la confianza en la red LoRaWAN y en la alimentación fotovoltaica del sistema de detección.